Campus de São Carlos

**COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS
NATURAIS PARA A INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA**

NESTOR PEDRO GIACOMINI

ORIENTADOR: Prof. Dr. Alcides Lopes Leão

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ÁREA INTERUNIDADES EM
“CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS”**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS

Compósitos reforçados com fibras naturais para a indústria automobilística

NESTOR PEDRO GIACOMINI

Dissertação apresentada à Área de Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Alcides Lopes Leão

DEDALUS - Acervo - EESC

31100043496

São Carlos
2003

Class.	TESE-EESC
Cutt.	2421
Tombo	T157103
Sysno	1316829

G429c Giacomini, Nestor Pedro
 Compósitos reforçados com fibras naturais para a
 indústria automobilística / Nestor Pedro Giacomini. --
 São Carlos, 2003.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
 São Carlos/Instituto de Física de São Carlos/Instituto
 de Química de São Carlos-Universidade de São Paulo,
 1999.

Área: Ciência e Engenharia de Materiais.
 Orientador: Prof. Dr. Alcides Lopes Leão.

1. Compósitos. 2. Fibras naturais. 3. Indústria
 automotiva. 4. Curauá. 5. Sisal. 6. Prensagem a frio.
 I. Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Ciência e Engenharia de Materiais

Caixa Postal 369 – CEP 13560-970 - São Carlos-SP – Brasil

Tel: (0xx16) 2739589/ Fax: (0xx16) 2739777

e-mail: wladerez@jf.sc.usp.br

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE NESTOR PEDRO GIACOMINI, APRESENTADA À ÁREA INTERUNIDADES CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 28-02-2003.

COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. Alcides Lopes Leão (Presidente) – UNESP

Profa. Dra. Elisabete Frollini – IQSC/USP

Prof. Dr. Jonas de Carvalho – EESC/USP

AGRADECIMENTOS

À DaimlerChrysler do Brasil Ltda, pelo apoio financeiro, metodológico e logístico dispensado a este trabalho, em especial ao Eng. Octávio Reis Pimenta Neto e à Eng^a. Angela Neis, ambos da área de desenvolvimento, pela amizade, pelas orientações e sugestões em todas as fases deste trabalho.

Ao CTQ – DaimlerChrysler do Brasil Ltda pelo apoio sistemático e prático na realização de ensaios durante todo o decorrer do trabalho, em especial ao Sr. Nelson Reis.

À DaimlerChrysler AG (Forschungszentrum – Ulm) pela oportunidade oferecida, em especial ao Dr. Jürgen Knothe pela orientação séria e consistente.

À Tapetes São Carlos Ltda, pelo apoio diário no desenvolvimento de todas as atividades, em especial ao Sr. Giuseppe Florindo Nastri Lombardo e ao Sr. Pedro Michieletto pelo suporte técnico e amizade.

Aos professores Alcides Lopes Leão (UNESP – Botucatu), Regina Helena Porto Francisco (IQSC – USP), Elisabete Frollini (IQSC – USP) pelo incentivo, apoio e sugestões em todo o decorrer do trabalho.

A minha família pelo apoio e incentivo e principalmente pela educação pautada em valores sólidos.

Aos amigos de Santa Maria (RS), São Carlos (SP) e colegas de trabalho de Rio Claro (SP) pelo apoio e incentivo.

Aos funcionários do Instituto de Física de São Carlos, do Instituto de Química de São Carlos e suas Bibliotecas que exercem suas atividades com presteza e boa vontade.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. COMPÓSITOS	1
1.2. OBJETIVOS	3
1.2.1. Objetivo geral	3
1.2.2. Objetivos específicos	4
2. REVISÃO DE LITERATURA	6
2.1. COMPÓSITOS	6
2.2. VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DE COMPÓSITOS	7
2.3. PROCESSOS DE MOLDAGEM	8
2.3.1. RTM (<i>Resin Transferring Molding</i>)	9
2.3.2. SMC (<i>Sheet Molding Compound</i>)	12
2.3.3. TRV (Transferência de Resina a Vácuo)	15
2.3.4. Prensagem a Frio	17
2.4. FIBRAS NATURAIS	20
2.4.1. Vantagens e desvantagens	20
2.4.2. Fibra de Curauá	21
2.4.3. Fibra de Sisal	22
2.4.4. Confecção de mantas em fibras naturais	23

2.5. COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS NATURAIS	24
2.6. FATORES QUE AFETAM AS PROPRIEDADES DOS COMPÓSITOS ..	26
2.6.1. Tipo de reforço	26
2.6.2. Tipo de matriz	26
2.6.3. Umidade	26
2.6.4. Tratamentos superficiais das fibras	28
2.7. RESINAS DE POLIÉSTER INSATURADO	31
3. MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	33
3.2. INSUMOS	34
3.2.1. Fibras utilizadas	34
3.2.2. Resina	38
3.2.3. Carga mineral	38
3.2.4. Aceleradores	39
3.2.5. Iniciador	40
3.2.6. Aditivos	40
3.2.7. Vêu de superfície	40
3.2.8. Gelcoat	41
3.2.9. Desmoldante	42
3.3. Equipamentos	42
3.3.1. Prensa hidráulica	42
3.3.2. Peça experimental	45
3.3.3. Molde	47
3.4. Moldagem	50

3.4.1. Preparo da resina	50
3.4.2. Preparo do molde	51
3.4.3. Parâmetros de processo	52
3.4.4. Desmoldagem	53
3.5. PINTURA E ACABAMENTO	53
3.6. ENSAIOS	54
3.6.1. Resistência à tração, alongamento e módulo de elasticidade	56
3.6.2. Resistência à flexão	56
3.6.3. Resistência ao impacto	56
3.6.4. Absorção de umidade	59
3.6.5. Ciclos de absorção e dessorção de água	61
3.6.6. Envelhecimento artificial	62
3.6.7. Câmara de condensação	63
3.6.8. Envelhecimento térmico	63
3.6.9. Medidas de acabamento superficial	64
3.6.9.1. Brilho	64
3.6.9.2. Neblina (<i>Haze</i>)	65
3.6.9.3. Ondulância (<i>Short-waviness e long-waviness</i>)	67
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
4.1. PROCESSO DE AGULHAMENTO DE MANTAS NÃO-TECIDAS	68
4.2. PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE COMPÓSITOS REFORÇADOS	76
4.2.1. Teor de fibra	76
4.2.2. Resistência à tração	81
4.2.3. Resistência à flexão	98

4.2.4. Resistência ao impacto	106
4.2.5. Absorção de umidade	122
4.2.6. Ciclos de absorção e dessorção de água	133
4.3. ACABAMENTO SUPERFICIAL DE COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS NATURAIS	138
4.3.1. Câmara de condensação	138
4.3.2. Envelhecimento térmico	144
4.3.3. Envelhecimento artificial	149
4.3.4. Resumo dos resultados	156
5. CONCLUSÕES	159
5.1. PRODUÇÃO DE MANTAS NÃO-TECIDAS	159
5.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS	159
5.3. CICLOS DE ABSORÇÃO E DESSORÇÃO DE ÁGUA	160
5.4. QUALIDADE SUPERFICIAL	161
ANEXO I – PROJETO DE MOLDE PARA PRENSAGEM A FRIO	163
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	164

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquema simplificado do processo RTM (<i>Resin Transferring Molding</i>).....	10
Figura 2	(a) Esquema da linha de preparação da pasta de SMC e (b) da etapa de moldagem (compressão) do processo SMC.....	13
Figura 3	Representação geral da produção de peças através do processo TRV.....	16
Figura 4	Representação esquemática da moldagem de peças pelo processo de Prensagem a Frio.....	20
Figura 5	Seqüência de operações na fabricação de mantas agulhadas....	36
Figura 6	Prensa utilizada nos ensaios para a produção de amostras.....	44
Figura 7	(a) Principais vistas da peça idealizada para os ensaios no processo de prensagem a frio e (b) vistas espaciais (A – peça experimental e B – modelo utilizado para rebarbar a peça após a moldagem).....	46
Figura 8	Detalhe do esquema de fechamento empregado na construção do molde (A – Linha de rebarba, B – Zona de restrição ao fluxo de excesso de resina C – Região para armazenamento do excesso de resina).....	48
Figura 9	Detalhe de ambas as faces do molde já instalado na prensa hidráulica e pronto para o uso.....	49
Figura 10	Região das amostras produzidas utilizada para a retirada dos corpos de prova.....	55

Figura 11	Dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de resistência à tração.....	57
Figura 12	(a) Dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de resistência à flexão e (b) Dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de resistência ao impacto.....	58
Figura 13	Dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de absorção de água.....	60
Figura 14	a) Esquema da técnica utilizada para avaliar o brilho de uma superfície através da incidência de um feixe de luz e a subsequente medida da luz refletida; b) Fenômeno de espalhamento da luz em uma superfície.....	66
Figura 15	Tensão máxima na ruptura percentual em função das diferentes etapas do processamento durante a fabricação de uma manta.....	70
Figura 16	Alongamento da fibra na ruptura em função das diferentes etapas do processamento durante a fabricação de uma manta..	71
Figura 17	Teor de umidade da fibra em função das diferentes etapas do processamento.....	73
Figura 18	Fotomicrografia da fibra de curauá previamente ao processamento (fibra bruta), cujo diâmetro é de aproximadamente 97 μm	74
Figura 19	Fotomicrografia da fibra de curauá após o processamento (amostra retirada de uma manta não tecida produzida com uma densidade de agulhamento de 7 ag/cm^2).....	75
Figura 20	Teores de fibra em percentual sobre o peso nos ensaios com fibra de curauá/juta.....	78

Figura 21	Teores de fibra em percentual sobre o peso nos ensaios com fibra de sisal.....	79
Figura 22	Teores de fibra em percentual sobre o peso nos ensaios com fibra de vidro.....	80
Figura 23	Resistência a tração de amostras reforçadas com fibra de curauá/juta em função do teor de fibra, com e sem a adição de carga mineral.....	82
Figura 24	Fotomicrografia de compósito reforçado com fibra de curauá, sem adição de carga mineral após ensaio de resistência a tração.....	83
Figura 25	Fotomicrografia de compósito reforçado com fibra de curauá, com adição de 30% de carga mineral após ensaio de resistência a tração.....	84
Figura 26	Resistência a tração de amostras reforçadas com fibra de sisal em função do teor de fibra, com e sem a adição de carga mineral.....	86
Figura 27	Fotomicrografia de compósito reforçado com fibra de sisal, sem adição de carga mineral após ensaio de resistência a tração.....	87
Figura 28	Fotomicrografia de compósito reforçado com fibra de sisal, com adição de 30% de carga mineral após ensaio de resistência a tração.....	88
Figura 29	Resistência a tração de amostras reforçadas com fibra de vidro em função do teor de fibra, com e sem a adição de carga mineral.....	90

Figura 30	Fotomicrografia de compósito reforçado com fibra de vidro, sem adição de carga mineral após ensaio de resistência a tração.....	91
Figura 31	Fotomicrografia de compósito reforçado com fibra de vidro, com adição de 30% de carga mineral após ensaio de resistência a tração.....	31
Figura 32	Resistência a Tração de compósitos reforçados com fibra de sisal, curauá e vidro em função do teor de fibra, sem adição de carga mineral.....	94
Figura 33	Módulo de Elasticidade na tração para amostras reforçadas com fibra de sisal, vidro e curauá/juta; sem a adição de carga mineral.....	95
Figura 34	Alongamento na ruptura para amostras reforçadas com fibra de sisal, vidro e curauá/juta; sem a adição de carga mineral.....	96
Figura 35	Resistência à Flexão para amostras reforçadas com sisal em diferentes teores de fibra, com e sem a adição de carga mineral.....	99
Figura 36	Resistência à Flexão para amostras reforçadas com curauá/juta em diferentes teores de fibra, com e sem a adição de carga mineral.....	101
Figura 37	Resistência à Flexão para amostras reforçadas com vidro em diferentes teores de fibra, com e sem a adição de carga mineral.....	102
Figura 38	Resistência à Flexão para amostras reforçadas com sisal, curauá/juta e vidro em diferentes teores de fibra, sem a adição de carga mineral.....	104

Figura 39	Resistência ao Impacto para amostras reforçadas com fibra de sisal em diferentes teores de fibra, com e sem a adição de carga mineral.....	107
Figura 40	Fotomicrografia de compósito reforçado com fibra de sisal, sem adição de carga mineral após ensaio de resistência ao impacto.....	108
Figura 41	Fotomicrografia de compósito reforçado com fibra de sisal, com adição de 30% de carga mineral após ensaio de resistência ao impacto.....	109
Figura 42	Resistência ao Impacto para amostras reforçadas com fibra de curuá/juta em diferentes teores de fibra, com e sem a adição de carga mineral.....	111
Figura 43	Fotomicrografia de compósito reforçado com fibra de curauá/juta, sem adição de carga mineral após ensaio de resistência ao impacto.....	112
Figura 44	Fotomicrografia de compósito reforçado com fibra de curauá/juta, com adição de 30% de carga mineral após ensaio de resistência ao impacto.....	113
Figura 45	Resistência ao Impacto para amostras reforçadas com fibra de vidro em diferentes teores de fibra, com e sem a adição de carga mineral.....	116
Figura 46	Fotomicrografia de compósito reforçado com fibra de vidro, sem adição de carga mineral após ensaio de resistência ao impacto.	117
Figura 47	Fotomicrografia de compósito reforçado com fibra de vidro, com adição de 30% de carga mineral após ensaio de resistência ao impacto.....	118

Figura 48	Resistência ao Impacto para amostras reforçadas com sisal, curauá/juta e vidro em diferentes teores de fibra, sem a adição de carga mineral.....	119
Figura 49	Resistência ao Impacto para amostras reforçadas com sisal, curauá/juta e vidro em diferentes teores de fibra, com a adição de carga mineral.....	120
Figura 50	Absorção de umidade em função do tempo para 3 diferentes amostras reforçadas com fibra de sisal (16,0; 28,0 e 39,1% de sisal), sem adição de carga mineral.....	123
Figura 51	Absorção de umidade em função do tempo para amostras reforçadas com fibra de sisal, com e sem adição de carga mineral.....	124
Figura 52	Absorção de umidade em função do tempo para 3 diferentes amostras reforçadas com fibra de curauá/juta (15,1; 18,8 e 25,8% de curauá/juta), com adição de 30% de carga mineral.....	126
Figura 53	Absorção de umidade em função do tempo para amostras reforçadas com fibra de curauá/juta, com e sem adição de carga mineral.....	127
Figura 54	Absorção de umidade em função do tempo para 3 diferentes amostras reforçadas com fibra de vidro (12,8; 23,7 e 33,7% de vidro), sem adição de carga mineral.....	129
Figura 55	Absorção de umidade em função do tempo para 2 diferentes amostras reforçadas com fibra de vidro, com e sem adição de carga mineral.....	130

Figura 56	Absorção de umidade de compósitos reforçados com fibras de sisal, juta/curauá e vidro, com e sem a adição de carga mineral após 48 h de imersão.....	132
Figura 57	Curvas de absorção e dessorção de umidade para amostras produzidas com fibra de sisal e curauá/juta, com e sem adição de 20% de carga mineral. (todas as amostras foram preparadas com aproximadamente 30% de reforço).....	134
Figura 58	Resistência à flexão em função do tempo e da absorção de umidade para amostras produzidas com fibra de sisal e curauá/juta, com e sem adição de 20% de carga mineral. (todas as amostras foram preparadas com aproximadamente 30% de reforço).....	137
Figura 59	Brilho inicial (antes do teste) e percentuais de retenção de brilho para amostras reforçadas com fibra de curauá.....	140
Figura 60	Brilho inicial e percentuais de retenção de brilho para amostras reforçadas com fibra de sisal submetidas à câmara de condensação.....	141
Figura 61	Fotografia de uma amostra reforçada com fibra de sisal (SF30P0) após a absorção de umidade. As regiões esbranquiçadas mostram o afloramento da fibra de sisal.....	142
Figura 62	Brilho inicial e percentuais de retenção de brilho para amostras reforçadas com fibra de curauá/juta submetidas ao envelhecimento térmico.....	146
Figura 63	Brilho inicial e percentuais de retenção de brilho para amostras reforçadas com fibra de sisal submetidas ao envelhecimento térmico.....	147

Figura 64	Brilho inicial e percentuais de retenção de brilho para amostras reforçadas com fibra de curauá/juta submetidas ao envelhecimento artificial.....	150
Figura 65	Brilho inicial e percentuais de retenção de brilho para amostras reforçadas com fibra de sisal submetidas ao envelhecimento artificial.....	152
Figura 66	Fotografias de amostras reforçadas com curauá/juta e sisal utilizadas como “espelhos” para refletir a luz de uma lâmpada fluorescente antes e após os ensaios. (a, b ,c) CF30P0 e (d, e ,f) SF30P0 após envelhecimento térmico, absorção de umidade e envelhecimento artificial, respectivamente.....	155

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Propriedades de algumas fibras naturais comparativamente à fibra de vidro.....	21
Tabela 2	Propriedades da fibra de curauá.....	22
Tabela 3	Propriedades físicas, químicas e mecânicas da fibra de sisal.....	23
Tabela 4	Tratamentos para a fabricação de amostras.....	34
Tabela 5	Propriedades das mantas agulhadas empregadas nos experimentos.....	37
Tabela 6	Propriedades físicas da resina utilizada nos experimentos.....	38
Tabela 7	Delineamento dos experimentos para produção de amostras utilizadas na avaliação de pintura.....	41
Tabela 8	Características da prensa hidráulica utilizada nos ensaios.....	43
Tabela 9	Composição das principais formulações empregadas na produção de amostras.....	51
Tabela 10	Parâmetros de processo utilizado na produção das amostras.....	52
Tabela 11	Listagem dos ensaios físico-mecânicos realizados sobre as amostras.....	54
Tabela 12	Tomada de medidas nos ciclos de absorção e dessorção de água.....	61
Tabela 13	Condições de temperatura e tempo em que as amostras são submetidas durante um único ciclo de envelhecimento térmico..	64

Tabela 14	Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de Resistência à Tração, Alongamento e Módulo de Elasticidade na tração para corpos de prova reforçados com fibra de sisal, curauá/juta e vidro.....	97
Tabela 15	Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de Resistência à Flexão para corpos de prova reforçados com fibra de sisal, curauá/juta e vidro.....	105
Tabela 16	Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de Resistência ao Impacto para corpos de prova reforçados com fibra de sisal, curauá/juta e vidro.....	121
Tabela 17	Valores de absorção de umidade de saturação para amostras reforçadas com fibra de sisal e curauá/juta, com e sem a adição de carga mineral. Os valores foram obtidos após 28 dias de imersão dos corpos de prova.....	133
Tabela 18	Valores de retenção da resistência à flexão no ponto de saturação das amostras e após a secagem ao ar, para amostras reforçadas com curauá e sisal, com e sem adição de carga mineral.....	138
Tabela 19	Valores do efeito neblina (<i>haze</i>) para amostras reforçadas com fibras de curauá/juta e sisal, antes e após os testes de absorção de umidade.....	143
Tabela 20	Resultados para ondulância longa e curta (<i>long e shortterm waviness</i>) para amostras reforçadas com curauá/juta e sisal antes e após os testes de absorção de umidade.....	144

Tabela 21	Valores do efeito neblina (<i>haze</i>) para amostras reforçadas com fibras de curauá/juta e sisal, antes e após o ensaio de envelhecimento térmico.....	148
Tabela 22	Resultados para ondulância longa e curta (<i>long e shortterm waviness</i>) para amostras reforçadas com curauá/juta e sisal antes e após o ensaio de envelhecimento térmico.....	149
Tabela 23	Valores do efeito neblina (<i>haze</i>) para amostras reforçadas com fibras de curauá/juta e sisal, antes e após o ensaio de envelhecimento artificial.....	153
Tabela 24	Resultados para ondulância longa e curta (<i>long e shortterm waviness</i>) para amostras reforçadas com curauá/juta e sisal antes e após o ensaio de envelhecimento artificial.....	153
Tabela 25	Critério de classificação para retenção de brilho, aumento do efeito neblina (<i>haze</i>) e intervalos de ondulância curta e longa (<i>short e longterm waviness</i>).....	156
Tabela 26	Desempenho das diferentes amostras em todos os ensaios para todas as propriedades superficiais analisadas.....	157

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

cp – centipoise

DMA – Dimetilanilina

GPa – Giga Pascal

máx. – Máximo

mín. – Mínimo

MPa – Mega Pascal

PE – Polietileno

PRFV – Plástico Reforçado com Fibra de Vidro

PMEK – Peróxido de Etil Metil Cetona

PS – Poliestireno

PVA – Poliacetato de vinila

PVC – Policloreto de vinila

RTM – Resin Transferring Molding

SMC – Sheet Molding Compound

TRV – Transferência de Resina a Vácuo

UP – Poliéster Insaturado

COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS NATURAIS PARA A INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

Autor: Nestor Pedro Giacomini

Orientador: Prof. Dr. ALCIDES LOPES LEÃO

RESUMO

Este trabalho tem como finalidade o desenvolvimento de compósitos a base de resina de poliéster insaturado reforçados com fibras naturais visando aplicações na indústria automotiva. Foram obtidas amostras em escala semi-industrial de compósitos reforçados com fibra de curauá, sisal e vidro, com teores variando de 15 a 40% em massa, com e sem a adição de carga mineral na matriz polimérica, através do processo de prensagem a frio. Os efeitos de cada um dos fatores foram analisados sobre a resistência à tração, módulo de elasticidade, alongamento na ruptura, resistência à flexão e ao impacto. Além disso, foi determinado o comportamento dos materiais com diferentes composições com relação à absorção de umidade. A variação da resistência à flexão como função do tempo de imersão e do teor de umidade absorvido pelos diferentes materiais foi determinada. Foram analisadas as propriedades superficiais como brilho, neblina (*haze*), ondulância (*long-waviness* e *short-waviness*) para as amostras produzidas e submetidas a ensaios de envelhecimento térmico, câmara de condensação e envelhecimento artificial. Todos os resultados obtidos foram baseados em normas da indústria automobilística para verificar conformidade com as exigências do setor.

NATURAL FIBER REINFORCED COMPOSITES FOR AUTOMOTIVE APPLICATIONS

Author: Nestor Pedro Giacomini

Adviser: Prof. Dr. ALCIDES LOPES LEÃO

ABSTRACTS

The purpose of this work is to develop unsaturated polyester based composites reinforced with natural fibers for automotive applications. Samples have been obtained in a semi-industrial scale of composites reinforced with curauá, sisal and glass fiber, with contents varying from 15 to 40% in weight, with and without mineral filler incorporation to the polyester matrix. The molding technique employed was compression molding. The effects of these variables have been investigated over the tensile strength, young's modulus, strain at rupture, flexural and impact strength of the materials. The behavior of each sample has been investigated concerning water absorption. The variation of flexural strength as a function of water absorption and immersion time has been determined for each formulation studied. Surface properties such as gloss, haze, long and short-waviness have been determined for all samples obtained just after painting and after artificial weathering, thermal aging and water absorption tests. All results have been performed based on automotive standards in order to evaluate the conformance of the materials to the requirements of the industry.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento contínuo no consumo de recursos minerais no mundo, como o petróleo, é um tema que tem recebido atenção constante da sociedade científica. As taxas de crescimento populacionais atuais, associadas ao estilo de vida moderno, cujo consumo de material sintético per capita é elevado, destacam a necessidade de introduzir a utilização de recursos de origem renovável na fabricação de componentes.

Dentre os produtos provenientes de fonte renovável, destacam-se as fibras naturais. Diversas fibras naturais são produzidas em praticamente todos os países e usualmente são designadas por materiais lignocelulósicos. Particularmente no Brasil, existe uma grande variedade de fibras naturais com diferentes propriedades físicas, mecânicas e químicas. Entre as fibras que possuem aplicação comercial intensa, destacam-se as fibras de sisal, juta e rami. Além destas, a fibra de curauá tem recentemente recebido atenção especial dos pesquisadores recentemente visto que a mesma apresenta boas propriedades mecânicas. Devido a sua baixa produção e disponibilidade no mercado, a fibra de curauá ainda possui aplicações limitadas.

Pode-se destacar como principais vantagens do uso de fibras naturais ou polímeros naturais : a) são provenientes de fontes renováveis, o que em princípio corresponde a uma fonte inesgotável; b) são produtos biodegradáveis – característica crucial para componentes que após esgotar a sua vida útil devem ser descartados; c) são materiais recicláveis – as fibras naturais podem ser facilmente convertidas em energia térmica através da combustão em fornos ou caldeiras sem deixar resíduos, exceto pequenas quantidades de cinzas; d) as fibras naturais representam uma nova fonte de renda para a população rural, podendo evitar o enorme fluxo do campo para a cidade, verificado principalmente nas regiões norte e nordeste do país e finalmente e) seu baixo custo.

1.1 Compósitos

A inteligência e a curiosidade humana permitiram o desenvolvimento de inúmeros materiais com o objetivo de satisfazer as suas necessidades, seja para garantir a sua sobrevivência ou por conforto. A possibilidade de transformar recursos naturais em materiais sintéticos acelerou a evolução tecnológica, visto que o avanço nas tecnologias é fortemente dependente dos materiais disponíveis com propriedades e características adequadas. A medida em que se verificam avanços, em que as tecnologias se sofisticam, torna-se mais difícil que os materiais até então disponíveis satisfaçam plenamente as necessidades, seja por questões de características, propriedades mecânicas, forma de obtenção ou custo.

Os primeiros materiais conjugados ou compósitos surgiram após o homem ter abandonado as cavernas, quando surgiu a necessidade de se construírem moradias. Inicialmente esta necessidade foi suprida pela enorme quantidade de madeira e pedras disponíveis. No entanto, a escassez destes materiais em algumas regiões fez com que o homem passasse a utilizar barro para produção de tijolos secos ao sol. Estes tijolos eram bastante frágeis e quebradiços

o que foi bastante melhorado pela conjugação do barro com palhas de arroz ou milho, deixando-os mais resistentes e duráveis.

A produção de compósitos teve um forte impulso a partir da segunda metade do século XX, quando começaram a ser produzidas resinas plásticas. Paralelamente à produção de resinas, obteve-se um grande avanço na produção de fibra de vidro a partir de 1940, o que impulsionou a sua utilização como reforço e deu origem a atual era dos materiais conjugados avançados.

Atualmente, busca-se utilizar recursos provenientes de fontes renováveis, seja na tentativa de reduzir o impacto ambiental ou na tentativa de reduzir os custos de produção. Uma série de produtos a base de fibras naturais foram desenvolvidos, principalmente para peças de acabamento interno de veículos, onde propriedades acústicas e térmicas são relevantes, analisando exclusivamente o setor automobilístico.

O uso de compósitos possui uma série de vantagens quando comparado com materiais tradicionais como os metais (aço, alumínio, etc.) ou termoplásticos (polipropileno, poliestireno, polietileno, etc.). Os materiais compósitos podem ser projetados para atender requerimentos específicos para cada aplicação. Esta flexibilidade de projeto ou construção de compósitos é alcançada através da escolha adequada da matriz e do reforço. Além disto, existem tecnologias de processamento disponíveis no mercado para atender praticamente todos os setores industriais, como o aeroespacial, automotivo, elétrico ou de aplicações em geral. Os compósitos podem ser projetados em geometrias extremamente complexas, sem incorrer em custos elevados de ferramentas e dispositivos, como é o caso dos metais.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste estudo foi avaliar a utilização das fibras naturais de sisal e curauá na substituição da fibra de vidro para a produção de componentes automotivos de acabamento externo, produzidos através do processo de prensagem a frio.

1.2.2 Objetivos específicos

Caracterizar as variações sofridas pelas fibras naturais durante seu processamento para fabricação de mantas agulhadas com relação à resistência à tração, alongamento na ruptura e teor de umidade.

Avaliar o efeito da atuação das fibras de sisal e curauá como reforço na produção de compósitos a base de poliéster insaturado, comparativamente à fibra de vidro.

Avaliar o efeito do teor de cada fibra sobre a resistência à tração, módulo de elasticidade, alongamento na ruptura, resistência à flexão, resistência ao impacto e absorção de umidade.

Avaliar o efeito do teor de carga mineral adicionado a matriz polimérica sobre as propriedades mecânicas dos materiais.

Determinar as curvas de absorção de umidade dos materiais em função do tipo de fibra utilizada como reforço e da matriz, e correlacionar este fenômeno com a resistência à flexão.

Caracterizar os materiais acabados e pintados através da medição de brilho, neblina (*haze*) e ondulância (*long-waviness* e *short-waviness*) em função do tipo de reforço, matriz e forma de construção dos compósitos.

Avaliar o efeito do envelhecimento artificial, câmara de condensação e envelhecimento térmico sobre as propriedades de superfície dos compósitos, em função do tipo de reforço, matriz e forma de construção.

Comparar os resultados obtidos com aqueles especificados pela indústria automotiva a fim de definir a conformidade ou não-conformidade dos compósitos com relação às exigências do setor.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Compósitos

A definição usual para compósitos ou materiais conjugados refere-se aos materiais obtidos através da combinação de dois diferentes materiais, de forma a obter determinadas propriedades que não poderiam ser obtidas com os materiais originais individualmente ^[1]. Os materiais compósitos podem ser projetados de forma a obter excelentes combinações de resistência, tenacidade, densidade, resistência à altas temperaturas, resistência à corrosão, dureza ou condutividade.

Os compósitos podem ser classificados em três diferentes categorias

[1].

- particulados: propriedades isotrópicas (concreto, por exemplo);
- fibrosos: propriedades isotrópicas ou anisotrópicas, dependendo do modo da distribuição das fibras na matriz (polímeros reforçados com fibras, por exemplo) e;
- laminares: propriedades usualmente anisotrópicas (laminados de madeira).

Os polímeros são reforçados com materiais fibrosos para melhorar as suas propriedades físicas e mecânicas, podendo ainda serem combinados com

cargas minerais para melhorar determinadas características, bem como para reduzir o custo final do produto ^[2].

Dentre os diversos polímeros utilizados na indústria do plástico reforçado destaca-se o poliéster insaturado. A composição básica de um compósito reforçado consiste de resina poliéster insaturado, fibras, cargas minerais e aditivos.

Através de diferentes técnicas de moldagem; como Laminação Manual, *Spray-Up*, Transferência de Resina a Vácuo, *Resin Transferring Molding* (RTM), Prensagem a Frio, *Sheet Molding Compound* (SMC) e *Bulk Molding Compound* (BMC); e diferentes combinações dos componentes básicos é possível obter materiais com propriedades físicas, químicas e mecânicas que variam de forma a atender as exigências de inúmeras aplicações ^[3].

Em função da grande flexibilidade nas formulações e propriedades, os compósitos ganharam espaço nos mercados como transporte, construção, aplicações estruturais entre vários outros.

2.2 Vantagens da utilização de compósitos

O introdução dos materiais compósitos no mercado forneceu subsídio aos projetistas para selecionarem estruturas e materiais para atender exigências específicas em propriedades mecânicas, físicas e químicas. Esta característica única dos materiais compósitos permitiu a sua ampla aplicação nos mais diversos segmentos da indústria ^[4].

Através do uso de materiais compósitos, o engenheiro deixa de ser um simples selecionador de materiais, mas assume o papel também de projetista. Neste caso, o projeto do material consiste em selecionar o par fibra-resina que atenda todos os requisitos do projeto. A escolha da melhor fibra e da melhor resina nem sempre resultará no melhor material compósito; a escolha da melhor

combinação fibra-resina será responsável pelo sucesso do projeto ^[4]. Este trabalho deve sempre considerar as exigências técnicas e econômicas do projeto bem como a escala de produção do produto.

2.3. Processos de moldagem

Os processos de moldagem consistem em técnicas de processamento de polímeros reforçados com fibras, sejam estas de origem natural ou sintética. Basicamente podemos classificar os processos segundo dois diferentes critérios ^[3]:

- a) quanto à característica do molde;
- b) quanto à tecnologia do processo e mão-de-obra;

Quanto à característica do molde, pode-se classificar os processos em duas categorias: processos em molde aberto e molde fechado. Ainda, com relação à tecnologia empregada esta classificação pode ser da seguinte forma: processos manuais, semi-manuais e automatizados.

De maneira geral, pode-se citar alguns processos atualmente utilizados, classificados de acordo com o tipo de molde empregado, como segue:

a) Molde aberto:

- *Hand Lay - Up*
- *Spray – UP*

b) Molde fechado:

- RTM (*Resin Transferring Molding*);
- SMC (*Sheet Molding Compound*);
- Prensagem a frio;
- TRV (Transferência de resina a vácuo).

A escolha entre um determinado processo e outro é feita em função das características geométricas da peça, do número de peças a serem produzidas (escala), finalidade ou aplicação final da peça, entre outras características ^[5]. A seguir, segue uma breve descrição de alguns dos processos atualmente mais utilizados pela indústria automobilística no Brasil.

2.3.1. RTM (*Resin Transferring Molding*) ^[3]

Este processo é muito usado na indústria automobilística, principalmente na produção em pequenas escalas, que é o caso do segmento de veículos comerciais do mercado brasileiro, por exemplo. O RTM é um processo em molde fechado, que consiste na injeção da resina em um molde onde o reforço de fibras foi previamente distribuído. Uma descrição breve deste processo é feita a seguir.

O molde é constituído de duas partes: macho e fêmea. Devidamente preparadas, elas recebem a fibra em quantidade e forma de disposição pré-definidas. Após o fechamento do molde, a resina com os agentes de aceleração e cura são injetados para dentro de sua cavidade, ocupando o lugar do ar, que é expulso do molde e sai pelas bordas (*pinch-off*). A injeção é suspensa quando iniciar a saída de resina pelos escapes do molde, indicando que a cavidade está totalmente preenchida. O orifício de injeção é fechado, aguardando-se então pela cura da resina, que pode ocorrer a temperatura ambiente ou com aquecimento. A figura 1 ilustra, de forma simplificada, o esquema geral do processo RTM.

O número de moldes necessário para a produção de um determinado item é estabelecido por uma série de fatores, tais como : tempo de preparação do molde, tempo de injeção, tempo de cura e extração da peça pronta. O ciclo de cura deste processo, quando são utilizados resina poliéster insaturado e reforço de fibra de vidro, varia entre 6 e 20 min.

Figura 1 - Esquema simplificado do processo RTM (*Resin Transferring Molding*)^[3]

Dentre as vantagens obtidas com o emprego do processo RTM, quando comparado com um processo de molde aberto, pode-se citar ^[3]:

- Bom acabamento em ambas as faces da peça moldada;
- Alto rendimento das matérias-primas empregadas;
- Molde e equipamentos leves e de custo relativamente baixo;
- Condições de maior higiene no ambiente de trabalho;
- Rápido ciclo de moldagem;
- Boa reprodutibilidade de detalhes;
- Baixa incidência de mão-de-obra;
- Processo mais mecanizado e menos sensível à habilidade da mão-de-obra;
- Menor nível de poluição do ar pela menor emissão de monômero de estireno;
- Peças com boa qualidade, sem bolhas de ar;
- Economia de espaço pelas menores dimensões do equipamento (pode ser 20 vezes menor do que em molde aberto).

O processo RTM, no entanto, possui algumas limitações, como segue abaixo:

- a) A resina, uma vez iniciada, deve ser consumida dentro de um determinado espaço de tempo, sob pena de iniciar a polimerização, aumentando rapidamente a viscosidade e aumentando com isso a dificuldade de moldá-la como convém. O tempo decorrido entre a adição do iniciador e a alteração na viscosidade, chama-se tempo de gel. É o tempo máximo entre a adição do iniciador e o início da reticulação, que torna a resina inadequada para a moldagem.
- b) Para se obter maiores vantagens, em termos de produção, procura-se utilizar um sistema de iniciação que permita trabalhar com o menor tempo de gel possível, não esquecendo o fator segurança.

- c) Resinas com viscosidade superior a 400 cP não são recomendadas. As resinas indicadas são aquelas cujas viscosidades variam entre 250 a 350 cP, que podem ser injetadas, utilizando-se pressões que variam entre 0,6 a 4 bar, conforme as variações de tempo de injeção e a resistência ao arraste das fibras.
- d) A viscosidade da resina pode ser diminuída pela adição de monômero de estireno, mas deve-se levar em conta que este procedimento acarreta enfraquecimento do material, ou seja, comprometimento das propriedades físico-mecânicas. O estireno, além de diminuir a viscosidade, diminuiu a velocidade de cura. É aconselhável não ultrapassar um teor de 40% levando-se em conta que, em moldes fechados, é maior a dificuldade de sua volatilização.

2.3.2. SMC (*Sheet Molding Compound*) ^[2]

Sheet Molding Compound (SMC) é um processo em molde fechado, especialmente aplicável para altas produções (escalas superiores a 10.000 peças/ano), em peças que requerem acabamento superficial de qualidade superior e excelentes propriedades mecânicas ^[3].

O SMC é composto basicamente de quatro componentes: resinas termofixas, fibras, cargas e aditivos. A combinação destes componentes torna o SMC um dos plásticos reforçados mais versátil do mercado, que em função disso apresenta grande aplicação no mercado automotivo, da construção, eletro-eletrônico entre outros.

O processo SMC divide-se em duas etapas: a preparação do composto e a moldagem. Na primeira etapa a pasta (resinas, aditivos e cargas minerais) recebe a fibra picada como ilustra a figura 2. O produto desta etapa é conhecido como o SMC. Este produto é maturado sob condições controladas de temperatura, até atingir a viscosidade ideal para a moldagem.

(a)

(b)

Figura 2 – (a) Esquema da linha de preparação da pasta de SMC ^[6] e (b) da etapa de moldagem (compressão) do processo SMC. ^[3]

A segunda etapa consiste na moldagem propriamente dita. Nesta fase, a quantidade exata de material necessária para a moldagem é recortada e colocada sobre o molde e em seguida prensada até a cavidade ser totalmente preenchida pelo material. O molde deve estar aquecido em temperaturas entre 140°C e 170°C para garantir uma boa moldagem.

Normalmente, as resinas mais indicadas para este processo são poliésteres insaturados combinados com outros polímeros, tais como PE, PS, PVA, PVC, PMMA e outros, que entram numa proporção variável de 4 a 40 partes, em relação à resina de poliéster. A função dos termoplásticos é melhorar o acabamento superficial e reduzir a contração da resina durante o processo de cura ou polimerização.

Os iniciadores (erroneamente chamados de catalisadores) mais indicados para o processo SMC são os que possuem estabilidade a temperatura ambiente, tais como o perbenzoato de t-butila e o hidroperóxido de t-butila, que funcionam bem num intervalo de temperatura entre 145°C e 155°C (temperatura na qual inicia-se a decomposição). Outros iniciadores atuam em temperaturas diferentes, como: peroxoato de t-butila (120 a 135°C), peróxido de 2,5 dimetilexano (120 a 130°C), peróxido de t-butil etil hexanoato (105 a 135°C).

As cargas mais indicadas para o SMC são o carbonato de cálcio, que melhora a moldagem e o acabamento superficial, o caulim, que resiste mais aos ácidos do que o carbonato de cálcio e ainda a alumina tri-hidratada para aplicações em compósitos com propriedades anti-chama.

Os desmoldantes entram como aditivos e têm por função facilitar a extração da peça do molde. Os mais usados são o estearato de zinco (1,5 a 2,0 % sobre o SMC) e o estearato de cálcio, bem como outros produtos a base de fosfatos.

Os reforços utilizados no SMC são fibras de vidro, cujo comprimento varia desde 6mm até 50mm. Quanto mais curta a fibra, em geral, melhor a moldagem. A escolha do tipo de fibra é feita levando-se em consideração o desenho da peça e as exigências a que o produto será submetido.

Após o período de maturação, o SMC é prensado a uma temperatura de 140 a 170°C, aplicando-se ao molde pressões de 45 bar até 140 bar, durante um tempo de 1 a 5 min.

2.3.3. TRV (Transferência de Resina a Vácuo) ^[3]

O TRV é um processo em molde fechado, utilizado na produção de pequenas séries, em que é desejado um bom acabamento da peça em ambas as faces, além das boas propriedades mecânicas do compósito final. Este processo é similar ao processo RTM, desde os aspectos técnicos bem como do ponto de vista econômico.

Neste processo, o reforço (mantas de fibra de vidro) é previamente distribuído pelo molde, que deve ser devidamente fechado para impedir a entrada de ar durante o preenchimento do mesmo pela resina.

No processo TRV, a resina com os agentes de cura e aceleração é forçada a preencher o molde de um lado a outro do mesmo, passando por entre o reforço, através de vácuo obtido com o auxílio de uma bomba. O vácuo aplicado é da ordem de 1 bar, variando conforme o tipo de peça que está sendo moldada e o tipo de resina utilizada.

Figura 3 - Representação geral da produção de peças através do processo TRV. ^[3]

O preenchimento do molde é interrompido quando a resina começa a sair pela extremidade onde está sendo aplicado o vácuo. Após o molde ser preenchido inicia-se a cura da resina. Após esta etapa, extrai-se a peça pronta e acabada. Um esquema simples do processo pode ser visualizado na figura 3.

As principais características do processo são:

- peças sem rebarbas ou quase inexistentes;
- ferramental pode ser construído em PRFV ;
- aplicável em séries de até 2.000 peças por ano;
- vácuo aplicado: aproximadamente 1 bar;
- baixo custo de ferramental;
- tanto resinas de poliéster insaturado como epóxi podem se empregadas;
- é possível adicionar um teor elevado de fibras;
- espessura constante de peça para peça
- boa repetibilidade no processo;
- prolongada vida útil do molde;
- não há a necessidade de pós-cura;
- processo limpo (não há emissões de vapores e não ocorre contato dos operadores com a resina).

2.3.4. Prensagem a Frio ^[3]

Este processo é também realizado em molde fechado, aplicável para médias séries nos casos em que se deseja alta velocidade de produção associada a boa qualidade das peças. Apresenta reais vantagens sobre os demais processos principalmente no que diz respeito a custos de moldes, equipamentos, área necessária e treinamento de mão-de-obra.

Neste processo, o molde é do tipo macho-fêmea geralmente construído em poliéster insaturado ou epóxi. O reforço é previamente colocado em uma das cavidades do molde e, a seguir, a resina com agentes de cura e de aceleração é derramada sobre o reforço dentro da cavidade. A outra face do molde é comprimida (prensagem) fazendo com que a resina flua e impregne o reforço (fibras de vidro). Neste processo, ambas as faces da peça são bem acabadas. Uma visão simplificada da moldagem através deste processo pode ser visualizada na figura 4.

As peças podem ser moldadas na cor desejada pela pigmentação da resina, ou pintadas posteriormente, ou ainda com *gelcoat*.

As principais características do processo são:

- Peças apresentam rebarbas;
- Ferramental pode ser construído em PRFV;
- Aplicável em séries de 5.000 a 15.000 peças por ano;
- Requer o uso de uma prensa (pressão na moldagem de no mínimo 60 kgf/cm²);
- A vida do molde pode chegar a até 5.000 peças (molde em PRFV);
- O processo não requer aquecimento do molde (cura a temperatura ambiente);
- Apresenta excelente reprodutibilidade entre moldagens.

Figura 4 - Representação esquemática da moldagem de peças pelo processo de Prensagem a Frio. ^[3]

2.4. Fibras Naturais

Fibras naturais são encontradas em praticamente todas as regiões do planeta, sob diferentes formas de vegetação. Algumas fibras ocorrem espontaneamente na natureza e/ou são cultivadas como atividade agrícola. As fibras naturais podem também ser denominadas por fibras celulósicas, visto que a celulose é o principal componente químico; ou ainda por fibras lignocelulósicas quando levamos em consideração que a maioria das fibras contém lignina em sua estrutura; um polímero polifenólico natural. O campo de aplicação das fibras naturais é bastante amplo, desde aplicações clássicas como na indústria têxtil, como reforço em matrizes poliméricas termoplásticas e termofixas e mais recentemente como materiais absorventes de metais pesados no tratamento de resíduos industriais ^[7], entre outras aplicações.

2.4.1. Vantagens e desvantagens

Aplicadas como reforço em materiais conjugados (compósitos), as fibras naturais apresentam algumas vantagens e desvantagens:

Vantagens

- São recursos provenientes de fontes renováveis;
- Em geral possuem boas propriedades mecânicas;
- Possuem baixa densidade quando comparadas com materiais similares neste campo de aplicação;
- São materiais biodegradáveis;
- apresentam baixo custo.

Desvantagens

- baixa estabilidade dimensional;
- baixa resistência biológica;

- requerem baixas temperaturas de processamento (compósitos);
- possuem incompatibilidade com termoplásticos (compósitos), devido ao caráter polar de seus principais componentes (celulose, hemicelulose, lignina) e o caráter apolar da maior parte dos polímeros termoplásticos.

Algumas propriedades para as fibras naturais de maior interesse até o momento são apresentadas na tabela abaixo, comparativamente às propriedades da fibra de vidro.

TABELA 1. Propriedades de algumas fibras naturais comparativamente à fibra de vidro ^[5,8].

Propriedade	Linho [5]	Rami [5]	Juta [5]	Sisal [5]	Curauá [8]	Vidro [5]
Densidade (g/cm ³)	1,2 - 1,4	1,5	1,45	1,4	1,40	2,5
Resistência à tração (GPa)	0,25 - 0,39	0,5	0,25 - 0,5	0,2 - 0,8	0,48	3,4 - 3,5
Módulo de Elasticidade (GPa)	12 - 26	27,2	11 - 35	9,5 - 45	-	72 - 73
Alongamento (%)	1,2 - 1,4	1,8	0,8 - 3,1	2 - 7	2,2	3,3 - 4,8
Resistência à temperatura (°C)	230	230	230	230	230	1600
Abrasividade	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Alta

2.4.2. Fibra de Curauá

O curauá (*Ananas lucidus*) é uma planta da família das bromeliáceas. Atualmente, a sua produção acontece de forma extensiva e somente para aplicações tradicionais no Estado do Pará ^[8]. Dentre as diversas fibras naturais disponíveis, a fibra de curauá apresenta um grande potencial agrícola para assumir papel relevante na economia da região em que é atualmente produzido (região do

município de Santarém – PA). Além disso, apresenta características físicas que superam concorrentes como o sisal, a juta e a malva. Face a estas características acredita-se no sucesso da aplicação desta fibra em substituição à fibra de vidro em componentes de veículos. Devido ao interesse industrial pela fibra de curauá, despertado pela indústria automobilística, espera-se um aumento gradativo de sua produção ^[8].

As principais propriedades da fibra de curauá são mostradas na tabela 2.

TABELA 2. Propriedades da fibra de curauá ^[9].

Propriedades	%
Cinzas	0,79
Solubilidade em água	1,03
Solubilidade em ciclo hexano: etanol 1:1	0,48
Celulose	70,7
Lignina	11,1
Cristalinidade	75,6

2.4.3. Fibra de Sisal

A fibra de sisal foi primeiramente produzida pelos Maias no México, antes da chegada dos europeus. A produção em escala do sisal iniciou em 1888 e rapidamente se propagou para outras regiões tropicais e subtropicais. Existem cerca de 57 espécies conhecidas até o momento. De forma geral, o Brasil, a Indonésia e os países da costa leste da África são os responsáveis pela maior parte da produção mundial de sisal. No Brasil, a produção do sisal é concentrada nos estados do nordeste ^[10]. Uma das vantagens da plantação do sisal é a prevenção da desertificação das áreas cultivadas ^[10].

Da mesma forma que a fibra de curauá, o sisal tem despertado interesse para aplicações na indústria automotiva. Este interesse é principalmente

devido a grande disponibilidade do produto no mercado, ao seu baixo custo e as suas propriedades mecânicas. A tabela 3 apresenta algumas propriedades químicas, físicas e mecânicas da fibra de sisal.

TABELA 3. Propriedades físicas, químicas e mecânicas da fibra de sisal^[11]

Propriedades	Valor
Diâmetro da fibra (μm)	100 – 300
Teor de Lignina (%)	4 – 5
Teor de Celulose (%)	85 – 88
Resistência a Tração (MPa)	400 – 700
Módulo de Elasticidade (GPa)	9 – 20
Alongamento na Ruptura (%)	5 – 14

2.4.4. Confeção de Mantas em Fibras Naturais

Com o objetivo de viabilizar a aplicação industrial das fibras naturais como reforço em compósitos, faz-se necessário processá-las de forma que a sua utilização seja similar ou idêntica àquela da fibra de vidro, ou seja, confeccionar mantas com parâmetros definidos para gramatura, densidade, espessura, comprimento de fibra, densidade de agulhagem (número de perfurações por centímetro quadrado) entre outros. Este tipo de manta é particularmente conhecida por manta não-tecida que pode ser definida como “uma lâmina manufaturada por fibras orientadas ou aleatórias unidas por meio de fricção, coesão ou adesão”^[12].

Estudos realizados com fibra de juta, onde foram confeccionadas mantas com diferentes densidades de agulhagem e composição (juta + PP), revelaram que a permeabilidade da manta ao ar diminui com o aumento da densidade de agulhagem, ao passo que ao ser adicionado polipropileno (10%, 20%) este fator aumenta com o aumento na densidade de agulhagem. Ainda de acordo com o estudo, existe uma correlação entre a permeabilidade ao ar na manta e o inverso de sua densidade^[13]. A resistência ao escoamento ao ar serve como

medida para avaliar a dificuldade que poderá ser encontrada ao impregnar a manta com uma matriz polimérica. Os efeitos de composição da manta, densidade de agulhagem, profundidade de penetração das agulhas e espessura da fibra foram analisados na produção de mantas de juta ^[14]. A adição de PP à juta tornou a manta mais resistente, tenaz e flexível. Adicionalmente, com o aumento da densidade de agulhagem e da profundidade de penetração das agulhas houve inicialmente um aumento na resistência mecânica da manta até um valor máximo ser atingido, após isto foi verificado uma contínua redução na resistência. O comprimento de 80 mm foi encontrado como o valor ideal para a confecção de mantas com fibra de juta.

Em trabalhos com agulhamento de fibra de vidro que foram realizados, o principal destaque fica a cargo da redução da importância do fator de orientação da fibra no compósito final ao ser aumentada a densidade de agulhagem, o que em outras palavras significa uma melhor distribuição do reforço na matriz polimérica com o aumento da densidade de agulhagem ^[15]. Esta melhor distribuição da fibra contribui para o caráter isotrópico do material.

Estudos feitos com a fibra de curauá referentes à confecção de mantas levaram à conclusão que o comprimento ótimo de fibra é de 60 mm ^[3]. Avaliações do efeito da densidade de agulhagem sobre a resistência mecânica da fibra foram realizadas, sendo que a densidade de 7 penetrações/cm² foi definida como ótima, por garantir um bom entrelaçamento da fibra e ao mesmo tempo preservar as propriedades mecânicas da fibra bruta de curauá.

2.5. Compósitos reforçados com fibras naturais

Este tema tem recebido muita atenção por pesquisadores e centros de pesquisa do mundo inteiro nos últimos anos, por isso muitos são os trabalhos já disponíveis na literatura sobre compósitos reforçados com fibras naturais. Uma série de fibras naturais foram estudadas com objetivo de viabilizar a sua utilização

como reforço em matrizes poliméricas termofixas e termoplásticas. Muitos fatores isolados foram analisados na tentativa de alcançar um material conjugado com excelentes propriedades físico-mecânicas e consideráveis reduções de peso e custo.

Um dos campos de aplicação de fibras naturais que tem recebido atenção ultimamente é o da construção civil. Estudos empregando fibras de sisal e coco como reforço em matriz de solo foram realizados como uma alternativa barata para construção de moradias para famílias de baixa renda no nordeste do Brasil ^[10]. Outros autores pesquisaram a viabilidade para a preparação de materiais de construção à base de matrizes biopoliméricas a partir de derivados da celulose, amido, ácido láctico entre outros; reforçados com fibras de linho, cânhamo e rami. Além do baixo peso específico, uma das vantagens citadas pelos autores é o caráter biodegradável do material e a facilidade de compostagem ao final de sua vida útil ^[16]. Compósitos a base de escória de alto forno e cimento reforçados com polpa de eucalipto, fibra de coco e sisal foram confeccionados com o objetivo de servir como material para produção de componentes para telhados ^[17]. De acordo com este estudo, a performance deste material atende às normas internacionais exigidas para esta aplicação. Os autores ressaltam ainda o fato de que este material é fabricado de maneira bastante simples e com baixo consumo de energia.

A pesquisa de compósitos reforçados com fibras naturais é uma área emergente na ciência dos polímeros. As fibras naturais são de baixo custo com baixa densidade e alta resistência específica, além de serem biodegradáveis e não abrasivas. Compósitos reforçados com fibras naturais oferecem propriedades específicas comparáveis às aquelas apresentadas por compósitos convencionais. No entanto, no desenvolvimento destes compósitos, a incompatibilidade das fibras com as matrizes e a baixa resistência à umidade geralmente reduz o potencial de aplicação das mesmas ^[18].

A utilização de fibras naturais na produção de peças automotivas foi investigada em estudos com as fibras de linho empregando-se o processo de prensagem a frio ^[19]. De acordo com estes estudos, a utilização de fibras naturais apresenta um enorme potencial de aplicação na produção de peças para interiores e exteriores de veículos. Além disso, é demonstrado que existe uma redução significativa de peso e custo das peças ^[19].

2.6. Fatores que afetam as propriedades dos compósitos

2.6.1. Tipo de reforço

Diversas fibras naturais e sintéticas já foram avaliadas em vários estudos. Dentre estas são citadas ^[20]: algodão, juta, linho, cânhamo, rami, sisal, coco, vidro (tipo E), vidro (tipo S), aramida, carbono e curauá ^[3]. Um comparativo entre as propriedades mecânicas de algumas fibras é apresentado na tabela 1.

2.6.2. Tipo de Matriz

Podemos classificar a matriz em duas diferentes categorias: a) termoplástica e b) termofixa. Dentre as matrizes termofixas mais empregadas podemos citar o poliéster insaturado e o epóxi. Dentre as matrizes termoplásticas, o polipropileno e o polietileno são os mais empregados ^[3].

2.6.3. Umidade

A absorção de umidade constitui-se em um dos maiores problemas na aplicação de fibras naturais. A difusão de água para o interior de compósitos é regida pelas leis de Fick, sendo influenciada principalmente por dois tipos de fatores ⁽²¹⁾.

- a) internos (fração volumétrica da fibra e sua orientação)
- b) externos (temperatura e umidade relativa).

A influência de fatores internos foi estudada com compósitos permeáveis (juta-epóxi) e impermeáveis (vidro-epóxi). Foi verificado que a umidade de equilíbrio e o coeficiente de difusão no compósito vidro-epóxi diminuíram com o aumento da fração de vidro e com sua orientação. Por outro lado, no compósito de juta-epóxi, estes valores aumentaram com o aumento da fração de juta, não sendo observada influência quanto à orientação da fibra. Os autores concluem ainda que quanto maior o teor de fibra no compósito maior é o nível máximo de umidade que o material pode absorver, associado à necessidade de um menor tempo de exposição a um meio úmido para atingir este nível máximo. Este comportamento, segundo o autor, é devido ao aumento da difusividade no compósito com o aumento da fração de fibra ^[21].

A influência da exposição à água sobre as propriedades físicas de compósitos de juta e linho tratados e não-tratados (tratamento alcalino) com matriz polimérica de epóxi foi estudada. De acordo com o estudo, a fibra de juta perdeu cerca de 30% de sua tenacidade após exposição à umidade ao passo que o linho não foi afetado. Devido a este comportamento, a resistência à tração de compósitos juta-epóxi diminui com o aumento da umidade absorvida. Compósitos de linho-epóxi por sua vez, apresentaram um ganho mínimo nesta propriedade quando expostos à umidade ^[22]. Tratamento de fibras naturais com anidrido maléico provoca a estereificação das mesmas, o que também se mostrou um método eficiente de proteger os compósitos com relação à absorção de umidade ^[23].

2.6.4. Tratamentos superficiais das fibras

As modificações de superfície visam melhorar basicamente a interface entre matriz e fibra, proporcionando melhores propriedades mecânicas aos compósitos e reduzindo a absorção de umidade, que representa um dos mais graves problemas dos compósitos reforçados com fibras naturais.

Muitos trabalhos foram desenvolvidos no sentido de buscar modificar as propriedades superficiais das fibras. De acordo com a literatura ^[24], a adesão entre matriz-fibra pode ser atribuída a cinco mecanismos principais que ocorrem na interface, são eles:

- a) adsorção e molhabilidade;
- b) interdifusão;
- c) atração eletrostática;
- d) ligação química;
- e) adesão mecânica.

Devido ao fato das fibras naturais serem hidrofílicas e a maioria das resinas serem hidrofóbicas, a resina possui uma grande dificuldade de molhar a superfície da fibra. Para reduzir a absorção de umidade e melhorar a molhabilidade pela matriz das fibras naturais é essencial se fazer um pré-tratamento das mesmas ^[25]. O tratamento de juta com fenol-formaldeído e melamina formaldeído reduziram apreciavelmente a absorção de umidade ^[25]; tratamento alcalino, cianoetilação e benzoilação também reduziram a absorção de umidade da juta, além de melhorar o módulo de elasticidade na tração e a sua resistência química ^[26]. A absorção de umidade pela juta também é reduzida através da deslignificação e mercerização devido à contração do diâmetro dos capilares e do aumento do ângulo de contato em relação a fibra livre de ceras. Este comportamento sugere que a absorção de umidade acontece principalmente nas regiões amorfas das fibras ^[27]. Outro efeito da

remoção da lignina e da hemicelulose na fibra de juta é a redução do módulo de elasticidade, o que mostra o papel cementador que estes componentes possuem na fibra ^[27]. Ainda com a fibra de juta, foram realizados estudos de tratamento de mantas não-tecidas, através da remoção de ceras, tratamentos alcalinos e cianoetilação. Entre estes tratamentos, os dois últimos resultaram melhoria das propriedades do compósito (matriz amida de poliéster), as quais foram justificadas pela melhora na adesão entre reforço e matriz confirmada através de microscopia por varredura eletrônica ^[28]. Por outro lado, estudos feitos com compósitos de epóxi reforçados com juta mercerizada revelaram que com relação a adesão entre matriz e reforço, a rugosidade da superfície da fibra após ser tratada com NaOH não exerce nenhuma influência sobre as propriedades ^[29]. Recentemente vêm sendo desenvolvidas novas alternativas para o tratamento de fibras naturais, de forma a não agredir o meio ambiente, como é o caso do tratamento de juta utilizando ácido peracético e peróxido de hidrogênio, cujo tratamento reduziu a perda de resistência mecânica da fibra após o tratamento, conferiu maior maciez, maior brancura e resistência à abrasão em relação aos tratamentos convencionais ^[30].

Tratamento alcalino com anilina e formação de ligações cruzadas com formaldeído foram estudados com folha de abacaxi. As fibras modificadas desenvolveram um caráter hidrofóbico apreciável, melhoraram a resistência mecânica além de apresentar uma boa resistência química ^[31]. A influência da concentração de NaOH, temperatura e tempo de mercerização foram investigados através da transição de reticulado de celulose I para celulose II em fibra de cânhamo. Foi demonstrado que através do uso de parâmetros de mercerização adequados pode-se controlar as propriedades mecânicas da fibra de cânhamo em uma grande amplitude ^[32]. A degomagem de rami utilizando culturas de *Aspergillus flavus* foi analisada, sendo observada a remoção de 58,78% e 73,12% da goma após 5 e 7 dias de tratamento sem causar deterioração na qualidade da fibra ^[33]. A

copolimerização por enxerto de metil metacrilato em fibra de coco foi analisada, sendo que foi verificado através deste tratamento um aumento nas propriedades mecânicas como: força máxima na ruptura, alongamento e módulo de elasticidade [34].

A resistência ao cisalhamento interfacial entre fibras naturais e matrizes termoplásticas foi sensivelmente melhorada através da modificação superficial das fibras, obtido pelo tratamento com silanos [35]. Além disso, os autores afirmam que os tratamentos alcalinos associados ao tratamento com silanos melhoram a molhabilidade da fibra pela resina e com isso, melhoram também as interações físico-químicas entre reforço e matriz.

A fibra de juta pode substituir a fibra de vidro em aplicações onde a peça final não é muito solicitada mecanicamente e não está exposta às intempéries. Os autores sugerem ainda a produção de compósitos utilizando como reforço fibra de vidro em conjunto com a fibra de juta [36]. Laminados de poliéster insaturado reforçados com fibras naturais, de espessuras elevadas, apresentam resistência à fadiga equivalente a um material de mesma espessura confeccionado com fibra de vidro, no entanto, em peças com espessuras menores (inferiores a 2,4mm) estes resultados não foram alcançados. Ainda de acordo com o autor, a biodeterioração de um conjugado reforçado com fibras naturais segue a cinética de uma reação de primeira ordem, salientando ainda que o seu emprego deve estar restrito a atmosferas com umidade baixa [37].

Compósitos com matriz de poliéster insaturado reforçados com fibra de vidro foram submetidos a diferentes meios agressivos tais como calor, presença de água, combustíveis e óleos lubrificantes. Foi observado um aumento em 12% nas propriedades mecânicas após o envelhecimento térmico, no entanto, em outros meios houve sensível redução nas propriedades do material [38]. O efeito da aplicação de ciclos alternados de absorção e dessorção de água foi estudado em

compósitos de juta silanizada. Os resultados mostraram que o tratamento da juta aumentou em 30% a resistência à tração, flexão e o módulo de elasticidade do compósito. A aplicação dos ciclos de absorção-dessorção de água modificou o mecanismo de fratura do material, quebrando a interface fibra-resina. Este efeito resultou em perda de propriedades mecânicas independentemente da qualidade da adesão inicial ^[39]. O tratamento da juta com silanos reduz a absorção de umidade do compósito entre 10 e 20% em relação aos compósitos laminados utilizando-se fibra não-tratada ^[40].

2.7. Resinas de Poliéster Insaturado

As resinas de poliéster insaturado, por suas características intrínsecas, constituem-se em plásticos de engenharia por excelência. Dispõe-se atualmente de quatro principais tipos de resinas: ortoftálica, isoftálica, bisfenólica e éster-vinílica. Na obtenção do polímero são usados ácidos insaturados (ácido maléico, ácido fumárico, ácido ftálico), anidridos de ácido (anidrido ftálico) e polióis (etileno glicol, propileno glicol), bem como ácidos saturados (ácido succínico). Ao serem utilizadas em processos de moldagem, as resinas de poliéster são iniciadas com peróxidos (peróxido de metil etil cetona, peróxido de benzoíla) e sendo a reação acelerada (naftenato de cobalto, octoato de cobalto) para promover a cura ou reticulação. As ligações cruzadas, que são característica das resinas termofixas são obtidas pela adição de monômero estireno em teores de no máximo até 40% ^[41].

Atualmente, estão sendo desenvolvidas novas rotas para a obtenção de poliéster insaturado à base de resíduos de PET ^[42, 43, 44] (Polietileno Tereftalato – um problema ambiental devido a sua larga aplicação em embalagens descartáveis) e dicitopentadieno ^[43]. Além disso, estudos mostraram que resinas obtidas a partir

de resíduos de PET possuem melhores propriedades mecânicas e estabilidade térmica do que as resinas de poliéster convencionais ^[43, 44].

As resinas de poliéster, quando em ambiente exposto a altas umidades, normalmente se degradam através do aparecimento de trincas devido à difusão de água através de processos osmóticos ^[45]. No entanto, estudos de modificações de superfície através de plasma se mostraram eficientes no sentido de diminuir a difusão de água através da modificação do coeficiente de difusão e dessa forma alterando a cinética de absorção ^[46].

Outro aspecto importante das resinas poliéster é relacionado a flamabilidade. Como métodos retardadores de chama para poliéster tradicionalmente foram empregados a adição de óxidos metálicos pesados e a halogenação ^[47]. Recentemente, várias tentativas estão sendo estudadas para melhorar a resistência à propagação de chama desta classe de resinas, entre elas podemos citar: a) adição de brometo de prata e óxido de antimônio ^[47]; adição de polifosfato de amônia (uma das mais simples formas de prevenção que atende as especificações determinadas para veículos de transporte) ^[48] e a adição de $ZnSnO_3$ e $ZnSn(OH)_6$ (além de agirem como retardadores de chama reduzem o desprendimento de fumaça) ^[49].

Com o objetivo de promover as ligações cruzadas durante a reticulação do poliéster insaturado, e também para reduzir a viscosidade da resina melhorando assim a facilidade de manuseio, adiciona-se estireno. A variação do teor de estireno influencia diretamente as propriedades mecânicas da resina após ser polimerizada. Testes mecânicos dinâmicos mostraram a separação de fases em resinas curadas quando é aumentado o teor de estireno. A estabilidade térmica e as propriedades mecânicas são governados pelo comportamento da mistura de fases e dessa forma podem ser controladas através da concentração de estireno ^[50].

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Delineamento experimental

Foram analisados os efeitos do tipo de fibra utilizada como reforço, o teor de reforço, o teor e a presença de carga mineral no compósito e suas interações, conforme a tabela 4.

As variáveis dependentes analisadas foram a resistência à tração, o módulo de elasticidade na tração, o alongamento na ruptura, a resistência ao impacto e ainda, a resistência à flexão.

TABELA 4. Tratamentos para a fabricação de amostras.

Tratamento	Fatores		
	Fibra	Teor de carga	Teor de Fibra
01	Curauá + Juta	Sem carga	19,71
02			29,00
03			36,69
04		10% CaCO_3	26,65
05			31,00
06		20% CaCO_3	20,82
07			26,94
08		30% CaCO_3	15,14
09			18,78
10			25,80
11	Sisal	Sem carga	16,04
12			28,05
13			39,11
14		10% CaCO_3	28,04
15			37,29
16		20% CaCO_3	29,08
17			31,22
18		30% CaCO_3	12,56
19			17,28
20			22,02
21	Vidro	Sem carga	12,83
22			23,71
23			33,72
24		30% CaCO_3	11,01
25			20,77
26			29,76

3.2 Insumos

3.2.1. Fibras utilizadas

As fibras utilizadas foram o curauá (*ananas lucidus*) proveniente da região do Largo Grande do Curuai (Estado do Pará), a juta, e o sisal, além da fibra de vidro.

As fibras utilizadas na produção de amostras foram previamente processadas para a obtenção de mantas agulhadas. O processo de agulhamento das fibras foi analisado de forma a verificar o efeito de cada operação sobre as

propriedades mecânicas das fibras. A fibra de curauá foi escolhida para esta caracterização do processo de fabricação de mantas.

As principais operações envolvidas na produção de mantas agulhadas são (vide figura 5):

- a) abertura dos fardos de fibra bruta;
- b) corte das fibras;
- c) abertura dos feixes de fibras (desfiamento);
- d) alimentação da carda;
- e) cardagem;
- f) formação de colchão de fibras;
- g) agulhamento;
- h) enrolamento e expedição.

Figura 5 – Sequência de operações na fabricação de mantas agulhadas [3].

O acompanhamento do processo foi analisado coletando-se 50 amostras de fibra de curauá após cada uma das etapas acima. As propriedades analisadas foram a força máxima na ruptura, o alongamento e o teor de umidade.

A fibra de curauá foi utilizada em conjunto com a juta devido às dificuldades encontradas pelas empresas para produzir mantas agulhadas utilizando somente a fibra de curauá. A manta destas fibras, cuja composição era 70% curauá e 30% juta, foi produzida pela Ober S.A. – Nova Odessa/SP e possuía as propriedades indicadas na tabela 2.

A fibra de sisal foi processada pela Incomar – São Paulo/SP e suas propriedades são apresentadas na tabela 5.

TABELA 5. Propriedades das mantas agulhadas empregadas nos experimentos.

Fibra	Gramatura (g/m ²)	Umidade (%) [†]	
		Média	Desvio Padrão
Curauá + Juta	320 ± 70	8,40	0,254
Sisal	450 ± 70	8,41	0,703

A fórmula empregada no cálculo da umidade das fibras foi a seguinte (base úmida):

$$TU = 100 * (PI - PF) / PI$$

sendo:

TU = Teor de Umidade da fibra (%)

PI = Peso inicial – antes da secagem (g)

PF = Peso final – após a secagem (g)

As mantas de fibras naturais foram utilizadas na produção de amostras sem serem submetidas a nenhum tratamento, como secagem por

[†] Teor de umidade para a fibra a 25°C e 75% de umidade relativa do ar. A fibra foi seca em estufa a 105°C por 5 h. O resultado apresentado representa a média de dez ensaios.

exemplo. Esta decisão foi tomada em função da tentativa de aproximar ao máximo as condições dos ensaios das condições empregadas na indústria do ramo do plástico reforçado.

A manta de fibra de vidro utilizada nos ensaios foi de Vidro tipo E, fabricada pela Vetrotex S.A., do tipo Unifilo ® e com gramatura de 450 g/m².

3.2.2. Resina

A resina utilizada foi a poliéster insaturado ortoftálica(UP) fabricada pela Elekeiroz S.A. (UCEFLEX 5007), cujas propriedades são apresentadas na tabela 6. A resina possui baixa viscosidade, média reatividade e apresenta pequena contração durante a polimerização. O aspecto visual da resina é de um líquido viscoso com coloração amarelo claro. A aplicação da resina sugerida pelo fabricante é para os processos RTM com alto teor de cargas minerais.

TABELA 6. Propriedades físicas da resina utilizada nos experimentos ^[51].

Propriedades	Unidade	Valores Típicos
Viscosidade (25°C)	CP	150 – 250
Teor de estireno	%	máx. 45
Tempo de Gel §	Min	9 – 13
Densidade (25 °C)	g/cm ³	1,07 – 1,15
Índice de Acidez	MgKOH/g	máx. 30

3.2.3. Carga Mineral

A carga mineral utilizada foi o carbonato de cálcio (CaCO₃) fabricado pela Ilcon Ltda. (Sete Lagoas – MG.). O tamanho médio de partícula é apresentado

§ Catálise para obtenção do Gel-Time: 100g de resina pura a 25°C, com 0,9% de peróxido de metiletil cetona (PMEK).

pelo fabricante como 44 μm (325 mesh). O teor de umidade da carga mineral foi determinado coletando-se 10 amostras de forma aleatória. As amostras foram pesadas em balança analítica e submetidas à secagem em estufa pelo período de 24 h à temperatura de 105°C. As amostras foram resfriadas em dessecador pelo período de 20 min e pesadas novamente. O cálculo do teor de umidade foi realizado utilizando-se a seguinte fórmula:

$$\text{TU} = 100 * (\text{PF} - \text{PI}) / \text{PI}$$

onde: TU = Teor de Umidade (%)

PI = Peso inicial (g)

PF = Peso final (g)

Os resultados obtidos mostraram que a carga mineral possuía um teor de umidade médio de 0,10 %, com desvio padrão de 0,04 %.

Toda a carga mineral utilizada na produção de amostras foi gentilmente cedida pela Tapetes São Carlos – São Carlos/SP.

3.2.4. Aceleradores

Apesar da resina utilizada já ser pré-acelerada foram utilizados dois aceleradores da reação de polimerização ou cura. A sua utilização permitiu reduzir o tempo de gel de 7 a 9 min (conforme informações do fabricante) para cerca de 2 min. Os aceleradores utilizados foram a Dimetilanilina (DMA) e o Octoato de Cobalto. Ambos foram adquiridos na Aerojet Brasileira de Fiberglass Ltda. – São Paulo/SP.

3.2.5. Iniciador

O iniciador empregado para realizar o processo de polimerização da resina foi o PMEK (Peróxido de metiletil cetona). O catalisador foi adquirido na Aerojet Brasileira de Fiberglass Ltda. – São Paulo/SP.

3.2.6. Aditivos

O único aditivo utilizado foi o BYK A-515 (BYK-Chemie). Este aditivo reduz a tensão superficial da resina permitindo que esta melhore a umectação das fibras durante a moldagem. O aditivo não influencia o processo de cura da resina. De acordo com o fabricante ^[52], o uso deste aditivo permite a adição de maior teor de cargas minerais, reduzindo-se assim o custo do produto. Além disso, um aumento na tenacidade do moldado é esperado em função da melhoria na interface fibra-resina.

3.2.7. Vêu de superfície

Nos experimentos de moldagem de peças destinadas para pintura foi utilizado um vêu de superfície para melhorar o acabamento superficial. O delineamento dos experimentos foi de acordo com o apresentado na tabela 7.

O vêu de superfície utilizado foi adquirido na Aerojet Brasileira de Fiberglass Ltda. e consiste de um vêu de poliéster termoplástico convencionalmente utilizado na indústria do plástico reforçado com fibra de vidro ^[53]. A gramatura (peso do material por unidade de área) do vêu utilizado foi de 30 g/m².

TABELA 7. Delineamento dos experimentos para produção de amostras utilizadas na avaliação de pintura.

Tratamento	Código da Amostra	Fibra	Carga Mineral	Véu superficial
01	CF0P0	Curauá + Juta	Sem Carga	Nenhum
02	CF0P3			90 g/m ²
03	CF30P0		30 % CaCO ₃	Nenhum
04	CF30P2			60 g/m ²
05	CF30P3			90g/m ²
06	SF30P0	Sisal	30% CaCO ₃	Nenhum
07	SF30P2			60 g/m ²
08	SF30P3			90 g/m ²

A inspeção visual das amostras produzidas com o véu mostrou que o material possui boa compatibilidade com a resina e com isto foi facilmente incorporado ao moldado. A função do véu de poliéster foi reduzir a porosidade superficial e conferir um melhor acabamento ao moldado.

3.2.8. Gelcoat

A aplicação de gelcoat foi realizada nas peças destinadas à pintura e subsequente avaliação de acabamento superficial (ver tabela 4). O objetivo da aplicação do gelcoat foi conferir um melhor acabamento à peça, reduzindo problemas da moldagem como a porosidade, por exemplo.

O gelcoat, previamente iniciado com PMAK à 1%, foi aplicado sobre a superfície do molde com o auxílio de um pincel. Após o gelcoat atingir o “ponto de toque”, momento no qual o gelcoat está parcialmente curado ou polimerizado, as mantas de fibra eram dispostas no molde e o procedimento descrito no item 3.4 era realizado. O tempo decorrido entre a aplicação do gelcoat no molde e a moldagem propriamente dita variou entre 8 e 12 min, dependendo da temperatura ambiente no momento dos ensaios.

O gelcoat utilizado nos ensaios foi um gelcoat cinza do tipo ortoftálico fabricado pela Cray Valley. Todas as amostras foram gentilmente cedidas pela Polifiber – São Manuel/SP.

3.2.9. Desmoldante

O desmoldante utilizado nos ensaios foi o álcool polivinílico, tradicionalmente utilizado na indústria do plástico reforçado principalmente nos processos de molde aberto.

Duas camadas de desmoldante foram aplicadas anteriormente à produção de cada amostra, com o auxílio de um tecido de algodão. A moldagem propriamente dita, somente foi realizada após a secagem completa do desmoldante, garantindo assim a formação do filme de álcool polivinílico necessário para a desmoldagem apropriada do moldado.

O desmoldante utilizado nos ensaios foi gentilmente cedido pela Polifiber – São Manuel/SP.

3.3. Equipamentos

3.3.1. Prensa hidráulica

A prensa hidráulica utilizada nos ensaios pertence à Tapetes São Carlos – São Carlos/SP e suas características são listadas na tabela 8.

TABELA 8. Características da prensa hidráulica utilizada nos ensaios.

Prensa Hidráulica	Dados
Marca	Bürkle
Modelo	HDO 50
Número	330468
Ano de Fabricação	1982
Intervalo de Trabalho	4,86 a 131,33 ton
Velocidade de fechamento	8,35 mm/s
Velocidade de abertura	4,64 mm/s
Mesa	2 m x 2 m

Todos os experimentos foram realizados nesta prensa utilizando-se os parâmetros apresentados na tabela 8 (velocidade de abertura e fechamento). O conjunto molde – prensa instalado é mostrado na figura 6.

Figura 6 – Prensa utilizada nos ensaios para a produção de amostras.

3.3.2. Peça experimental

Com o objetivo de simular uma situação normal de moldagem foi projetada uma peça com as seguintes características:

- a peça apresenta variação de espessura (3,0 e 4,0 mm);
- a peça possui um rebaixo com 4 diferentes ângulos (40°, 50°, 60° e 70°);
- apresenta uma área retangular medindo 200 mm x 200 mm com espessura de 3,0 mm, de onde foram retiradas as amostras para realização dos ensaios em laboratório (propriedades mecânicas, absorção de umidade, curvas de absorção e dessorção de umidade);
- Os raios utilizados nesta peça foram todos iguais a 0,5 mm.

As três vistas da peça experimental e uma vista espacial do modelo idealizado para os ensaios são apresentadas na figura 7.

(a)

(b)

Figura 7 – (a) Principais vistas da peça idealizada para os ensaios no processo de prensagem a frio e (b) vistas espaciais (A – peça experimental e B – modelo utilizado para rebarbar a peça após a moldagem).

3.3.3. Molde

Anteriormente à fase de construção do molde foi realizada uma busca por ferramentarias nacionais que detivessem tecnologia e experiência na construção de moldes para o processo de prensagem a frio. Em função da dificuldade em identificar uma ferramentaria que atendesse às exigências de projeto de ferramenta para o processo, como aquelas empregadas na Europa ^[5], o projeto do molde foi executado pela C.F. Maier Kunstharzwerk GmbH (Königsbronn – Alemanha).

O detalhe de fechamento do molde empregado no projeto da ferramenta é mostrado na figura 8. Neste esquema podemos identificar três pontos importantes:

- a) Linha de rebarbagem: linha onde a peça será rebarbada logo após a moldagem;
- b) Zona de restrição: esta região apresenta 1/3 da espessura nominal da peça, fazendo com que a saída do excesso de resina durante a compressão se torne mais difícil, forçando que toda a peça seja submetida a uma pressão uniforme;
- c) Região de armazenamento: Este volume destina-se ao armazenamento do excesso de resina que conseguiu fluir ao longo da zona de restrição durante a fase final de fechamento da ferramenta.

O desenho completo da ferramenta com os detalhes de projeto está no anexo I. A figura 9 ilustra ambas as faces do molde já instalado na prensa e pronto para sua utilização.

Figura 8 – Detalhe do esquema de fechamento empregado na construção do molde (A – Linha de rebarba, B – Zona de restrição ao fluxo de excesso de resina C – Região para armazenamento do excesso de resina)

Figura 9 – Detalhe de ambas as faces do molde já instalado na prensa hidráulica e pronto para o uso.

3.4. Moldagem

Entende-se por moldagem o conjunto de operações envolvidas na produção das amostras. Os parâmetros descritos abaixo foram determinados no processo de forma a garantir a reprodutibilidade de uma peça para outra. Em função da escassa literatura descrevendo o processo de prensagem a frio, todos os parâmetros utilizados foram obtidos "*in loco*" considerando-se como referência o aspecto da peça moldada e também as limitações impostas pelo sistema (velocidade mínima e máxima de abertura e fechamento, pressão máxima, entre outros).

3.4.1. Preparo da resina

A primeira etapa da moldagem consiste no preparo da resina. Entende-se como preparo da resina a adição de aceleradores, cargas e aditivos e a sua homogeneização através do uso de um agitador. A adição do catalisador ou iniciador da reação era feita somente 20 s antes da prensagem em teores variando entre 1,0 e 1,5%, dependendo da temperatura ambiente no momento da moldagem. A tabela 9 resume a composição das principais formulações empregadas nos ensaios.

TABELA 9. Composição das principais formulações empregadas na produção de amostras.

Formulação	Componente	Teor (% em peso)
Sem Carga Mineral	Resina UP	99,5
	CaCO ₃	0,00
	DMA	0,10
	Octoato de Cobalto	0,20
	BYK A-515	0,20
10 % Carga Mineral	Resina UP	89,5
	CaCO ₃	10,0
	DMA	0,10
	Octoato de Cobalto	0,20
	BYK A-515	0,20
20 % Carga Mineral	Resina UP	79,5
	CaCO ₃	20,0
	DMA	0,10
	Octoato de Cobalto	0,20
	BYK A-515	0,20
30 % Carga Mineral	Resina UP	69,5
	CaCO ₃	30,0
	DMA	0,10
	Octoato de Cobalto	0,20
	BYK A-515	0,20

3.4.2. Preparo do molde

Ambas as faces do molde foram limpas e polidas com pano de algodão antes de cada moldagem. Após a limpeza, o molde recebeu a aplicação do desmoldante. Em seguida à secagem do desmoldante, aplicou-se uma camada de cera de carnaúba e novamente poliu-se o molde utilizando um pano de algodão.

Uma vez realizadas estas operações, as mantas de fibra foram recortadas nas dimensões de 450 mm x 450 mm e dispostas na face inferior do molde. Neste ponto, o molde estava pronto para a adição da resina iniciada e para a subsequente etapa de fechamento e prensagem. As mantas foram dispostas de forma uniforme e centralizadas no molde.

Nos ensaios para avaliar o acabamento superficial, aplicou-se o gelcoat na superfície do molde e aguardou-se o início da polimerização. Em seguida os véus de poliéster foram dispostos sobre a camada de gelcoat, que por sua vez receberam as mantas de fibra como descrito no parágrafo anterior.

3.4.3. Parâmetros de processo

Os parâmetros de processo utilizados em todos os ensaios são apresentados na tabela 10. A escolha destes parâmetros foi realizada através da análise visual dos moldados observando-se principalmente os seguintes aspectos:

- a) cura da resina;
- b) grau de dificuldade durante a desmoldagem (remoção da peça moldada da ferramenta);
- c) presença de falhas como bolhas, fluxo ou orientação das fibras e porosidade superficial.

TABELA 10. Parâmetros de processo utilizado na produção das amostras.

Parâmetro	Valores
Pressão aplicada ^{''}	60 kgf/cm ²
Velocidade de fechamento	8,35 mm/s
Tempo de Cura	10 min
Temperatura ^{††}	Ambiente
Velocidade de abertura	4,64 mm/s
Tempo de mistura do iniciador	20 s

^{''} Pressão efetiva aplicada sobre a peça moldada durante todo o tempo de prensagem.

^{††} Os ensaios foram realizados no período de Agosto de 1999 a Fevereiro de 2001. A temperatura ambiente oscilou entre 20°C e 35°C.

3.4.4. Desmoldagem

O molde utilizado não possuía um sistema de extração automático, de forma que todas as peças produzidas foram removidas manualmente. Após ser removida do molde, a peça foi colocada sobre uma superfície plana de forma a evitar o empenamento. Após o resfriamento da peça as rebarbas foram retiradas com uso de limas.

3.5. Pintura e acabamento

Após a produção das amostras destinadas aos ensaios referentes ao acabamento superficial (ver tabela 7) procedeu-se o processo de pintura. O processo de pintura ao qual as amostras foram submetidas não difere daquele utilizado convencionalmente na pintura de peças produzidas com poliéster insaturado reforçado com fibra de vidro.

Inicialmente as amostras foram lixadas com lixa número 120, seguidas da aplicação de primer. Em seguida, as amostras foram novamente submetidas ao lixamento com lixas números 320, 400 e 600, nesta ordem. Após esta etapa, as amostras finalmente receberam a pintura final.

O *primer* utilizado nos ensaios foi o Polane PU de coloração cinza, código 789020, produzido pela Sumaré Tintas. O *primer* foi curado com o uso de um catalisador também produzido pela Sumaré Tintas, com o código comercial número 789913.

A tinta utilizada nos ensaios foi do tipo Esmalte Poliuretano Acrílico (Renodur - Renner) em três diferentes cores: a) Branco (código 9004); b) Azul (código 5497) e vermelho (código 1330). A cura da tinta foi obtida com a adição de catalisador S-140040097 de fabricação da Renner, na proporção 3:1 (tinta:

catalisador). O diluente utilizado foi o Renodur S-14142097 na quantidade necessária para atingir uma viscosidade entre 19 e 21 s (Copo Ford 4).

A cura, tanto do primer como da tinta, foi realizada em estufa a uma temperatura de 60°C durante o período de 30 min. A pintura foi realizada pela equipe técnica da Polifiber – São Manuel/SP.

3.6. Ensaaios

Os ensaios descritos nesta seção foram realizados sobre as amostras produzidas conforme indicado na tabela 11.

TABELA 11 – Listagem dos ensaios físico-mecânicos realizados sobre as amostras.

Ensaio	Norma	Unidade	Amostras Testadas
Resistência à Tração	ISO-527	MPa	Conf. tabela 4
Alongamento	ISO-527	%	Conf. tabela 4
Módulo de Elasticidade	ISO-527	MPa	Conf. tabela 4
Resistência à Flexão	ISO-178	MPa	Conf. tabela 4
Resistência ao Impacto	DIN-53435	KJ/m ²	Conf. tabela 4
Absorção de Umidade	ASTM D-570	%	Conf. tabela 4
Envelhecimento Artificial	DBL 5555	-	Conf. tabela 7
Câmara de Condensação	DIN 50017	-	Conf. tabela 7
Envelhecimento Térmico	DBL 5459	-	Conf. tabela 7
Absorção e Dessorção de umidade versus Resistência à Flexão	ISO-178 / ASTM D-570	-	Ver item 3.6.5

A retirada dos corpos de prova para os ensaios foi realizada de forma aleatória, visto que o material não possuía alinhamento das fibras (isotropia). Todos os resultados apresentados representam a média de 5 repetições. A área da peça experimental utilizada para a retirada dos corpos de prova é mostrada na figura 10.

Figura 10 – Região das amostras produzidas utilizada para a retirada dos corpos de prova.

3.6.1. Resistência à tração, alongamento e módulo de elasticidade

Os ensaios de resistência à tração foram realizados de acordo com a norma ISO – 527-4 (1997). O formato e as dimensões dos corpos de prova são mostrados na figura 11. A velocidade de ensaio empregada foi de 5 mm/min. Os ensaios foram realizados no CTQ – DaimlerChrysler utilizando um equipamento de ensaio universal Kratos, modelo K2000 mp.

3.6.2. Resistência à flexão

Os ensaios de resistência à flexão foram realizados seguindo o procedimento descrito na norma ISO – 178 (1993). Estes ensaios visaram a determinação da resistência à flexão dos corpos de prova apresentados na tabela 1. O formato e as dimensões dos corpos de prova são ilustrados na figura 12. A velocidade de ensaio utilizada foi de 10 mm/min. Os ensaios foram realizados no CTQ – DaimlerChrysler utilizando um equipamento de ensaio universal Kratos, modelo K2000 mp.

3.6.3. Resistência ao impacto

Os ensaios de resistência ao impacto foram realizados de acordo com as recomendações da norma DIN 53435 (Método Dynstat). As dimensões e o formato do corpo de prova são ilustrados na figura 12.

Símbolo	Descrição	Valor (mm)
L	distância inicial entre as fixações	150
L_1	comprimento total	200
L_0	distância para o extensômetro	50
b_1	largura	25
h	espessura	de 2 a 10

Figura 11 – Dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de resistência à tração ^[54].

(a)

(b)

Figura 12 – (a) Dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de resistência à flexão ^[55] e (b) Dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de resistência ao impacto ^[56].

3.6.4. Absorção de umidade

Os ensaios de absorção de umidade foram realizados de acordo com a norma ASTM D-570. Este ensaio visa determinar a taxa relativa de absorção de água dos diferentes materiais quando imersos. Os corpos de prova consistiram de discos de 50,8 mm de diâmetro e espessura de 3,2 mm. A tolerância de variação na espessura utilizada foi de $\pm 0,30$ mm. O formato e as dimensões dos corpos de prova são ilustrados na figura 13.

O condicionamento dos materiais consistiu da secagem de três corpos de prova de cada material a 50°C durante 24 h. Após isto, os mesmos foram resfriados em dessecador, pesados com precisão de 0,001 g e finalmente imersos em água destilada à temperatura de 23 °C. O ganho de massa devido a absorção de água foi acompanhado nos tempos de 2, 4, 6, 24 e 48 h após a imersão. A pesagem foi realizada numa balança analítica com precisão de 0,001g.

O cálculo do percentual de água absorvida foi realizado utilizando-se a fórmula abaixo:

$$AA\% = 100 * (P_t - P_c) / P_c$$

onde: AA = Absorção de água (%)

P_c = Peso do corpo de prova condicionado (g)

P_t = Peso do corpo de prova após t h de imersão (g)

Figura 13 – Dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de absorção de água ^[57].

3.6.5. Ciclos de absorção e dessorção de água

Os ensaios de absorção e dessorção foram realizados utilizando-se corpos de prova com formato e dimensões conforme a norma ISO – 178 (Ensaio de resistência à flexão). O objetivo dos ensaios foi a determinação da relação entre a absorção de água e a resistência à flexão para diferentes configurações de materiais.

Os corpos de prova foram submersos em água destilada, à temperatura ambiente, sendo medida a absorção pelo período de 28 dias. Em seguida, os corpos de prova foram retirados da água e deixados secar à temperatura ambiente, acompanhando-se a perda de água pelo período de 28 dias. A cada medida, tanto na absorção como na dessorção, 5 corpos de prova eram ensaiados para determinar a resistência à flexão. As medidas nos ciclos foram tomadas conforme mostra a tabela 12.

TABELA 12. Tomada de medidas nos ciclos de absorção e dessorção de água.

Ciclo de Absorção			Ciclo de dessorção		
Tempo (dias)	Umidade	Resistência à flexão	Tempo (dias)	Umidade	Resistência à flexão
0	X	X	1	X	X
1	X	X	2	X	X
2	X	X	4	X	X
4	X	X	7	X	X
7	X	X	14	X	X
14	X	X	21	X	x
21	X	X	28	X	X
28	X	X			

Os ciclos foram aplicados em amostras produzidas com fibras de curauá/juta e sisal, em formulações com e sem carga mineral com o objetivo de avaliar a influência do tipo de fibra e da presença de carga sobre a absorção de umidade e a resistência à flexão, e a interdependência entre as mesmas. O cálculo

do percentual de água absorvida para cada tempo de imersão foi realizado de acordo com o descrito no item 3.6.4.

3.6.6. Envelhecimento artificial

O envelhecimento artificial foi realizado sobre os materiais listados na tabela 7, ou seja, sobre as amostras produzidas com o objetivo de avaliar o acabamento superficial após a pintura.

O ensaio foi conduzido conforme especificado na norma DBL 5555 (norma interna do grupo DaimlerChrysler). As dimensões dos corpos de prova utilizadas foram de 130 mm x 40 mm x 4,0 mm (placas planas). O ensaio consiste em submeter os corpos de prova a ciclos onde são variadas as condições do meio. Um único ciclo consiste em:

- a) exposição do material pelo período de 102 min à uma radiação de 60 W/m^2 (fonte de luz emitindo ondas no intervalo de 300 nm a 400 nm, imitando a radiação solar) e;
- b) exposição do material pelo período de 18 min à condições úmidas (chuva artificial).

A temperatura da câmara e a umidade relativa do ar foram mantidas constantes a 36 °C e 65 %, respectivamente. O teste foi concluído após 500 h de exposição dos corpos de prova às condições acima mencionadas, perfazendo assim um total de 250 ciclos, visto que cada ciclo consiste em 120 min (102 min em condição seca e 18 min em condição úmida).

O ensaio foi realizado no Centro de Pesquisas da DaimlerChrysler (Ulm – Alemanha). O equipamento utilizado foi uma câmara de xenônio convencional (Atlas Xenotest Alpha).

3.6.7. Câmara de condensação

Este ensaio foi realizado conforme o procedimento descrito na norma DIN 50017. Os corpos de prova consistiam de placas planas cujas dimensões eram de 110 mm x 85 mm x 4,0 mm.

O teste consiste na exposição dos corpos de prova pelo período de 168 h em um ambiente controlado na temperatura de 40 °C e umidade relativa de 95 %. Nestas condições é possível verificar a condensação da água na superfície das amostras.

O equipamento utilizado nestes testes foi uma câmara de condensação H. Köhler, modelo HK 320, de propriedade da DaimlerChrysler (Ulm – Alemanha).

3.6.8. Envelhecimento térmico

Esta avaliação de desempenho do material foi realizada de acordo com a norma DBL 5459 (norma interna do grupo DaimlerChrysler). Da mesma forma dos testes na câmara de condensação, os corpos de prova consistiram em placas planas nas dimensões de 110 mm x 85 mm x 4,0 mm.

As condições de cada ciclo que os corpos de prova foram submetidos estão listadas na tabela 13. A duração total do ensaio foi de 72 h ou 3 ciclos. O equipamento utilizado para conduzir este estudo foi uma câmara térmica fabricada pela Vötsch Industrietechnik, modelo VT7010, com um intervalo de trabalho entre -50 °C e +180 °C. O estudo foi realizado no Centro de Pesquisas da DaimlerChrysler (Ulm – Alemanha).

TABELA 13. Condições de temperatura e tempo em que as amostras são submetidas durante um único ciclo de envelhecimento térmico.

Tempo de exposição (min)	Temperatura (°C)
900	105
30	23
480	-40
30	23

3.6.9. Medidas de acabamento superficial

As amostras listadas na tabela 7 foram submetidas aos testes de envelhecimento artificial, térmico e à câmara de condensação. A qualidade superficial das amostras foi analisada antes e após os testes supracitados com o objetivo de identificar dentre as amostras, quais possuíam o melhor desempenho. As propriedades analisadas foram: brilho, *haze*, *short* e *longwaviness*.

3.6.9.1. Brilho

O brilho representa a capacidade que uma superfície possui de refletir a luz incidida. Além disso, o brilho é comumente utilizado para avaliar a qualidade de um produto, especialmente no caso de produtos onde a estética é importante. Dentre estes produtos podemos citar peças automotivas, acabamento de móveis, metais, papel, etc. ^[58]

Para avaliar o brilho é necessário incidir diretamente um feixe de luz sobre a superfície conforme ilustrado na figura 14a. No caso de superfícies com alto brilho, a luz refletida na superfície segue a lei da reflexão (ângulo de incidência igual ao ângulo de reflexão). A intensidade da luz refletida depende do ângulo de incidência e das propriedades do material. Para permitir a avaliação de todos os tipos de superfície três ângulos diferentes de incidência do feixe de luz são utilizados: 20° (superfícies com alto brilho), 60° (médio brilho) e 85° (baixo brilho).

O brilho normalmente é analisado em termos de retenção percentual, ou seja, o percentual do brilho retido considerando-se os valores antes e depois de submeter uma determinada amostra a um determinado ensaio. A retenção percentual representa a capacidade que um material possui de manter o brilho quando submetido a uma análise. Desta maneira, quanto maior for a retenção percentual do brilho melhor será o comportamento do material no ensaio considerado.

Todas as medidas de brilho foram obtidas utilizando-se um ângulo de 20°, através do uso de um Micro Haze Plus (BYK-Gardener). Os valores medidos representam a média de cinco leituras obtidas em pontos aleatórios da superfície em estudo.

3.6.9.2. Neblina (*Haze*)

Neblina é normalmente definida como a capacidade de espalhamento da luz que uma superfície possui, sendo obtido pela razão entre a luz espalhada e o total de luz incidida sobre a superfície; sendo expresso em percentual ^[58]. O efeito neblina é causado principalmente por defeitos microscópicos superficiais, que fazem com que a luz incidida seja refletida em direções adjacentes à direção principal de reflexão. Este fenômeno é visualmente observado quando a superfície parece ter um alto brilho mas possui uma aparência “nublada”. Um esquema do fenômeno é representado na figura 14b.

As medidas do efeito neblina foram obtidas utilizando-se o mesmo equipamento empregado para medir o brilho (Micro Haze Plus – BYK-Gardener). Cada valor apresentado na discussão representa a média de cinco medidas obtidas em pontos aleatórios sobre a superfície em estudo.

Figura 14 – a) Esquema da técnica utilizada para avaliar o brilho de uma superfície através da incidência de um feixe de luz e a subsequente medida da luz refletida; b) Fenômeno de espalhamento da luz em uma superfície ^[54].

3.6.9.3. Ondulância (*Short-waviness e long-waviness*)

Ondulância curta e longa são medidas que ajudam a quantificar o aspecto de “casca de laranja” de uma superfície pintada. Este fenômeno é observado quando a superfície pintada é caracterizada por uma ondulação irregular, lembrando a textura de uma casca de laranja.

Com o objetivo de simular a percepção do olho humano, esta ondulação é dividida em duas categorias: ondulação longa e ondulação curta. Ao observarmos uma superfície normalmente o fazemos próximos, bem como a uma distância maior do objeto. Para simular a percepção humana a uma distância de 50 cm e 2,5 m de uma superfície, a BYK-Gardener desenvolveu um equipamento denominado *wave-scan* ^[58].

A ondulância curta e longa representa uma medida indireta da influência de fatores tais como a aspereza, fluxo das tintas ou parâmetros de processo de pintura sobre o aspecto de uma superfície pintada. Ondulância longa refere-se a estruturas na superfície maiores de 0,6 mm ao passo que ondulância curta refere-se àquela menores de 0,6 mm ^[58].

As medidas de ondulância foram obtidas utilizando-se um Wave-Scan Plus (BYK-Gardener). Cada valor apresentado na discussão é a média de cinco varreduras de 100mm realizadas aleatoriamente sobre a superfície em análise.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Processo de agulhamento de mantas não-tecidas

Este trabalho visou caracterizar o processamento das fibras naturais e avaliar o impacto de cada etapa do processo sobre as propriedades da fibra. A fibra de curauá, em função do pouco conhecimento disponível sobre esta fibra, foi escolhida para a realização deste estudo. A fabricação de mantas é uma etapa obrigatória para permitir que as fibras naturais sejam empregadas na produção de plásticos reforçados seguindo as tecnologias atuais de processamento. Os parâmetros utilizados para avaliar a qualidade da manta foram aqueles das mantas de fibra de vidro comerciais.

Os dados obtidos mostram que a resistência à tração da fibra de curauá diminui linearmente à medida que a fibra é sujeita as diferentes etapas de processamento, conforme ilustra a figura 15. De acordo com esta figura, quanto maior a densidade de agulhamento, maior é a perda de resistência da fibra. Isto acontece devido ao maior dano mecânico causado pela ação das agulhas quando a densidade de perfurações ou agulhamento é maior. Foram analisadas três diferentes densidades de agulhamento: 7, 8 e 10 agulhadas/cm². Quanto maior a

densidade, mais eficiente é o entrelaçamento entre as fibras na manta porém menor será a resistência da fibra, conforme ilustrado pela figura 15.

Uma manta agulhada com uma densidade de 7 agulhas/cm² possui uma resistência aceitável (relacionado com o grau de entrelaçamento das fibras na manta) e uma boa distribuição das fibras (homogeneamente estruturada) de forma que ela poderia ser utilizada tanto no processo de prensagem a frio bem como no processo RTM. Com esta manta seriam evitados problemas como por exemplo o arraste de fibra durante a injeção da resina. Por estas razões, esta densidade de agulhamento foi escolhida; e todos os testes de produção de mantas posteriores foram realizados utilizando-se este parâmetro.

A figura 16 mostra dados similares aos apresentados anteriormente para o alongamento da fibra, em função das etapas do processamento. De acordo com os dados obtidos, observa-se uma tendência de aumento nos valores de alongamento à medida que a fibra é processada, com exceção da última etapa em que as fibras são entrelaçadas pela ação das agulhas. Um aspecto importante que pode ser ressaltado a partir destes dados é que nenhum ganho ou perda de alongamento apreciável é verificado, devido aos danos causados na fibra durante o seu processamento.

Figura 15 - Tensão máxima na ruptura percentual em função das diferentes etapas do processamento durante a fabricação de uma manta.

Figura 16 – Alongamento da fibra na ruptura em função das diferentes etapas do processamento durante a fabricação de uma manta.

A figura 17 ilustra os resultados obtidos para a variação do teor de umidade da fibra em função das etapas de processamento. A partir desta figura, pode-se observar que nas primeiras etapas ocorre um aumento pronunciado no teor de umidade da fibra. Isto ocorre devido às características daquelas etapas onde água é adicionada ao processo para reduzir a abrasividade da fibra, que poderia causar danos aos equipamentos. À medida que a fibra é submetida às demais etapas, a água em excesso é eliminada e o teor de umidade se aproxima dos valores de equilíbrio iniciais.

A ação das agulhas durante a etapa final do processamento mostrou causar enorme dano às fibras, conforme ilustram as figuras 18 e 19. A figura 18 mostra uma fotomicrografia de uma fibra de curauá na condição prévia ao processamento (fibra bruta), sendo possível observar a coesão natural que existe entre as microfibras. A figura 19, por sua vez, foi obtida de uma fibra retirada de uma manta após o seu processamento utilizando uma densidade de agulhamento de 7 agulhadas/cm². A figura revela que a ação mecânica das agulhas provoca a abertura do feixe de microfibras que anteriormente formavam uma única fibra. Desta maneira, quando for utilizado este sistema de produção de mantas, é aconselhável o uso da menor densidade possível de agulhamento face ao evidente dano causado às fibras. Este ataque mecânico influenciará o desempenho do material reforçado, visto que a resistência de um compósito é intimamente ligada à resistência das fibras que o reforçam.

Figura 17 – Teor de umidade da fibra em função das diferentes etapas do processamento.

Figura 18 – Fotomicrografia da fibra de curauá previamente ao processamento (fibra bruta), cujo diâmetro é de aproximadamente 97 μm .

Figura 19 – Fotomicrografia da fibra de curauá após o processamento (amostra retirada de uma manta não-tecida produzida com uma densidade de agulhamento de 7 ag/cm²).

4.2. Propriedades físicas e mecânicas de compósitos reforçados

4.2.1. Teor de fibra

A produção de diferentes amostras utilizando as mantas de curauá/juta foi realizada conforme ilustra a figura 20. Nesta figura observa-se que à medida que se aumenta o número de mantas na amostra, o teor percentual de reforço aumenta proporcionalmente. O teor máximo de fibra de curauá/juta utilizado como reforço foi de 36,7%, adicionando-se 4 mantas de gramatura de 320 g/m², sem a adição de carga mineral. Valores superiores a 40% não foram utilizados visto que a umectação do reforço era seriamente comprometida durante a moldagem.

A inclusão de carga mineral no material reflete em redução no teor de fibra, conforme os resultados obtidos com as amostras produzidas utilizando-se 10, 20 e 30% de carbonato de cálcio. Esta redução é consequência do aumento da densidade das amostras em face à maior densidade do carbonato de cálcio (2,72 g/cm³)^[59] adicionado, em relação à densidade das fibras (curauá - 1,40 g/cm³) e da resina (1,12 g/cm³). A densidade das amostras produzidas sem carga mineral é de 1,23 g/cm³, ao passo que com a inclusão de 30% de carga a densidade aumenta para 1,50 g/cm³. Os valores de densidade são valores médios, obtidos conforme o procedimento descrito na norma ASTM D-792^[60].

Teores de carga mineral superiores a 30% foram testados, porém as amostras obtidas não apresentavam homogeneidade além da umectação do reforço ser comprometida.

As figuras 21 e 22 mostram resultados semelhantes obtidos com amostras reforçadas com sisal e vidro, respectivamente. As conclusões descritas para as amostras reforçadas com mantas de curauá/juta são aplicáveis para os resultados obtidos com as amostras produzidas com fibra de sisal.

Os ensaios com fibra de vidro foram realizados com o objetivo de permitir a comparação com os resultados obtidos com a moldagem empregando-se as fibras naturais como reforço. A adição de maior número de mantas de vidro é possível, diferentemente do caso das mantas de curauá/juta e sisal. A redução do teor percentual de reforço com a adição de carga mineral é menos pronunciada no caso da utilização de vidro, visto que a densidade do vidro ($2,45 \text{ g/cm}^3$) é próxima à densidade da carga utilizada.

Figura 20 – Teores de fibra em percentual sobre o peso nos ensaios com fibra de curauá/juta.

Figura 21 – Teores de fibra em percentual sobre o peso nos ensaios com fibra de sisal.

Figura 22 – Teores de fibra em percentual sobre o peso nos ensaios com fibra de vidro.

4.2.2. Resistência à tração

A figura 23 mostra a resistência à tração de compósitos reforçados com fibra de curauá/juta em diferentes teores de fibra, com e sem a adição de carga mineral na matriz polimérica. De acordo com os resultados, observa-se a tendência de aumento na resistência à tração à medida que se aumenta o teor de fibra no material. A adição de carga mineral possui um efeito positivo na resistência à tração. Esta conclusão pode ser obtida ao analisarmos as três situações ilustradas na figura em teores de fibra próximos a 20%. Nesta condição, as amostras com teor de carga de 30% possuem maior resistência, seguidas pelas amostras com 20% e sem carga mineral, nesta ordem. O valor mínimo para a resistência à tração para peças automotivas é de 30 MPa ^[61]. De acordo com os resultados, pode-se afirmar que todas as amostras reforçadas com fibra de curauá/juta com teores de fibra superiores a 25% atendem a exigência quanto à resistência à tração.

As figuras 24 e 25 mostram fotomicrografias obtidas por varredura eletrônica de amostras reforçadas com fibra de curauá/juta, sem e com a presença de carga mineral, respectivamente. Em ambos os casos, a distribuição de fibra não é uniforme e não é possível verificar a interface entre as fibras e a matriz, bem como visualizar o efeito da presença de carga.

Figura 23 – Resistência a tração de amostras reforçadas com fibra de curauá/juta em função do teor de fibra, com e sem a adição de carga mineral.

Figura 24 – Fotomicrografia de compósito reforçado com fibra de curauá, sem adição de carga mineral após ensaio de resistência a tração.

Figura 25 – Fotomicrografia de compósito reforçado com fibra de curauá, com adição de 30% de carga mineral após ensaio de resistência a tração.

A figura 26 mostra a resistência à tração para diferentes teores de fibra de sisal, com e sem a adição de carga mineral. O efeito de proporcionalidade entre o teor de fibra e a resistência à tração verificada para amostras reforçadas com curauá/juta também é evidenciada na figura. Da mesma maneira, a presença de carga possui um efeito positivo sobre a resistência à tração. Este efeito da adição de carga mineral é de certa forma apenas aparente, visto que na presença de carga a densidade do material aumenta significativamente reduzindo-se assim o teor de fibra (baseado na massa) apesar do volume da fibra ser o mesmo para uma situação sem a adição de cargas. Isto é exemplificado na seguinte situação: Ao adicionarmos 2 mantas de sisal a uma matriz sem carga mineral obteve-se um teor de fibra de aproximadamente 27%, ao passo que a adição de 2 mantas em uma matriz com 30% de carga mineral resultou em um teor de reforço de cerca de 18%. Se considerássemos o teor de reforço com base no volume de fibra adicionada ao compósito não encontraríamos esta discrepância.

As figuras 27 e 28 mostram fotomicrografias da seção transversal de amostras reforçadas com fibra de sisal após a realização do ensaio de resistência à tração, sem e com a adição de carga mineral, respectivamente. Ambas as figuras mostram que não existe uma distribuição uniforme das fibras em ambas as situações apresentadas. A figura 27 mostra que a interface entre matriz e fibra não é favorável. A presença de carga mineral ilustrada na figura 28 demonstrou possuir o efeito de melhorar a interface entre a matriz e o reforço.

Figura 26 – Resistência a tração de amostras reforçadas com fibra de sisal em função do teor de fibra, com e sem a adição de carga mineral.

Figura 27 – Fotomicrografia de compósito reforçado com fibra de sisal, sem adição de carga mineral após ensaio de resistência a tração.

Figura 28 – Fotomicrografia de compósito reforçado com fibra de sisal, com adição de 30% de carga mineral após ensaio de resistência a tração.

Os resultados de resistência à tração para amostras reforçadas com fibra de vidro são apresentados na figura 29. Os resultados também confirmam que a resistência à tração melhora à medida que o teor de reforço é aumentado, tanto na presença como na ausência de carga mineral. Exceto para as amostras com teores de reforço abaixo de 15%, todas as demais amostras atendem as especificações da indústria automobilística ^[61] (Resistência à Tração mínima de 30 MPa).

As figuras 30 e 31 mostram fotomicrografias para amostras reforçadas com fibra de vidro, sem e com a adição de carga mineral, respectivamente. De acordo com estas figuras, em ambas as situações, a interface entre a matriz e o reforço é melhor se comparada com as amostras reforçadas com fibras naturais.

Figura 29 – Resistência a tração de amostras reforçadas com fibra de vidro em função do teor de fibra, com e sem a adição de carga mineral.

Figura 30 – Fotomicrografia de compósito reforçado com fibra de vidro, sem adição de carga mineral após ensaio de resistência a tração.

Figura 31 – Fotomicrografia de compósito reforçado com fibra de vidro, com adição de 30% de carga mineral após ensaio de resistência a tração.

A figura 32 mostra a resistência à tração para amostras reforçadas com fibra de sisal, curauá/juta e vidro em diferentes teores de reforço. A figura permite comparar os valores de resistência como uma função do tipo de fibra utilizado como reforço. De acordo com os resultados, conclui-se que a utilização de fibras naturais como reforço resulta uma redução da resistência à tração se comparada com o emprego da fibra de vidro. Além disso, a figura mostra que o desempenho mecânico das amostras reforçadas com curauá/juta é melhor daquele obtido para amostras reforçadas com sisal.

Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade na tração são mostrados na figura 33, para amostras reforçadas com fibra de sisal, curauá/juta e vidro; sem a adição de carga mineral. Os resultados detalhados para cada situação são mostrados na tabela 14. De acordo com a figura 33, somente as amostras reforçadas com fibra de vidro atendem às especificações da indústria automobilística ^[61] (Módulo de Elasticidade mínimo de 6000 MPa). A figura mostra ainda que o desempenho da fibra de curauá/juta é superior à fibra de sisal, conforme os resultados obtidos para a resistência à tração.

A figura 34 mostra o alongamento na ruptura para diferentes amostras reforçadas com fibra de sisal, curauá/juta e vidro; sem a adição de carga mineral. Todas as amostras, exceto para as amostras reforçadas com fibra de sisal com cerca de 38% de reforço, atendem a especificação da indústria automotiva ^[61] (alongamento na ruptura máximo de 3,0%). Os resultados para outras condições são mostrados na tabela 14.

Figura 32 – Resistência a Tração de compósitos reforçados com fibra de sisal, curauá/juta e vidro em função do teor de fibra, sem adição de carga mineral.

Figura 33 – Módulo de Elasticidade na tração de compostos reforçados com fibra de sisal, vidro e curauá/juta; sem a adição de carga mineral.

Figura 34 – Alongamento na ruptura para amostras reforçadas com fibra de sisal, vidro e curauá/juta; sem a adição de carga mineral.

TABELA 14. Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de Resistência à Tração, Alongamento e Módulo de Elasticidade na tração para corpos de prova reforçados com fibra de sisal, curauá/juta e vidro.

Fibra de Sisal				
Teor de Carga (%)	Teor de Fibra (%)	Resist. à Tração (MPa)	Alongamento (%)	Módulo de Elasticidade (MPa)
0	16,0	18,4	1,13	4.581,7
	28,0	19,2	1,78	1.834,1
	39,1	23,7	3,26	940,1
10	28,0	24,8	1,31	3.668,4
	37,3	24,1	2,38	2.127,7
20	29,3	26,3	1,53	3.199,6
	31,2	23,5	2,58	4.082,8
30	12,6	19,6	0,52	6.750,8
	17,3	22,2	1,32	3.460,6
	22,0	24,6	1,41	3.145,5
Fibra de Curauá/Juta				
Teor de Carga (%)	Teor de Fibra (%)	Resist. à Tração (MPa)	Alongamento (%)	Módulo de Elasticidade (MPa)
0	19,7	25,6	1,12	2.925,6
	29,0	36,7	0,96	2.893,3
	36,7	36,5	1,47	2.160,2
10	26,7	41,9	2,16	4.093,5
	31,0	52,4	1,94	3.758,1
20	20,8	30,2	1,02	3.717,2
	26,9	43,0	2,38	3.664,9
30	15,1	28,3	1,17	3.693,1
	18,8	34,8	1,83	3.298,0
	25,8	38,8	2,23	4.842,0
Fibra de Vidro				
Teor de Carga (%)	Teor de Fibra (%)	Resist. à Tração (MPa)	Alongamento (%)	Módulo de Elasticidade (MPa)
0	12,8	31,8	0,57	4.925,5
	23,7	50,3	1,32	6.754,3
	33,7	86,8	1,52	7.453,9
30	11,0	27,4	0,71	4.182,0
	20,8	65,2	1,24	6.220,2
	29,8	73,7	1,13	6.927,2
DBL 5400 ^[61]		mín 30,0	máx 2,0	mín 6.000

4.2.3. Resistência à flexão

A figura 35 mostra a resistência à flexão de amostras reforçadas com fibra de sisal com e sem a adição de carga mineral. De acordo com os resultados observa-se que na ausência de carga mineral, à medida que aumenta a quantidade de reforço a resistência à flexão diminui. Por outro lado, na presença de carga mineral o efeito do teor de fibra no material é inverso, ou seja, a resistência à flexão aumenta com o aumento do teor de fibra. O fenômeno de queda na resistência à flexão com o aumento do teor de fibra na ausência de carga mineral pode ser relacionado à fraca interface entre a fibra e resina conforme pôde ser observado na figura 27. A presença de carga mineral favoreceu a interface entre fibra-matriz conforme ilustrado anteriormente na figura 28.

A figura 36 apresenta os resultados de resistência à flexão para amostras reforçadas com fibra de curauá/juta em diferentes teores, na presença e na ausência de carga mineral. Para as amostras reforçadas com fibra de curauá/juta, a resistência à flexão aumenta à medida que aumenta a quantidade de reforço adicionado ao material, independentemente da adição ou não de carga mineral. Este resultado difere significativamente daquele obtido para as amostras reforçadas com fibra de sisal, não evidenciando desta forma um efeito da carga mineral sobre a interface fibra-matriz.

Figura 35 – Resistência à Flexão para amostras reforçadas com sisal em diferentes teores de fibra, com e sem a adição de carga mineral.

Tanto para as amostras reforçadas com fibra de sisal, bem como para aquelas reforçadas com fibra de curauá/juta, o valor mínimo exigido pela indústria automobilística para resistência à flexão (mín. 80 MPa) não foi atingido ^[61]. Desta maneira, pode-se afirmar que a resistência à flexão constitui um aspecto crítico na utilização de fibras naturais para aplicações na indústria automotiva.

Diferentemente das figuras anteriores, a figura 37 mostra que a resistência à flexão para amostras reforçadas com fibra de vidro acima de 15% atende à especificação da indústria automobilística (mín. 80 MPa). Na mesma figura, observa-se que existe proporcionalidade entre a resistência à flexão e a quantidade de fibra de vidro adicionada ao material. O efeito da adição de carga mineral é positivo em todos os pontos estudados, ou seja, a resistência à flexão é maior para teores de fibra menores. Este fenômeno significa que a adição de carga mineral além de não afetar o desempenho mecânico do produto, contribui diretamente na redução do custo final do produto considerando o seu baixo custo comparado com os outros componentes presentes no material. A interface entre a fibra de vidro e a matriz é o fator decisivo para o excelente desempenho do produto, conforme ilustrado anteriormente nas figuras 30 e 31.

Figura 36 – Resistência à Flexão para amostras reforçadas com curauá/juta em diferentes teores de fibra, com e sem a adição de carga mineral.

Figura 37 – Resistência à Flexão para amostras reforçadas com vidro em diferentes teores de fibra, com e sem a adição de carga mineral.

A figura 38 mostra o resultado comparativo para a resistência à flexão de amostras reforçadas com fibra de sisal, curauá/juta e vidro, sem adição de carga mineral. A figura ilustra a superioridade da fibra de vidro em relação às fibras naturais. Entre as fibras naturais avaliadas, observa-se que a fibra de curauá/juta possui um desempenho levemente superior ao sisal.

A tabela 15 resume todos os resultados obtidos nos ensaios de resistência à flexão, para todas as amostras em todas as condições avaliadas.

Figura 38 – Resistência à Flexão para amostras reforçadas com sisal, curauá/juta e vidro em diferentes teores de fibra, sem a adição de carga mineral.

TABELA 15. Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de Resistência à Flexão para corpos de prova reforçados com fibra de sisal, curauá/juta e vidro.

Fibra de Sisal		
<i>Teor de Carga (%)</i>	<i>Teor de Fibra (%)</i>	<i>Resistência à Flexão (MPa)</i>
0	16,0	49,5
	28,0	30,2
	39,1	43,6
10	28,0	60,2
	37,3	69,6
20	29,3	61,1
	31,2	31,3
30	12,6	37,4
	17,3	51,4
	22,0	55,5
Fibra de Curauá/Juta		
<i>Teor de Carga (%)</i>	<i>Teor de Fibra (%)</i>	<i>Resistência à Flexão (MPa)</i>
0	19,7	43,2
	29,0	71,0
	36,7	78,5
10	26,7	72,8
	31,0	81,0
20	20,8	75,8
	26,9	84,5
30	15,1	60,9
	18,8	68,5
	25,8	71,2
Fibra de Vidro		
<i>Teor de Carga (%)</i>	<i>Teor de Fibra (%)</i>	<i>Resistência à Flexão (MPa)</i>
0	12,8	75,3
	23,7	106,3
	33,7	143,0
30	11,0	74,1
	20,8	114,3
	29,8	140,8
DBL 5400 (mín) ^[61]		80,0

4.2.4. Resistência ao impacto

A figura 39 apresenta os resultados dos ensaios de resistência ao impacto para as amostras reforçadas com fibra de sisal, com e sem a adição de carga mineral. Em ambos os casos ilustrados, pode-se dizer que o aumento do teor de fibra contribui no sentido de aumentar a resistência ao impacto. Em nenhuma formulação utilizando-se a fibra de sisal foi atingido o valor mínimo exigido pela indústria automobilística de 25 kJ/m^2 [61].

As figuras 40 e 41 mostram fotomicrografias das seções de amostras reforçadas com fibra de sisal após a realização do ensaio de resistência ao impacto, sem e com presença de carga mineral, respectivamente. Em ambos os casos observa-se aparentemente o efeito de arrancamento da fibra da matriz (*pull out*). Embora este fenômeno tenha ocorrido, os valores nominais de resistência ao impacto são bastante reduzidos o que indica que a interface fibra-matriz não é a ideal. Sendo assim, a energia absorvida no impacto em função do arrancamento das fibras da matriz é reduzida resultando em uma baixa resistência ao impacto. Pode-se dizer que a maior parte da energia é absorvida pela matriz.

Figura 39 – Resistência ao Impacto para amostras reforçadas com fibra de sisal em diferentes teores de fibra, com e sem a adição de carga mineral.

Figura 40 – Fotomicrografia de compósito reforçado com fibra de sisal, sem adição de carga mineral após ensaio de resistência ao impacto.

Figura 41 – Fotomicrografia de compósito reforçado com fibra de sisal, com adição de 30% de carga mineral após ensaio de resistência ao impacto.

A figura 42 mostra os resultados de resistência ao impacto para amostras reforçadas com a fibra de curauá/juta, com e sem adição de carga mineral. Da mesma forma que foi constatado nas amostras reforçadas com sisal, o aumento no teor de curauá/juta aumenta proporcionalmente a resistência ao impacto do material. A adição de carga mineral melhora a absorção de energia do material, visto que apenas uma amostra com 30% de carga mineral e cerca de 25% de fibra de curauá/juta supera o valor exigido pela norma automotiva considerada neste trabalho.

As figuras 43 e 44 mostram fotomicrografias das seções de amostras reforçadas com fibra de curauá/juta após a realização do ensaio de resistência ao impacto, sem e com presença de carga mineral, respectivamente. Da mesma forma que o ocorrido com as amostras de sisal, observa-se que houve o arrancamento da fibra da matriz. Levando em consideração que a resistência ao impacto dos compósitos reforçados com curauá/juta é superior aqueles reforçados com sisal, nas mesmas formulações da matriz e condições de processamento, pode-se afirmar qualitativamente que a interface entre o curauá e a resina UP é melhor do que entre o sisal e a mesma matriz.

Na fotomicrografia da seção da amostra cuja matriz possui 30% de carga mineral (figura 44) observa-se que houve rompimento total da matriz e uma grande abertura das fibras arrancadas. Esta observação pode ser um indicativo de que foi necessário um maior dispêndio de energia para promover a ruptura do material nesta condição, justificando a maior resistência ao impacto obtida.

Figura 42 – Resistência ao Impacto para amostras reforçadas com fibra de curuá/juta em diferentes teores de fibra, com e sem a adição de carga mineral.

Figura 43 – Fotomicrografia de compósito reforçado com fibra de curauá/juta, sem adição de carga mineral após ensaio de resistência ao impacto.

Figura 44 – Fotomicrografia de compósito reforçado com fibra de curauá/juta, com adição de 30% de carga mineral após ensaio de resistência ao impacto.

A figura 45 apresenta os resultados de resistência ao impacto para amostras reforçadas com fibra de vidro, com e sem a adição de carga mineral. De acordo com a figura, observa-se claramente a linearidade entre a propriedade mecânica em questão e o teor de vidro adicionado ao material. Além disso, os resultados mostram que a adição de carga mineral contribui positivamente no sentido de aumentar a absorção de energia do material quando submetido ao impacto. Além disso, observou-se em todos os casos estudados que a presença de carga mineral melhora sensivelmente o acabamento superficial da peça.

As figuras 46 e 47 mostram fotomicrografias das seções transversais de corpos de prova reforçados com fibra de vidro após a realização do ensaio de impacto, sem e com a adição de carga mineral, respectivamente. Estas figuras evidenciam de forma clara o fenômeno de arrancamento das fibras. Além disso, observa-se que a interface entre a fibra e a matriz é muito superior àquela observada para os casos nos quais a matriz é reforçada com as fibras naturais em estudo.

As amostras reforçadas com fibra de vidro com teores superiores a 15% atendem ao valor mínimo exigido pela indústria automobilística (25 kJ/m^2) com relação à resistência ao impacto ^[61]. Esta observação concorda com os resultados obtidos nos ensaios de resistência à flexão. No caso da resistência à tração observa-se que um teor de vidro mínimo de 20% é necessário para atingir as propriedades exigidas pela indústria automotiva. Desta forma, pode-se concluir que amostras reforçadas com fibra de vidro obtidas pelo processo de prensagem a frio com teores de fibra acima de 20% atendem às exigências mecânicas mínimas exigidas.

As figuras 48 e 49 mostram os resultados de resistência ao impacto para materiais obtidos com os três tipos de reforço em estudo, sem e com a adição

de carga mineral, respectivamente. Em ambas as condições a superioridade das amostras reforçadas com fibra de vidro é evidente. Diferentemente dos resultados apresentados anteriormente para a resistência à tração e flexão, os ensaios de resistência ao impacto não indicam a existência de diferenças significativas entre as propriedades das amostras obtidas com reforço de sisal e curauá/juta.

A tabela 16 resume todos os resultados de resistência ao impacto obtidos neste estudo. De acordo com a tabela, conclui-se que a resistência ao impacto é outra característica proibitiva para a aplicação de fibras naturais como reforço em peças automotivas de acabamento externo.

Figura 45 – Resistência ao Impacto para amostras reforçadas com fibra de vidro em diferentes teores de fibra, com e sem a adição de carga mineral.

Figura 46 – Fotomicrografia de compósito reforçado com fibra de vidro, sem adição de carga mineral após ensaio de resistência ao impacto.

Figura 47 – Fotomicrografia de compósito reforçado com fibra de vidro, com adição de 30% de carga mineral após ensaio de resistência ao impacto.

Figura 48 – Resistência ao Impacto para amostras reforçadas com sisal, curauá/juta e vidro em diferentes teores de fibra, sem a adição de carga mineral.

Figura 49 – Resistência ao Impacto para amostras reforçadas com sisal, curauá/juta e vidro em diferentes teores de fibra, com a adição de carga mineral.

TABELA 16. Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de Resistência ao Impacto para corpos de prova reforçados com fibra de sisal, curauá/juta e vidro.

Fibra de Sisal		
<i>Teor de Carga (%)</i>	<i>Teor de Fibra (%)</i>	<i>Resistência ao Impacto (kJ/m²)</i>
0	16,0	11,2
	28,0	8,9
	39,1	18,0
10	28,0	14,4
	37,3	23,6
20	29,3	28,5
	31,2	30,4
30	12,6	7,1
	17,3	14,4
	22,0	19,1
Fibra de Curauá/Juta		
<i>Teor de Carga (%)</i>	<i>Teor de Fibra (%)</i>	<i>Resistência ao Impacto (kJ/m²)</i>
0	19,7	5,9
	29,0	10,7
	36,7	13,0
10	26,7	9,5
	31,0	11,3
20	20,8	9,2
	26,9	16,1
30	15,1	7,4
	18,8	13,4
	25,8	27,1
Fibra de Vidro		
<i>Teor de Carga (%)</i>	<i>Teor de Fibra (%)</i>	<i>Resistência ao Impacto (kJ/m²)</i>
0	12,8	22,0
	23,7	37,3
	33,7	39,8
30	11,0	19,2
	20,8	34,9
	29,8	52,3
DBL 5400 (min) ^[61]		25,0

4.2.5. Absorção de Umidade

A figura 50 mostra a absorção de umidade em função do tempo para três amostras reforçadas com fibra de sisal, sem a adição de cargas minerais. A influência do teor de reforço é mostrada nestes ensaios, em que se observa que quanto maior é a quantidade de fibra no material maior é a absorção de umidade. Outra característica importante do fenômeno de absorção de umidade que pode ser observada a partir deste ensaio é relacionada com a forma da curva de absorção. Para as três situações ilustradas na figura 50 observa-se uma curva do tipo exponencial para a absorção em função do tempo. Para as três amostras testadas, não há evidência do ponto de saturação ter sido atingido após 48 h de imersão.

O efeito da adição de carga mineral sobre a absorção de umidade para as amostras reforçadas com fibra de sisal é mostrado na figura 51. A adição de cargas minerais reduz significativamente a absorção de água. De acordo com os resultados, a adição de 30% de carga mineral reduz em 68,1% a absorção de umidade nas amostras reforçadas com fibra de sisal. Esta redução é obtida também em função da diferença significativa entre as densidades das amostras com e sem carga mineral. Os valores de densidade são de $1,21 \text{ g/cm}^3$ e $1,36 \text{ g/cm}^3$, respectivamente.

Figura 50 – Absorção de umidade em função do tempo para 3 diferentes amostras reforçadas com fibra de sisal (16,0; 28,0 e 39,1% de sisal), sem adição de carga mineral.

Figura 51 – Absorção de umidade em função do tempo para amostras reforçadas com fibra de sisal, com e sem adição de carga mineral.

Os mesmos ensaios foram realizados com as amostras produzidas utilizando-se a fibra de curauá/juta como reforço. O efeito do teor de fibra sobre a absorção de água é ilustrado na figura 52, onde são apresentados os resultados para três diferentes teores de reforço com 30% de carga mineral. A absorção de água das amostras reforçadas com fibra de curauá/juta aumenta com o aumento da quantidade de fibra adicionada ao material. Ao contrário dos resultados obtidos com as amostras reforçadas com sisal, a absorção de umidade possui uma tendência linear em função do tempo de imersão. O período de imersão de 48 h não foi suficiente para mostrar o ponto de saturação do material.

A influência da carga mineral sobre a absorção de água das amostras reforçadas com curauá/juta é mostrada na figura 53. A adição de carga mineral reduz a absorção de umidade das amostras reforçadas com fibra de curauá/juta, sendo o resultado compatível com aquele obtido para as amostras reforçadas com sisal.

Figura 52 – Absorção de umidade em função do tempo para 3 diferentes amostras reforçadas com fibra de curauá/juta (15,1; 18,8 e 25,8% de curauá/juta), com adição de 30% de carga mineral.

Figura 53 – Absorção de umidade em função do tempo para amostras reforçadas com fibra de curauá/juta, com e sem adição de carga mineral.

O mesmo ensaio foi realizado para amostras reforçadas com fibra de vidro em três diferentes teores. Os resultados para estes compósitos são mostrados na figura 54. De acordo com a figura observamos o mesmo comportamento verificado para as fibras de sisal e curauá/juta, ou seja, a absorção de umidade aumenta proporcionalmente ao aumento do teor de fibra incorporado ao material. A principal diferença reside nos valores absolutos de absorção de umidade onde observa-se que para os compósitos reforçados com vidro os valores são inferiores tanto comparados aos materiais reforçados com sisal, bem como com curauá/juta.

A figura 55 mostra os resultados da absorção de umidade para compósitos reforçados com fibra de vidro, sem e com a adição de carga mineral. Os resultados mostram que os valores absolutos de absorção não variam significativamente daqueles encontrados para compósitos preparados sem a adição de carga mineral (ver figura 54). Além disso, observa-se que a adição de carga contribui no sentido de reduzir a absorção de água no material.

Figura 54 – Absorção de umidade em função do tempo para 3 diferentes amostras reforçadas com fibra de vidro (12,8; 23,7 e 33,7% de vidro), sem adição de carga mineral.

Figura 55 – Absorção de umidade em função do tempo para 2 diferentes amostras reforçadas com fibra de vidro, com e sem adição de carga mineral.

A figura 56 ilustra a absorção de umidade encontrada para amostras reforçadas com fibras naturais (sisal e curauá/juta) e vidro, com e sem a adição de carga mineral, após 48 h de imersão. As amostras produzidas sem a adição de carga mineral possuem um teor de fibra de aproximadamente 30% ao passo que aquelas produzidas com carga mineral apresentam um teor de fibra de aproximadamente 20%. Apesar desta diferença nos teores de reforço, a influência do tipo de reforço sobre a absorção de umidade nos compósitos produzidos é evidente.

De acordo com os resultados obtidos conclui-se que os compósitos reforçados com fibra de sisal apresentam uma absorção de umidade superior àquela verificada para as amostras produzidas com fibra de curauá/juta, que por sua vez apresentam uma absorção maior que os compósitos produzidos com fibra de vidro. Esta conclusão é válida tanto para as amostras produzidas sem adição quanto para aquelas produzidas com adição de carga mineral.

Figura 56 – Absorção de umidade de compósitos reforçados com fibras de sisal, juta/curauá e vidro, com e sem a adição de carga mineral após 48 h de imersão.

4.2.6. Ciclos de absorção e dessorção de água

A figura 57 ilustra as curvas de absorção e dessorção de umidade para quatro diferentes amostras:

- a) reforço de fibra de curauá/juta a 30%, sem adição de carga;
- b) reforço de fibra de curauá/juta a 30%, com adição de 20% de carga;
- c) reforço de fibra de sisal a 30%, sem adição de carga;
- d) reforço de fibra de sisal a 30%, com adição de 20% de carga.

De acordo com os resultados obtidos, observa-se que a saturação de todos as amostras ocorre a partir do sétimo dia de imersão. Os valores de absorção de umidade no ponto de saturação são mostrados na tabela 17.

TABELA 17. Valores de absorção de umidade de saturação para amostras reforçadas com fibra de sisal e curauá/juta, com e sem a adição de carga mineral. Os valores foram obtidos após 28 dias de imersão dos corpos de prova.

Amostra	Absorção de umidade (Saturação) (%)
A	7,7
B	3,0
C	20,6
D	9,6

Sendo: A – reforço de curauá, sem carga

B – reforço de curauá, com carga

D – reforço de sisal, sem carga

E – reforço de sisal, com carga

Figura 57 – Curvas de absorção e dessorção de umidade para amostras produzidas com fibra de sisal e curauá/juta, com e sem adição de 20% de carga mineral. (todas as amostras foram preparadas com aproximadamente 30% de reforço).

Ainda de acordo com os resultados, observa-se que os valores de saturação na absorção de umidade para as amostras de curauá são inferiores aos observados para as amostras reforçadas com sisal, tanto na adição de carga mineral quanto na ausência de carga mineral. O efeito da adição de carga mineral, conforme discutido anteriormente, é pronunciado na forma de reduzir a absorção de umidade. Espera-se que a incorporação de teores maiores de carga diminuam os níveis de absorção de água melhorando o desempenho dos materiais reforçados com fibra natural.

A figura 57 mostra também os dados de dessorção das amostras em estudo. Exceto para as amostras reforçadas com fibra de sisal sem adição de carga mineral, todas as demais amostras atingiram o nível inicial de umidade após 28 dias de exposição ao ar, à temperatura ambiente (cerca de 23°C). Analisando-se os dados de dessorção, observa-se que a perda de água nas amostras de sisal ocorre de forma mais rápida. Este fenômeno pode indicar que o efeito de transporte de água por capilaridade é mais pronunciado e portanto, com um coeficiente de difusão mais elevado nas amostras produzidas com sisal. Esta observação também é aplicável ao ciclo de absorção e pode ser a razão pela qual os níveis de saturação das amostras de sisal são mais elevados comparativamente às amostras de curauá/juta.

A figura 58 mostra as curvas de resistência à flexão como uma função do tempo e da absorção de umidade das mesmas amostras analisadas na figura 57. De acordo com a figura 58 e com a tabela 18 pode-se observar os seguintes pontos:

- a) a resistência à flexão inicial e final das amostras reforçadas com a fibra de curauá são superiores as amostras reforçadas com sisal;

- b) A retenção da resistência à flexão no ponto de saturação (após 28 dias de imersão) é maior para as amostras reforçadas com a fibra de curauá em comparação com as amostras reforçadas com sisal;
- c) O efeito da adição de carga é negativo. Tanto as amostras com sisal quanto as amostras com curauá apresentaram menor retenção da propriedade analisada quando produzidas com adição de carga mineral. Este resultado difere do efeito positivo obtido na absorção de umidade ilustrado na figura 57.
- d) Após a secagem das amostras há uma recuperação dos valores da resistência à flexão se comparados com os valores mínimos obtidos no ponto de saturação máxima das amostras. No entanto, os valores finais não atingem os valores iniciais conforme mostra a tabela 18. Este fenômeno sugere que se o ciclo de absorção e dessorção for repetido por mais vezes, é possível que se atinja um nível de degradação do material a tal ponto que a aplicação do material no componente ou peça desejado seja comprometida.

Figura 58 – Resistência à flexão em função do tempo e da absorção de umidade para amostras produzidas com fibra de sisal e curauá/juta, com e sem adição de 20% de carga mineral. (todas as amostras foram preparadas com aproximadamente 30% de reforço)

TABELA 18. Valores de retenção da resistência à flexão no ponto de saturação das amostras e após a secagem ao ar, para amostras reforçadas com curauá e sisal, com e sem adição de carga mineral.

Amostra	Retenção da Resist. à Flexão no ponto de saturação (%)	Retenção da Resist. à Flexão após secagem (%)
A	86,6	92,9
B	72,6	88,9
C	72,8	90,0
D	64,4	80,3

Sendo: A – reforço de curauá, sem carga

B – reforço de curauá, com carga

D – reforço de sisal, sem carga

E – reforço de sisal, com carga

4.3. Acabamento superficial de compósitos reforçados com fibras naturais

4.3.1. Câmara de condensação

Os resultados obtidos nas medidas de brilho para os ensaios na câmara de condensação (valores iniciais) e a retenção de brilho para as amostras reforçadas com fibra de curauá/juta são mostrados na figura 59. De acordo com a figura podemos observar que os valores iniciais de brilho não são afetados pela forma de construção das amostras. Esta conclusão pode ser alcançada ao compararmos os resultados obtidos para as amostras CF30P0 e CF30P3. Neste caso não há diferença significativa entre os valores iniciais de brilho nos dois diferentes tipos de construção (sem e com 3 véus de superfície, respectivamente).

Por outro lado, se compararmos os valores de retenção de brilho, é claro que a adição dos véus de poliéster termoplástico melhora a capacidade do material reter as propriedades superficiais iniciais. Nenhum efeito da presença de carga mineral foi observado.

Os mesmos resultados são apresentados para as amostras reforçadas com fibra de sisal na figura 60. A incorporação de véus de poliéster termoplástico nas amostras de sisal não teve nenhum efeito sobre o brilho inicial obtido. Por outro lado, após a submissão das amostras ao teste observa-se que a retenção de brilho é maior para as amostras nas quais foram incorporados véus de poliéster, mostrando portanto que os véus de poliéster poderiam estar melhorando levemente a qualidade superficial do material submetido à câmara de condensação.

Se compararmos os valores de retenção de brilho para amostras de curauá/juta e sisal, pode-se ver claramente que as amostras de sisal possuem uma menor resistência à absorção de umidade do que as amostras reforçadas com fibras de curauá/juta. Esta conclusão é obtida baseando-se nos baixos valores de retenção de brilho observados nas amostras reforçadas com sisal.

O efeito da absorção de umidade para as amostras reforçadas com fibra de sisal pode ser facilmente visualizado. Observou-se que as fibras de sisal afloraram na superfície após a conclusão do ensaio. Este resultado é mostrado na figura 61.

Figura 59 – Brilho inicial (antes do teste) e percentuais de retenção de brilho para amostras reforçadas com fibra de curauá.

Figura 60 – Brilho inicial e percentuais de retenção de brilho para amostras reforçadas com fibra de sisal submetidas à câmara de condensação.

Figura 61 – Fotografia de uma amostra reforçada com fibra de sisal (SF30P0) após a absorção de umidade. As regiões esbranquiçadas mostram o afloramento da fibra de sisal.

Os valores do efeito neblina (*haze*) obtidos antes e após submeter as amostras à câmara de condensação são apresentados na tabela 19 para todas as amostras testadas. De acordo com os resultados, pode-se concluir que a qualidade superficial das amostras é seriamente alterada pela absorção de umidade. Além disso, o uso de camadas de poliéster termoplástico reduz o efeito neblina porém os níveis finais não são aceitáveis para componentes externos em veículos de passeio ou comerciais. O alto índice de espalhamento de luz é uma consequência direta do afloramento das fibras na superfície.

A tabela 20 apresenta resultados similares para ondulância curta e longa (*long e shortterm waviness*). Quanto menores são os valores para estas propriedades, melhor é a qualidade superficial da amostra. Nestes dados nenhuma influência, seja ela positiva ou negativa, foi observada devido à presença de camadas de poliéster termoplástico. Os valores mínimos exigidos para estas propriedades de acordo com normas internas da DaimlerChrysler também são mostrados na tabela 20. Observa-se que mesmo previamente aos ensaios nenhuma amostra atende a todos os valores normalizados.

TABELA 19. Valores do efeito neblina (*haze*) para amostras reforçadas com fibras de curauá/juta e sisal, antes e após os testes de absorção de umidade.

Amostras	Neblina	
	Antes teste	Após teste
CF0P0	65,7	206
CF0P3	65,8	136
CF30P0	132	303
CF30P2	87,3	337
CF30P3	155	264
SF30P0	63,5	488
SF30P2	66,9	353
SF30P3	85,9	399

TABELA 20. Resultados para ondulância longa e curta (*long e shortterm waviness*) para amostras reforçadas com curauá/juta e sisal antes e após os testes de absorção de umidade.

Amostra	Ondulância Longa		Ondulância Curta	
	Antes teste	Após teste	Antes teste	Após teste
CF0P0	11,3	83,7	35,6	76
CF0P3	18,3	62,6	36,8	70,7
CF30P0	19,3	88,5	46,9	71,6
CF30P2	24,2	84,9	41,2	78,2
CF30P3	31	72,6	45,8	66,7
SF30P0	27,1	93,3	49,1	55,5
SF30P2	35,8	90,1	55,8	62,5
SF30P3	25,3	90,5	49,6	82,1
DBL [†]	20	20	30	30

4.3.2. Envelhecimento térmico

Este ensaio mostrou ser menos severo quanto às mudanças causadas na qualidade superficial das amostras do que o ensaio de absorção de umidade. A partir desta observação podemos concluir que a resistência térmica das amostras, sejam reforçadas com sisal ou curauá/juta, é melhor quando comparada com a resistência à absorção de umidade. O afloramento das fibras, que se tornou claramente visível nos ensaios na câmara de condensação, foi observado de forma menos intensa neste ensaio. Os resultados para brilho inicial e retenção de brilho para as amostras reforçadas com curauá/juta e sisal são mostrados nas figuras 62 e 63, respectivamente. Para ambos os tipos de reforço foram obtidos altos valores de retenção de brilho. Particularmente, as amostras reforçadas com curauá/juta mostraram uma melhor resistência ao envelhecimento térmico do que as amostras reforçadas com fibra de sisal. Por outro lado, a presença ou ausência de carga mineral não resultou em melhoria da qualidade dos materiais em nenhum dos

[†] Valores máximos requeridos para uma aplicação automotiva, de acordo com normas internas da DaimlerChrysler.

casos. A mesma observação pode ser considerada para a influência da presença de camadas de poliéster termoplástico na superfície das amostras. Este resultado difere daquele obtido para o ensaio de absorção de umidade, no qual a presença de camadas de poliéster na superfície melhorou levemente a qualidade superficial dos materiais em estudo.

Figura 62 - Brilho inicial e percentuais de retenção de brilho para amostras reforçadas com fibra de curauá/juta submetidas ao envelhecimento térmico.

Figura 63 - Brilho inicial e percentuais de retenção de brilho para amostras reforçadas com fibra de sisal submetidas ao envelhecimento térmico.

As tabelas 21 e 22 resumem os valores do efeito neblina (*haze*), ondulância curta e longa (*short e longterm waviness*) para as amostras reforçadas com fibra de curauá/juta e sisal; antes e após o envelhecimento térmico. Novamente conclui-se que as amostras possuem uma melhor resistência ao envelhecimento térmico do que à absorção de umidade. Esta conclusão pode ser claramente percebida se os valores das propriedades após os dois diferentes tipos de ensaio forem comparados. Este resultado é também uma consequência direta do menor grau de afloramento de fibras observado neste ensaio, diminuindo a capacidade de espalhamento da luz da superfície refletido em menores valores do efeito neblina (*haze*). O aspecto de casca de laranja das amostras também é menor neste ensaio do que no ensaio de absorção de umidade; os resultados no entanto ainda não são aceitáveis para aplicações externas em veículos (nenhuma amostra atendeu aos valores mínimos de ondulância requeridos pela norma após serem submetidas ao envelhecimento térmico).

TABELA 21. Valores do efeito neblina (*haze*) para amostras reforçadas com fibras de curauá/juta e sisal, antes e após o ensaio de envelhecimento térmico

Amostras	Neblina	
	Antes teste	Após teste
CF0P0	49	98,8
CF0P3	56,6	85,5
CF30P0	192	193
CF30P2	168	254
CF30P3	156	156
SF30P0	59,4	198
SF30P2	83,4	206
SF30P3	98,9	153

TABELA 22. Resultados para ondulância longa e curta (*long e shortterm waviness*) para amostras reforçadas com curauá/juta e sisal antes e após o ensaio de envelhecimento térmico.

Amostra	Ondulância Longa		Ondulância Curta	
	Antes teste	Após teste	Antes teste	Após teste
CF0P0	18,9	48,9	34,4	50,8
CF0P3	20,3	46,1	39,8	54,4
CF30P0	13,5	43,9	44,2	59,7
CF30P2	37,9	71,3	45,5	56
CF30P3	25,8	39	49,8	57,2
SF30P0	25,1	74	38,4	61,8
SF30P2	32	70,5	62,2	67,6
SF30P3	21,8	64	38,9	66,6
DBL [†]	20	20	30	30

4.3.3. Envelhecimento artificial

Os valores de brilho inicial e de retenção de brilho para as amostras reforçadas com fibra de curauá são mostrados na figura 64. De acordo com a figura não é possível verificar a influência da ausência e presença de carga mineral sobre a retenção de brilho para todas as amostras. Por outro lado, a figura mostra que a presença de camadas de poliéster termoplástico contribui negativamente com relação à performance do material quando este é submetido ao envelhecimento térmico. De forma geral, os valores de retenção de brilho encontrados são superiores àqueles obtidos nos ensaios de absorção de umidade, mostrando que este ensaio possui efeitos similares sobre a qualidade superficial das amostras ao ensaio de envelhecimento térmico.

[†] Valores máximos requeridos para uma aplicação automotiva, de acordo com normas internas da DaimlerChrysler.

Figura 64 - Brilho inicial e percentuais de retenção de brilho para amostras reforçadas com fibra de curauá/juta submetidas ao envelhecimento artificial.

Os mesmos resultados discutidos acima são apresentados para as amostras reforçadas com fibra de sisal na figura 65. A retenção de brilho para as amostras reforçadas com sisal situou-se em uma posição intermediária se comparada aos resultados obtidos nos ensaios de absorção de umidade e envelhecimento térmico. De acordo com a figura conclui-se também que a presença de camadas de poliéster não possui nenhum efeito sobre a performance do material.

As tabelas 23 e 24 mostram os resultados do efeito neblina (*haze*), ondulância curta e longa (*short e longterm waviness*), respectivamente, para as amostras reforçadas com fibra de curauá/juta e sisal. Novamente, observou-se um elevado aumento nos valores do efeito neblina para ambos os tipos de amostras (reforçadas com curauá/juta e sisal). As amostras reforçadas com sisal, por sua vez, mostraram um maior aumento nos valores do efeito neblina quando comparadas com as amostras de curauá/juta. Este efeito foi observado nos três diferentes ensaios realizados e acredita-se ser devido à diferente estrutura morfológica entre as fibras. O sisal possui um diâmetro que varia de 100 a 460 μm ao passo que o curauá possui um diâmetro que varia entre 110 e 150 μm ^[8]. Este alto intervalo de variação do diâmetro das fibras de sisal resulta uma distribuição mais pobre do sisal durante o processo de preparação das mantas. A má distribuição da fibra aliada ao alto intervalo de variação do diâmetro (100 – 460 μm) podem ser as razões pelas quais as amostras reforçadas com a fibra de sisal apresentam uma performance inferior às amostras reforçadas com fibra de curauá/juta (maior uniformidade na distribuição das fibras e menor diâmetro das fibras).

Figura 65 - Brilho inicial e percentuais de retenção de brilho para amostras reforçadas com fibra de sisal submetidas ao envelhecimento artificial.

TABELA 23. Valores do efeito neblina (*haze*) para amostras reforçadas com fibras de curauá/juta e sisal, antes e após o ensaio de envelhecimento artificial.

Amostras	Neblina	
	Antes teste	Após teste
CF0P0	53,6	66,2
CF0P3	42,7	78,6
CF30P0	82,2	130
CF30P2	91,7	199
CF30P3	128	249
SF30P0	46,4	239
SF30P2	60,1	106
SF30P3	31,9	165

TABELA 24. Resultados para ondulância longa e curta (*long e shortterm waviness*) para amostras reforçadas com curauá/juta e sisal antes e após o ensaio de envelhecimento artificial.

Amostra	Ondulância Longa		Ondulância Curta	
	Antes teste	Após teste	Antes teste	Após teste
CF0P0	8,2	26,4	34,9	44,1
CF0P3	11,8	17,2	32,6	38,4
CF30P0	15	37,6	47	57,5
CF30P2	31,9	36,2	38,3	42,2
CF30P3	25,7	44,9	37,6	53,2
SF30P0	32,7	72	42,1	69,1
SF30P2	14,9	35,6	36,4	50,6
SF30P3	22,2	48,5	33,4	65,3
DBL [§]	20	20	30	30

Os resultados para ondulância em todas as amostras não mostraram nenhuma tendência ou efeito. Este resultado concorda com as demais propriedades superficiais analisadas no ensaio de envelhecimento térmico, ou seja, o efeito da presença de camadas de poliéster termoplástico e carga mineral não pôde ser

[§] Valores máximos requeridos para uma aplicação automotiva, de acordo com normas internas da DaimlerChrysler.

detectado. As amostras reforçadas com fibra de curauá/juta mostraram uma melhor performance perante o envelhecimento artificial, porém nenhuma composição atende às exigências da indústria automobilística.

A figura 67 mostra algumas amostras reforçadas com sisal e curauá/juta usadas com “espelhos” para refletir uma lâmpada fluorescente. Todas as amostras foram fotografadas refletindo a luz à mesma distância. Nesta figura é claramente visível a melhor performance das amostras reforçadas com curauá/juta quando comparadas com as amostras reforçadas com sisal. A figura 67(e) mostra o efeito drástico da absorção de umidade sobre uma amostra reforçada com sisal (a imagem refletida é pobre e as fibras são visíveis na superfície). As fotos confirmam também a maior severidade do ensaio de absorção de umidade sobre amostras reforçadas com fibras naturais, entre os três diferentes testes analisados.

Figura 66 – Fotografias de amostras reforçadas com curauá/juta e sisal utilizadas como “espelhos” para refletir a luz de uma lâmpada fluorescente antes e após os ensaios. (a, b ,c) CF30P0 e (d, e ,f) SF30P0 após envelhecimento térmico, absorção de umidade e envelhecimento artificial, respectivamente.

4.3.4. Resumo dos resultados

Com o objetivo de analisar todos os resultados dos ensaios e medidas de qualidade superficial, cada resultado foi classificado em um intervalo entre -2 a +2 de acordo com o critério apresentado na tabela 25.

A aplicação deste critério resultou em um ranking entre as amostras, conforme mostrado na tabela 26. De acordo com os resultados da classificação, pode-se concluir que todas as composições possuem uma melhor performance quando submetidas ao envelhecimento térmico comparativamente aos ensaios de envelhecimento artificial e absorção de umidade. Na verdade, os resultados para todas as propriedades analisadas mostram que o fator crítico para a aplicação de compósitos reforçados com fibras naturais na indústria automobilística reside na sua baixa resistência à absorção de umidade. Este problema é consequência da hidrofília das fibras naturais e do efeito de capilaridade observados nos compósitos reforçados com estas fibras.

Tabela 25. Critério de classificação para retenção de brilho, aumento do efeito neblina (*haze*) e intervalos de ondulância curta e longa (*short e longterm waviness*).

Pontuação	Retenção de Brilho (%)	Aumento do efeito neblina (%)	Ondulância Longa	Ondulância Curta
++	100-90	0-10	0 to 20	0 to 30
+	90-80	10-20	20 – 30	30 – 40
0	80-70	20-30	30 – 40	40 - 50
-	70-50	30-50	40 – 50	50 -60
--	50 ou menor	50 ou maior	50 to 100	60 to 100

Tabela 26. Desempenho das diferentes amostras em todos os ensaios para todas as propriedades superficiais analisadas.

Amostras	CF0 P0	CF0 P3	CF30 P0	CF30 P2	CF30 P3	SF30 P0	SF30 P2	SF30 P3
1. Retenção de brilho								
Env. Térmico	++	++	++	+	++	+	+	++
Env. Artificial	+	+	++	0	0	-	+	0
Câmara de condensação	0	0	-	0	0	+	0	0
2. Aumento do efeito neblina (<i>haze</i>)								
Env. Térmico	--	-	++	-	++	--	--	-
Env. Artificial	0	--	--	--	--	--	--	--
Câmara de condensação	--	--	--	--	--	--	--	--
3. Ondulância Longa (<i>long waviness</i>)								
<i>Média antes do teste</i>	++	++	++	0	+	+	+	+
Env. Térmico	-	-	-	--	0	--	--	--
Env. Artificial	+	++	0	0	-	--	0	-
Câmara de condensação	--	--	--	--	--	--	--	--
4. Ondulância Curta (<i>short waviness</i>)								
<i>Média antes do teste</i>	+	+	0	0	0	0	-	+
Env. Térmico	0	-	-	-	-	-	--	--
Env. Artificial	0	+	-	0	-	--	-	--
Câmara de condensação	--	--	--	--	--	--	-	--
Classificação	-5	-5	-6	-11	-7	-16	-12	-14

Entre as amostras avaliadas, a somatória das contribuições de cada propriedade em cada ensaio realizado mostra que os compósitos reforçados com fibra de sisal possuem a menor resistência geral se comparados com os compósitos reforçados com curauá/juta. O mesmo critério de classificação mostra que compósitos reforçados com curauá/juta sem cargas minerais possuem o melhor desempenho entre todas as amostras analisadas. No entanto, se cada

parcela da somatória for analisada torna-se evidente que apesar de terem um melhor desempenho os compósitos reforçados com curauá/juta também são deficientes em vários pontos.

A classificação mostra que os resultados divergem daqueles esperados para compósitos reforçados com fibra de vidro. Esperava-se que a adição de camadas de poliéster termoplástico e carga mineral melhorasse o desempenho e a qualidade superficial das amostras. Além disso, esperava-se que a resistência das amostras aos testes realizados fosse superior.

5. CONCLUSÕES

As conclusões deste trabalho seguem a seguir para cada um dos itens analisados. Cabe salientar que as conclusões são válidas para os parâmetros utilizados no trabalho e portanto não são definitivas.

5.1. Produção de mantas não-tecidas

A densidade de agulhamento de 7 agulhadas/cm² é adequada para a produção de mantas de fibra de curauá. Mantas produzidas nesta condição possuem uma boa resistência e homogeneidade que permitem a sua aplicação como reforço em matrizes poliméricas nos processos de Prensagem a Frio e RTM.

O teor de umidade da fibra não difere significativamente se comparados os valores obtidos antes e após o processamento. Isto significa que as mesmas condições de armazenamento da fibra bruta podem ser utilizadas para o armazenamento de rolos de manta agulhada.

5.2. Propriedades mecânicas

Analisando-se os resultados obtidos na resistência à tração, conclui-se que a utilização de fibras naturais como reforço resulta uma redução da resistência à

tração se comparada com o emprego da fibra de vidro. Além disso, os resultados mostram que o desempenho mecânico das amostras reforçadas com curauá/juta é melhor daquele obtido para amostras reforçadas com sisal. Apesar do melhor desempenho da fibra de curauá, a sua utilização em peças automotivas externas é somente possível para teores de fibra acima de 28,0%.

Com relação à resistência a flexão, as mesmas conclusões obtidas analisando-se a resistência à tração são válidas, ou seja, a fibra de curauá apresenta uma melhor performance como reforço porém a sua utilização é possível somente em teores acima de 28,0%.

A resistência ao impacto das amostras reforçadas com fibras naturais é significativamente inferior daquelas reforçadas com fibra de vidro. Não foram detectadas diferenças significativas para a resistência ao impacto entre amostras reforçadas com fibra de sisal e curauá. Analisando-se a resistência ao impacto, conclui-se o uso de compósitos reforçados com fibra de sisal e curauá são proibitivos para aplicações externas.

5.3. Ciclos de absorção e dessorção de água

A saturação dos compósitos ocorre após 7 dias de imersão em água destilada a 23°C. Os valores de saturação na absorção de água para as amostras reforçadas com fibra de curauá equivalem a aproximadamente um terço da absorção das amostras reforçadas com fibra de sisal, com adição de 30% de carga mineral. A adição de carga mineral nas amostras, tanto reforçadas com sisal como com curauá, diminui o valor de saturação das amostras.

A dessorção da água ocorre mais rapidamente nas amostras reforçadas com sisal, o que permite concluir que o coeficiente de difusão da água nestas amostras é mais elevado.

A resistência à flexão das amostras reforçadas com curauá cai 13,4% ao atingir o ponto de saturação de umidade, ao passo que as amostras reforçadas com sisal retêm apenas 72,8% da resistência inicial (queda de 27,2%); para amostras sem adição de carga mineral.

Após a secagem, a retenção final da resistência à flexão é de apenas 92,9% para amostras obtidas com fibra de curauá. No caso do sisal, a retenção é ainda menor (90,0%). Por meio destes resultados conclui-se que a umidade possui um efeito degenerativo dos compósitos reforçados e que a absorção e dessorção cíclica de água pode levar os compósitos a uma total degradação mecânica.

5.4. Qualidade superficial

A qualidade superficial das amostras reforçadas com fibra de sisal e curauá/juta não atende às exigências de uma aplicação externa na indústria automobilística. O campo de aplicação destes materiais é portanto restrito aos casos nos quais as peças não são expostas à ação da umidade e do calor, como peças para acabamento interno, por exemplo. Outra aplicação na qual compósitos reforçados com fibras naturais podem atender às exigências refere-se às aplicações cuja pintura é estrutural ou texturizada. Neste caso, a superfície é áspera e as propriedades superficiais analisadas neste trabalho não possuem importância.

O uso de camadas de poliéster termoplástico na superfície das amostras reforçadas com fibras naturais melhora levemente a qualidade superficial após a submissão dos materiais à absorção de umidade e envelhecimento térmico. Este efeito no entanto não é observado quando as amostras são submetidas ao envelhecimento artificial.

A presença de carga mineral não apresenta nenhum efeito importante sobre a qualidade superficial das amostras se comparada com os resultados obtidos para amostras sem carga mineral.

Se aplicações externas na indústria automobilística são desejadas para compósitos reforçados com fibras naturais, atenção especial deve ser dada a novas tecnologias de melhoria de acabamento superficial.

Os resultados mostram que a tecnologia da fibra de vidro no processo de prensagem a frio não pode ser diretamente transferida para a produção de componentes reforçados com fibras naturais. É necessário compreender os mecanismos de interação entre as fibras naturais e a matriz bem como a influência da incorporação de aditivos na formulação da matriz sobre o comportamento do material. Uma vez que estes mecanismos estejam compreendidos será possível desenvolver um novo processo ou método que permita a utilização de fibras naturais como reforço em componentes automotivos externos.

ANEXO I

PROJETO DE MOLDE PARA O PROCESSO DE PRENSAGEM A FRIO

27.05.91	
2118	1.02.8
Mercedes-Benz	
Molde de Prensagem	

							22.06.99			
Aenderungsindex / Planquadrat / Aenderungsbeschreibung State of revision / grid square / Revision text				CAD	ZGS	Auftrags-Nr. Order no.		Bearb./Auth. Datum/Date	Pruef./Check Datum/Date	Norm/Stand. Datum/Date
Gesetzesrel. Normen/Stand. relevant to law				Werkstoff (Endzustand)/Material (final condition)						
				CAD		ZGS		ED-KB		
Format		Massstab/Scale				Auftrags-Nr./Order no.				
A0		1:2						Datum/Date		Name
Referenz-Nr./Reference No.		Gewicht/Weight(kg)		Oberflaechenschutz/Surf. protection DBL		Bearb./Author		22.06.99		Humaita/Mam
				Farbe/Color		Pruef./Check				
Allgemeintoleranzen/General tolerances				Dekor/Decoration		MBN 31 030		Norm/Stand.		
				Oberflaechenangaben/Surface texture		MBN 31 007		Abtlg./Dept.		
				Oberflaeche/Surface (m ²)						
				Benennung/Title						
System				Molde de Prensagem						
CATIA				Mercedes-Benz		Sach-Nr./Basic number				Blatt/Sheet
V4 R2.0										

BEI AUSWAERTSBEZUG: Lieferung nur nach Zeichnung und/oder CAD Daten sowie erprobtem, freigegebenem Muster. Keinerlei Aenderung ohne vorherige Freigabe durch die mit Aenderungsvermerk der DaimlerChrysler AG versehene(n) Zeichnung/CAD Daten. / WHEN PROCURED FROM EXTERNAL SOURCES: delivery only in accordance with drawing and/or CAD data, and tested and approved sample. No change without advance approval by the drawing/CAD data identified with the modification note by DaimlerChrysler AG.

VERTRAULICH! ALLE RECHTE VORBEHALTEN. Weitergabe oder Vervielfaeltigung ohne vorherige schriftl. Zustimmung der DaimlerChrysler AG verboten. / CONFIDENTIAL! ALL RIGHTS RESERVED. Distribution or copies without written agreement by DaimlerChrysler AG prohibited.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASKELAND, D.R. *The Science and Engineering of Materials*. Boston, PWS Publishing Company, 1994.
2. KIA, H.G. *Sheet Molding Compounds: Science and Technology*. Michigan, Hanser, 1993.
3. DAIMLERCHRYSLER DO BRASIL LTDA. *Estudo da Viabilidade Técnico-Econômica para Utilização de Fibras Naturais como Reforço em Compósitos de Poliéster Insaturado e Epóxi*. São Bernardo do Campo, 1998.
4. KARANDIKAR, H.M., MISTREE, F. Tailoring Composite Materials Through Optimal Selection of their Constituents, *Journal of Mechanical Design*, v.114 p.451-458, 1992.
5. BÜNEKER, M. *Informações Pessoais e Relatórios Técnicos*. Mercedes-Benz do Brasil Ltda. São Bernardo do Campo, 1998.
6. GENERAL MOTORS. GM's SMC Technology, http://207.37.252.232/corpcor/00news/smc/layout_print.pdf, 2001.
7. EROMOSELE, I.C.; BAYERO, S.S. Adsorption of chromium and zinc ions from aqueous solutions by cellulosic graft copolymers. *Bioresource Technology*, v.71:(3) p.279-281, 2000.
8. BEHRENS, D. *Curauá-Faser – eine Pflanzenfaser als Konstruktionswerkstoff?*. Aufl. 1, Berlin, Verlag Köster, 1999.
9. CARASCHI, J.C.; LEÃO, A.L. Mechanical Properties of Curauá Fiber Reinforced Polypropylene Composites, *Proceedings of the Third International Symposium on Natural Polymers and Fibers - Brazil 2000*, Embrapa - São Carlos, 2000.

10. GHAVAMI, K.; FILHO, R.D.T.; BARBOSA, N.P. Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. *Cement & Concrete Composites*, v.21:(1) p.39-48, 1999.
11. KURUVILLA, J. et al. Influence of interfacial adhesion on the mechanical properties and fracture behavior of short sisal fibre reinforced polymer composites. *Eur. Polym. J.*, v.32, n.10, p.1243-1250, 1996.
12. MEMIS A.; HARPER J.F. Textile composites from hydro-entangled non-woven fabrics. *Computers and Structures*, v.76, p.105-114, 2000.
13. SENGUPTA, S.; SAMAJPATI, S.; GANGULY, P.K. Air permeability of jute based needle-punched nonwoven fabrics. *Indian Journal Of Fibre & Textile Research*, v.24:(2), p.103-110, 1999.
14. GANGULY, P.K.; SENGUPTA, S.; SAMAJPATI, S. Mechanical behaviour of jute and polypropylene blended needle-punched fabric. *Indian Journal Of Fibre & Textile Research*, v.24:(1), p.34-40, 1999.
15. KANG, T.J.; LEE, S.H. Characterization of reinforcing web structures in needle punched nonwoven composites. *Journal Of Composite Materials*, v.33:(22) p.2116-2132, 1999.
16. HERRMANN, A.S.; NICKEL, J.; RIEDEL, U. Construction materials based upon biologically renewable resources - from components to finished parts. *Polymer Degradation and Stability*, v.59:(1-3), p.251-261, 1998.
17. SAVASTANO, H.; AGOPYAN, V.; NOLASCO, A.M.; PIMENTEL, L. Plant fibre reinforced cement components for roofing. *Construction And Building Materials*, v.13:(8), p.433-438, 1999.
18. SAHEB, D.N.; JOG J.P. Natural fiber polymer composites: A review. *Advances In Polymer Technology*, v.18:(4), p. 351-363, 1999.
19. SCHLÖSSER, T.; KNOTHE, J. Vehicle Parts Reinforced with Natural Fibers, *Kunststoffe Plast Europe*, v.87, n. 9, p.1148-1152, 1997.
20. BLEDZKI, A.K.; GASSAN, J. Composites Reinforced with Cellulose Based Fibres. *Prog. Polym. Sci.*, v.24, p.221-274, 1999.
21. RAO, R.M.V.G.K et al. Factors Affecting Moisture Absorption in Polymer Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v.3, 1984.
22. GASSAN, J.; BLEDZKI, A.K. On the behaviour of jute and flax fibre epoxy composites with alkali-treated fibres after exposure to water. *Angewandte Makromolekulare Chemie*, v.268, p.22-28, 1999.
23. MISHRA, S.; NAIK, J.B. Studies on swelling behavior of wood-polymer composites based on agro-waste and HDPE in steam and water at ambient temperature. *Polymer-Plastics Technology And Engineering*, v.38:(5), p.1051-1058, 1999.

24. SITEPU, M. The Study of Composite Reinforced with Natural Fibres. *Front. Polym. Adv. Mater. Aproc. Int. Conf.*, 1994.
25. MITRA, B.C.; BASAK, R.K.; SARKAR, M. Studies on jute-reinforced composites, its limitations, and some solutions through chemical modifications of fibers. *Journal Of Applied Polymer Science*, v.67:(6), p.1093-1100, 1998.
26. SAMAL, R.K.; MOHANTY, M.; PANDA, B.B.; ROUT, S.K. Chemical modification of jute 1. Effect of alkali treatment, cyanoethylation, acetylation and benzylation on FTIR spectra and physico-chemical behaviour of jute. *Indian Journal Of Fibre & Textile Research*, v.22:(3), p.195-201, 1997.
27. MANNAN, K.M.; TALUKDER, M.A.I. Characterization of raw, delignified and bleached jute fibres by study of absorption of moisture and some mechanical properties. *Polymer*, v.38:(10), p.2493-2500, 1997.
28. MOHANTY, A.K.; KHAN, M.A.; HINRICHSSEN, G. Influence of chemical surface modification on the properties of biodegradable jute fabrics - polyester amide composites. *Composites Part A-Applied Science And Manufacturing*, v.31:(2), p.143-150, 2000.
29. GASSAN, J.; BLEDZKI, A.K. Possibilities for improving the mechanical properties of jute epoxy composites by alkali treatment of fibres. *Composites Science And Technology*, v.59:(9), p.1303-1309, 1999.
30. CHATTOPADHYAY, D.P.; SHARMA, J.K.; CHAVAN, R.B. Sequential bleaching of jute with eco-friendly peracetic acid and hydrogen peroxide. *Indian Journal Of Fibre & Textile Research*, v.24:(2), p.120-125, 1999.
31. SAMAL, R.K.; RAY, M.C. Effect of chemical modification on FTIR-spectra and physicochemical behaviour of pineapple bead fiber (PALF). *Journal Of Polymer Materials*, v.14:(2), p.183-188, 1997.
32. FINK, H.P.; WALENTA, E.; KUNZE, J. The structure of natural cellulosic fibres - Part 2. The supermolecular structure of bast fibres and their changes by mercerization as revealed by X-ray diffraction and C-13-NMR-spectroscopy. *Papier*, v.53:(9), p.534-542, 1999.
33. ROY, S.; SARMAH, R.; SARKAR, C.R. Fungal degumming of ramie and its fibre characteristics. *Indian Journal Of Fibre & Textile Research*, v.23:(4), p.281-284, 1998.
34. ROUT, J.; MISRA, M.; MOHANTY, A.K. Surface modification of coir fibers I: Studies on graft copolymerization of methyl methacrylate on to chemically modified coir fibers. *Polymers For Advanced Technologies*, v.10:(6), p.336-344, 1999.
35. VALADEZ-GONZALEZ, A.; CERVANTES, U.J.M.; OLAYO, R.; HERRERA-FRANCO, P.J. Effect of fiber surface treatment on the fiber-matrix bond strength

- of natural fiber reinforced composites. *Composites Part B-Engineering*, v.30:(3), p.309-320, 1999.
36. PAL, P.K. Jute Reinforced Plastics: a Low Cost Composite Material. *Plastics and Rubber Processing and Applications*, Vol. 4, 1983.
 37. BELMARES, H. New Composite Materials from Natural Hard Fibers, *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev.*, v.22, p.643-652, 1983.
 38. SIDDARAMAIAH, SURESH S.V.; ATUL V.B.; SRINIVAS D.; GIRISH S. Effect of aggressive environments on composite properties. *Journal Of Applied Polymer Science*, v.73:(5), p.795-799, 1999.
 39. GASSAN, J.; BLEDZKI, A.K. Effect of cyclic moisture absorption desorption on the mechanical properties of silanized jute-epoxy composites. *Polymer Composites*, v.20:(4), p.604-611, 1999.
 40. GASSAN J.; BLEDZKI A.K. Effect of moisture content on the properties of silanized jute-epoxy composites. *Polymer Composites*, v.18:(2), p.179-184, 1997.
 41. GRISON, E.C. *Poliéster Insaturado*, Santa Maria, 1.ed. Editora UFSM, 1987.
 42. MATYNIA, T.; GAWDZIK, B.; ANDRACHIEWICZ, M.; GADACZOWSKI S.; PAZGAN A. Application of unsaturated polyester resin from waste PET to the production of resin mine charges. *Przemysl Chemiczny*, v.78:(8), p.303, 1999.
 43. PENCZEK, P.; BONCZA-TOMASZEWSKI, Z. Unsaturated polyester resins on the verge of the 21st century. *Polimery*, v.44:(11-12), p.709-715, 1999.
 44. TARNAWSKI, W.; MOTAK, A. Unsaturated polyester resins at the ERG Polymer Works Pustkow SA (promotion paper). *Polimery*, v.44: (11-12), p.777-779, 1999.
 45. GAUTIER L.; MORTAIGNE B.; BELLENGER V.; VERDU J. Osmotic cracking nucleation in hydrothermal-aged polyester matrix. *Polymer*, v.41:(7), p.2481-2490, 2000.
 46. MARAIS, S. et al. Surface modification by low-pressure glow discharge plasma of an unsaturated polyester resin: effect on water diffusivity and permeability. *Surface & Coatings Technology*, v.122:(2-3), p.247-259, 1999.
 47. GALIP, H.; HASIPOGLU, H.; GUNDUZ, G. Flame-retardant polyester, *Journal Of Applied Polymer Science*, v.74:(12), p.2906-2910, 1999.
 48. HOROLD, S.; WALZ, R. Fire protection for gelcoats and laminates - Use of ammonium polyphosphate synergist blends. *Kunststoffe-Plast Europe*, v.89:(8), p.102, 1999.

49. KICKO-WALCZAK E. New ecological polyester resins with reduced flammability and smoke evolution capacity. *Journal Of Applied Polymer Science*, v.74:(2), p.379-382, 1999.
50. SANCHEZ, E.M.S.; ZAVAGLIA, C.A.C.; FELISBERTI, M.I. Unsaturated polyester resins: influence of the styrene concentration on the miscibility and mechanical properties. *Polymer*, v.41:(2), p.765-769, 2000.
51. ELEKEIROZ S.A. *Boletim Técnico Resina Poliéster UCEFLEX UC 5007*. São Paulo, 2000.
52. SANTOS, F.C. *Comunicação pessoal*. BYK-Chemie S.A, São Paulo, 2001.
53. BICUDO, J. *Comunicação pessoal*. Polifiber Ltda, São Manuel, 2001.
54. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO-527-4 - *Plastics – Determination of Tensile Properties*. s.l., 1997.
55. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO-178 - *Plastics – Determination of Flexural Properties*, s.l., 1993.
56. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 53 435 - *Ensaio de Flexão e ensaio de flexão por impacto em corpos de prova dynstat*, s.l., 1983.
57. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D-570 - *Standard test method for water absorption of Plastics*. s.l., 1998.
58. BYK-GARDENER GmbH. *Literatura Técnica*. www.bykgardener.com, 2002.
59. UNESP. *Banco de Dados de Carbonatos*. <http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/carbonatos/calcita.html>, 2002.
60. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D-792 - *Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement*. Philadelphia, 2000.
61. DAIMLER-BENZ AG. *DBL 5400 - Liefervorschrift Teile aus glasfaserverstärkten Duroplast-Kunststoffen*. Stuttgart, 1997.