

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
COORDENADORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATERIAIS

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE
FABRICAÇÃO DE MANTAS HÍBRIDAS DE
FIBRAS CURTAS DE VIDRO E SISAL EM
COMPÓSITOS POLIMÉRICOS**

CRISTIANE AURELIA BORGES VIEIRA

CAXIAS DO SUL

2008

DADOS INTERNACIONAIS DE CATOLOGAÇÃO NA
PUBLICAÇÃO

CRISTIANE AURELIA BORGES VIEIRA

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE FABRICAÇÃO DE
MANTAS HÍBRIDAS DE FIBRAS CURTAS DE VIDRO E
SISAL EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado
em Materiais da Universidade de Caxias do Sul,
visando à obtenção do grau de Mestre em Ciência e
Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Ademir José Zattera

Co-orientador: Prof. Dr. Sandro Campos Amico
(UFRGS)

Caxias do Sul
2008

BANCA EXAMINADORA

TRABALHOS APRESENTADOS

CBECIMAT 2006

16° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais
Foz do Iguaçu, PR, Brasil. 15 a 19 de Novembro de 2006.

Título: Influência do comprimento da fibra de sisal e do seu tratamento químico nas propriedades de compósitos com poliéster.

Autores: Clarissa Coussirat Angrizani, Cristiane Aurelia Borges Vieira, Ademir José Zattera, Estevão Freire, Ruth Marlene Campomanes Santana, Sandro Campos Amico.

CBPOL 2007

9° Congresso Brasileiro de Polímeros
Campina Grande, PB, Brasil. 5 a 11 de Outubro de 2007.

Título: Influência do tipo de fibra nas propriedades de compósitos processados por moldagem por transferência de resina.

Autores: Ricardo Soares, Cristiane Aurelia Borges Vieira, Estevão Freire, Sandro Campos Amico, Ademir José Zattera.

CBPOL 2007

9° Congresso Brasileiro de Polímeros
Campina Grande, PB, Brasil. 5 a 11 de Outubro de 2007.

Título: Avaliação das propriedades de compósitos utilizando resíduos de fibreglass.

Autores: Marília Verônica Molin Tonela, Daniel Casiraghi, Estevão Freire, Cristiane Aurelia Borges Vieira, Mara Zeni, Ademir José Zattera.

CARBONO 2007

Congresso Brasileiro de Carbono
Gramado, RS, Brasil. 18 a 22 de Novembro de 2007.

Título: Influência da composição e do método de fabricação do reforço nas propriedades de compósitos híbridos poliéster/sisal/vidro.

Autores: Cristiane Aurelia Borges Vieira, Estevão Freire, Sandro Campos Amico, Ademir José Zattera

TRABALHOS APRESENTADOS (CONTINUAÇÃO)

PPS 2008

24° Encontro anual – Polymer Processing Society
Salerno, Italia. 15 a 19 de Junho de 2008.

Título: Evaluation of alternative methods for the fabrication of hybrid fiber mats for polymer composites.

Autores: Cristiane Aurelia Borges Vieira, Estevão Freire, Sandro Campos Amico, Ademir José Zattera.

CBECIMAT 2008

17° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais
Porto de Galinhas, Pb, Brasil. 24 a 28 de Novembro de 2008.

Título: Avaliação de processos de fabricação de mantas híbridas de fibras de vidro e sisal em compósitos de resina poliéster.

Autores: Cristiane Aurelia Borges Vieira, Estevão Freire, Sandro Campos Amico, Ademir José Zattera.

ARTIGO SUBMETIDO PARA PUBLICAÇÃO

REVISTA IBEROAMERICANA DE POLÍMEROS

Universidad del País Vasco. Bilbao, Espanha.
ISSN 1988-4206

Título: Interferência da lavagem de fibras sobre o desempenho do sizing nas propriedades mecânicas em compósitos híbridos vidro/sisal.

Autores: Cristiane Aurelia Borges Vieira, Estevão Freire, Sandro Campos Amico, Ademir José Zattera.

DEDICATÓRIA

Aos meus queridos:
“paizinho” Homero e “mãezinha” Sirlei,
pois mesmo não sabendo indicar os rumos a seguir,
sempre apoiaram e confiaram nas minhas escolhas.

Aos manos:
“Tino”, “Tê” e “Kika”,
por contribuírem,
cada um à sua forma,
na construção da pessoa quem sou.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Ademir José Zattera pela sua orientação neste e em “alguns” outros trabalhos. Também pelo seu espírito empreendedor e por propiciar liberdade de ações, o que possibilitou a aquisição e desenvolvimento de recursos necessários para este trabalho.

Ao professor Dr. Sandro Campos Amico, pela orientação, interesse e troca de conhecimentos que foram preciosos para o entendimento de partes deste estudo.

À CAPES, em especial ao PROCAD, pelo projeto Compósitos e Nanocompósitos Poliméricos Moldados por Transferência de Resina o qual tive vinculada minha Bolsa de Mestrado.

Ao técnico Júlio Alves Souza (Departamento de Física-UCS), pois sem sua rápida e prestativa ajuda na construção dos dispositivos seria improvável a realização deste trabalho. Aos técnicos do Laboratório de Polímeros (UCS): Damiani Büdke pelo cuidado despendido às minhas amostras nos ensaios mecânicos e Jorge Gomes Ferreira pelo auxílio.

À Cesar Aguzzoli e sua família pelo incentivo inicial deste trabalho e nos anos anteriores de graduação.

Pelo apoio, eficiência e amizade das bolsistas Clarissa Coussirat Angrizani (UFRGS) e Graciele de Britto (UCS). À estagiária e amiga Silvia Simone dos Santos Soares, pela ajuda.

Também pela amizade e colaboração dos mestrandos: Heitor Ornaghi Júnior, pela troca de conhecimentos; e Samuel Brando Susin pela ajuda na construção dos dispositivos.

Em especial, à Vínícios Pistor, pelo auxílio ao trabalho e carinho.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

CO₂ - Dióxido de carbono

FGRP - Polímero reforçado por fibra de vidro

EDS - Espectroscopia de energia dispersiva de raios X

LDPE - Polietileno de baixa densidade

NaOH - Hidróxido de sódio

P-MEK - Peróxido de metil-etil-cetona

PVC - Poli(cloreto de vinila)

RTM - Moldagem por transferência de resina

SEM - Microscopia eletrônica de varredura

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	xI
LISTA DE FIGURAS	xii
RESUMO	xvi
ABSTRACT	xvii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Aspectos Gerais	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo Geral	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Justificativa	3
1.4 Contribuição Científica e Tecnológica	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Introdução a Compósitos	6
2.2 Matrizes Poliméricas para Compósitos com Fibras	8
2.4 Reforços Fibrosos	9
2.4.1 Fibra de Vidro	12
2.4.2 Sisal	13
2.4.3 Mantas	16
2.5 Compósitos com Fibras Vegetais	18
2.6 Compósitos Híbridos	20
3 MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1 Materiais	22
3.2 Equipamentos	24
3.3 Estimativa da Massa de Reforço e Volume de Resina	27
3.4 Métodos de Confecção de Mantas	28
3.4.1 Método de Deposição Manual de Fibras	30
3.4.2 Método de Deposição de Fibras em Fase Líquida	31
3.4.3 Método de Arranjo de Fibras por Leito Fluidizado - Ar	33
3.4.4 Método de Deposição de Fibras em Meio Vibracional	34
3.6 Rota de Ensaios Preliminar	35
3.6 Rota de Experimentos 1 – Parte 1	39
3.7 Rota de Experimentos 1 – Parte 2	41
3.8 Rota de Experimentos 2	43
3.9 Ensaios Físicos de Caracterização	44
3.10 Ensaios Mecânicos	46

3.10 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1 Rota de Experimentos Preliminares.....	48
4.2.1 Propriedades Físicas.....	48
4.2.2 Propriedades Mecânicas.....	53
4.2.4 Considerações Gerais.....	58
4.3 Rota de Experimentos 1 – Parte 1	61
4.3.1 Propriedades Físicas.....	61
4.3.2 Propriedades Mecânicas.....	65
4.4 Rota de Experimentos 1 – Parte 2	72
4.4.1 Propriedades Mecânicas.....	73
4.5 Rota de Experimentos 2.....	78
4.5.1 Propriedades Mecânicas.....	80
4.5.2 Avaliação via Distribuição de Massa Específica.....	83
5 CONCLUSÕES.....	85
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Métodos de confecção de mantas.....	29
Tabela 3.2	Amostras para a rota de experimentos preliminares.....	36
Tabela 3.3	Amostras para a rota de experimentos 1 (parte 1).....	40
Tabela 3.4	Amostras para a rota de experimentos 1 (parte 2)	43
Tabela 3.5	Amostras para a rota de experimentos 2	44
Tabela 4.1	Valores de absorção de água para fibras de sisal e para compósitos reforçados com fibra de sisal de diferentes tamanhos (1, 3 e 5 cm) e tratamentos (<i>in natura</i> , solução alcalina e água destilada)	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Estrutura química da resina poliéster ortoftálica.....	09
Figura 2.2	Estrutura química da resina poliéster isoftálica.....	09
Figura 2.3	Proposta de classificação hierárquica de compósitos sintéticos e naturais.....	10
Figura 2.4	Lâminas com reforço tipo (a) unidirecional, (b) tecido bidirecional, (c) fibras picadas (manta de fibras curtas) e (d) manta contínua, submetidas a esforços de tração uniaxial longitudinal	11
Figura 3.1	Fios de sisal (a) e filamentos de fibra de vidro (b), em tamanho natural.....	23
Figura 3.2	Molde 1 para compressão.....	26
Figura 3.3	Projeto do molde 2 para compressão.....	26
Figura 3.4	Processo de produção de mantas por deposição manual (Métodos Manual e Manual-lav).....	30
Figura 3.5	Pré-mistura e manta híbrida produzida pelo Método Manual.....	31
Figura 3.6	Cuba de vidro e tela de contenção de reforço para o processo por deposição em meio líquido: (a) projeto (b) manta obtida pelo Método Etanol.....	32
Figura 3.7	Processo de deposição de fibras em fase líquida: (a) fase aquosa (b) fase etílica.....	32
Figura 3.8	Equipamento para a produção de mantas por leito fluidizado com ar (Método Leito-Ar): (a) equipamento e ventilador centrífugo (b) fibras aeradas na tela de contenção superior.....	33
Figura 3.9	Aspecto superior do equipamento, mostrando os estágios de orientação e as fibras.....	34
Figura 3.10	Dispositivo para o método de deposição de fibras em meio vibracional (Método Vibracional)	35

Figura 3.11	Processo de secagem das fibras naturais.....	37
Figura 3.12	Diagrama da localização das amostras extraídas em uma placa de compósito de dimensões de 17 x 17 cm.....	45
Figura 4.1	Massa específica de compósitos com fibras de sisal sem tratamento (S/T), tratadas com solução alcalina (NaOH) e com água destilada (H ₂ O), todos para o Método Manual.....	49
Figura 4.2	Teor de vazios de compósitos com fibras de sisal sem tratamento (S/T), tratadas com solução alcalina (NaOH) e com água destilada (H ₂ O), todos para o Método Manual.....	50
Figura 4.3	Absorção de água em compósitos com fibras de sisal sem tratamento (S/T), tratadas com NaOH ou com água destilada (H ₂ O).....	51
Figura 4.4	Micrografia da fibra de sisal <i>in natura</i> (x 400).....	52
Figura 4.5	Resistência à tração de compósitos com fibras sem tratamento, tratadas com água destilada e com solução alcalina.....	54
Figura 4.6	Alongamento na ruptura em compósitos com fibras de sisal sem tratamento, tratadas com água destilada e com solução alcalina.....	54
Figura 4.7	Micrografia da fibra de sisal lavada com água destilada (x 150)	55
Figura 4.8	Micrografia da fibra de sisal com tratamento de solução de NaOH (x 200).....	55
Figura 4.9	Módulo elástico em compósitos com fibras de sisal sem tratamento, tratadas com água destilada e com solução alcalina.....	57
Figura 4.10	Resistência ao impacto em compósitos com fibras de sisal sem tratamento, tratadas com água destilada e com solução alcalina.....	58
Figura 4.11	Massa específica dos compósitos em função do teor de fibra de vidro na manta, considerando os três métodos de fabricação de reforço.....	62
Figura 4.12	Absorção de água em função do teor de fibra de vidro, considerando os três métodos de fabricação de reforço.....	63
Figura 4.13	Micrografia das fibras de vidro comercial, antes da lavagem.....	64

Figura 4.14	Micrografia das fibras de vidro lavadas com água destilada.....	64
Figura 4.15	Curvas de tensão em função da deformação específica dos compósitos para diversos teores de fibra de vidro (Método Manual).....	66
Figura 4.16	Curvas de tensão em função da deformação específica dos compósitos para diversos teores de fibra de vidro (método A) – deformação de 0,002 mm/mm.....	66
Figura 4.17	Resistência à tração em função do teor de fibra de vidro na manta, considerando os três métodos de fabricação de reforço.....	67
Figura 4.18	Manta (50% vidro / 50% sisal) produzida pelo Método Água (a) vista superior (b) vista lateral.....	68
Figura 4.19	Manta (50% vidro / 50% sisal) produzida pelo método Manual e Manual-lav (a) vista superior (b) vista lateral.....	68
Figura 4.20	Micrografia da seção transversal de compósito fraturado contendo 75% de fibra de vidro no reforço (x 100).....	69
Figura 4.21	Módulo elástico em tração em função do teor de fibra de vidro, considerando os três métodos de fabricação de reforço.....	70
Figura 4.22	Resistência ao impacto em função do teor de fibra de vidro na manta, considerando os três métodos de fabricação de reforço.....	71
Figura 4.23	Manta produzida pelo Método Leito-ar: (a) vista lateral e (b) vista superior.....	74
Figura 4.24	Manta produzida pelo Método Vibracional: (a) vista lateral e (b) vista superior.....	74
Figura 4.25	Resistência à tração dos compósitos como função da composição e do método de preparação da manta.....	75
Figura 4.26	Módulo elástico dos compósitos como função da composição e do método de preparação da manta.....	76

Figura 4.27	Resistência ao impacto nos compósitos como função da composição e do método de preparação da manta.....	77
Figura 4.28	Fibras de vidro após imersão em: (a) água destilada e (b) etanol comercial.....	79
Figura 4.29	Manta produzida pelo Método Etanol: (a) vista lateral e (b) vista superior.....	79
Figura 4.30	Resistência a tração nos compósitos em função do método de preparação da manta (rota 2).....	80
Figura 4.31	Módulo de tração nos compósitos em função do método de preparação da manta (rota 2).....	81
Figura 4.32	Resistência ao impacto nos compósitos em função do método de preparação da manta (rota 2)	82
Figura 4.33	Distribuição de massa específica para compósitos de fibra de vidro e sisal utilizando mantas obtidas por cada método: (a) Manual, (b) Água, (c) Etanol, (d) Leito-ar e (e) Vibracional.....	84

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo desenvolver e avaliar métodos de confecção de mantas híbridas de fibras curtas de vidro e sisal visando as necessidades da indústria automotiva na produção de componentes com menor custo e menor massa específica. Neste trabalho foram moldados por compressão compósitos de resina poliéster reforçados por mantas (25% em volume) de fibra de vidro/sisal, híbridas e isoladas. Foram desenvolvidos quatro métodos de confecção de mantas: Manual (disposição manual de fibras), Água (disposição de fibras em fase aquosa), Leito-ar (arranjo de fibras via leito fluidizado) e Vibracional (deposição de fibras em meio vibracional). De modo a comparar condições foram utilizados mais dois métodos variantes: Manual-lav (deposição manual de fibras – fibra de vidro lavada) e Etanol (deposição de fibras em fase etílica). O trabalho foi dividido em rotas de ensaios onde inicialmente utilizou-se apenas a fibra de sisal de modo a obter comprimento e tratamento ideais para esta fibra. Nas demais rotas variou-se o teor de fibra de vidro incorporada (0, 25, 50, 75 e 100% e seu complemento em sisal) até a escolha de uma composição. Os compósitos produzidos pelos diferentes métodos foram avaliados através de análises de propriedades físicas (massa específica, absorção de umidade e teor de vazios) e propriedades mecânicas (resistência à tração, módulo de elasticidade e resistência ao impacto). A morfologia dos compósitos foi analisada via SEM (microscopia eletrônica de varredura). Os resultados indicaram o tratamento de água destilada para as fibras de sisal e um comprimento ideal de fibra de 3 cm. Mostraram também que a água destilada e o etanol afetam a superfície da fibra de vidro podendo remover partículas e substâncias. Compósitos com teor de 50% de fibra de vidro demonstraram propriedades mecânicas superiores as dos compósitos reforçados apenas com sisal puro, porém com menor custo e massa específica que os compósitos contendo 100% de fibra de vidro. A análise dos diferentes métodos demonstrou que os métodos Manual e Leito-ar produziram compósitos com melhores propriedades mecânicas. Contudo, método Leito-ar é o mais indicado para futuras aplicações industriais.

Palavras-chaves: compósitos híbridos, mantas, métodos de confecção de mantas, fibra de vidro, fibra de sisal, resina poliéster.

ABSTRACT

This work is focused at development and evaluation of confection methods of short fibers hybrid mants aiming attend the necessities of automobile industry in the production of small parts with smaller cost and specific weight. Were developed different methods in the confection of hybrids mants from short fibers: manual deposition of the fibers, watery phase deposition of the fibers, fibers arrangement by stream bed fluidized and deposition of the fibers by vibrational method. The analysis of the methods was provided by evaluation of the processed composites. The first part of the work consisted in the appraising of hybrid composites with 0, 25, 50, 75 e 100% of fiber glass and the remained in sisal. The analysis of the results showed, for 50% content, higher mechanical properties comparing to the composites reforced only with sisal, however with lower cost and specific weight than composites with 100% of fiber glass. The composites maded by different methods were estimated in relation to physical properties (specific weight, water absorption and void content) and mechanical properties (tensile strength, elasticity modulus and impact resistance). The morfology of the composites was analyzed by SEM (scanning electronic microscopy). The results showed that the 3 cm length is ideal for the procedure utilized. The sisal fibers washed in distilled water had shown, in general, superior performance than fibers in natura or chemically treated. It was noted that the increasing of fiber glass in the hybrids composites results in the strengthening of the mechanical properties of the composites, however the sisal increment in the composition reduced the specific weight of the final product. The analysis of the diferent methods showed that the manual deposition of the fibers and fibers arrangement by stream bed fluidized were the methods that manufactured composites with the best mechanical properties. The method of deposition by stream bed fluidized can be applied in the confection of hybrids mants with short fibers for different types of naturals and synthetic fibers and your implementation is easy and of low cost using the compressed air installation existing in industry.

Keywords: hybrids composites, mants, methods of mants confection, fiber glass, sisal fiber, polyester.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Aspectos Gerais

O primeiro material compósito conhecido na história humana foi a argila reforçada por galhos de árvores, usada em construções feitas pelos antigos egípcios, há 3000 anos. De fato, este material era um exemplo de compósito natural de reforço fibroso. Contudo, com o desenvolvimento da humanidade e o avanço tecnológico, materiais com melhor performance, sejam metais, plásticos ou cerâmicas, contendo fibras sintéticas, foram intensivamente usados e desenvolvidos pelo homem, diminuindo o interesse pelos compósitos de fibras naturais ⁽¹⁾.

Recentemente, o uso de compósitos de fibras naturais começou a ganhar popularidade em aplicações de engenharia. Propriedades como baixa densidade e custo atrativo ⁽²⁾, além do fato destas advirem de fontes renováveis e serem biodegradáveis, são os aspectos mais importantes na escolha destes materiais como reforço.

Desta forma, diversas matérias-primas de origem vegetal vêm sendo utilizadas na indústria em substituição às fibras de vidro, às poliméricas, de amianto entre outras. Um dos principais usos de fibras naturais em compósitos é

na produção de componentes sem função estrutural, tal como peças do interior ou do acabamento de automóveis ⁽³⁾. Fibras de curauá, sisal, juta, rami, entre outras, são mencionadas nestes tipos de aplicação ^(4,5).

Devido a limitação do uso de compósitos de fibras naturais em funções estruturais, a presente dissertação tem a finalidade de desenvolver métodos para obter mantas híbridas a partir de fibras curtas de vidro e sisal. A avaliação das mantas híbridas desenvolvidas será realizada através da análise do desempenho e caracterização dos compósitos processados.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver método descontínuo de fabricação de mantas híbridas de fibras curtas de sisal e vidro e avaliar o desempenho destas mantas através das propriedades dos compósitos produzidos em matriz poliéster.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Caracterização das fibras de vidro e sisal via MEV (microscopia eletrônica de varredura);
- b) Determinar dimensão e tratamento das fibras de vidro e sisal;

- c) Determinar metodologia de preparo das mantas híbridas;
- d) Analisar valores de teores de fibra de vidro e sisal, em matrizes de poliéster, através de ensaios mecânicos dos compósitos;
- e) Desenvolver diferentes métodos de fabricação de mantas híbridas:
 - 1. Deposição manual de fibras (Métodos Manual e Manual-lav);
 - 2. Deposição de fibras em fase líquida (Métodos Água e Etanol);
 - 3. Arranjo de fibras por leiteo fluidizado (Método Leiteo-ar);
 - 4. Deposição de fibras em meio vibracional (Método Vibracional);
- f) Avaliar os métodos de produção de mantas a partir do desempenho mecânico dos compósitos;
- g) Avaliar os métodos de produção de mantas através da homogeneidade e distribuição das fibras na manta/compósito.

1.3 Justificativa

A possibilidade de mistura de reforços (compósitos híbridos) é vantajosa, pois permite projetar mantas específicas com desempenho mecânico de acordo com as necessidades do produto. Os benefícios da substituição, mesmo que parcial, de fibras sintéticas por naturais são econômicos, sociais, mas principalmente ecológicos. A fibra vegetal, além de abundante em regiões carentes do Brasil, é reciclável termicamente, biodegradável e menos densa que as fibras de vidro ⁽⁶⁾, fato que pode significar uma redução no consumo de combustível em aplicações de transporte terrestre devido a redução de massa dos veículos. Brosius ⁽⁴⁾ também cita propriedades isolantes térmicas e acústicas,

e do balanço consumo-produção de dióxido de carbono (CO₂) das fibras vegetais. Ou seja, as fibras naturais quando incineradas retornam à atmosfera o CO₂ em quantidade semelhante ao CO₂ consumido em seu crescimento, e assim, este processo não contribui para o aquecimento global. Ainda, compósitos com fibras vegetais apresentam boas propriedades mecânicas pontuais, como a resistência à flexão e a deformação por compressão ⁽⁷⁾.

Entretanto, observa-se na literatura procedimentos de fabricação de mantas híbridas basicamente manuais. Igualmente, estudam-se compósitos fabricados pela combinação de lâminas de mantas de materiais distintos, fato que origina problemas como a delaminação. Há poucos estudos que evidenciem metodologias para a confecção de mantas híbridas, únicas, a base de fibra de vidro e fibras vegetais.

Enquadra-se aqui a problemática deste trabalho: a escassez de metodologias alternativas e adequadas para a confecção de mantas de fibras curtas naturais e híbridas e a avaliação das mantas produzidas por diferentes métodos.

1.4 Contribuição Científica e Tecnológica

As atividades a serem realizadas nesta dissertação contribuirão científica e tecnologicamente através do desenvolvimento de diversos métodos de fabricação de mantas de fibras híbridas curtas (fibras vegetais e sintéticas) e a avaliação do seu desempenho através das propriedades mecânicas e caracterização de seus compósitos. As mantas obtidas pelos diferentes métodos tem como função obter

compósitos mais leves, com menor custo e com propriedades tecnologicamente interessantes para aplicação na indústria automotiva. Em contrapartida, a substituição parcial da fibra de vidro é vinculada à valorização de materiais como as fibras vegetais. O estudo também tem o intuito de gerar e integrar conhecimento e tecnologia, nesta área, com outras linhas de pesquisa no Brasil.

A região da serra gaúcha, onde se situa a cidade e a Universidade de Caxias do Sul, congrega mais de 3.000 empresas que atuam no setor de componentes metálicos e poliméricos para a indústria automotiva, altamente consumidora de compósitos reforçados com fibra de vidro. Observa-se, aqui, o potencial de aplicação de um novo material a ser explorado nesta região, com ampliação da tecnologia deste setor especificamente no ramo de novos materiais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução a Compósitos

O termo compósito tem como significado um material formado de uma fase dispersa e uma fase dispersante. As propriedades do compósito levam consigo uma relação com seus componentes, ainda que os mesmos mantenham sua integridade no interior do compósito ⁽⁸⁾.

A fase dispersante, chamada de matriz, pode ser um material polimérico, cerâmico ou metálico. Em relação aos compósitos poliméricos de matriz termorrígida, a resina poliéster é comumente empregada por proporcionar ao compósito excelente resistência à corrosão, facilidade de manipulação e moldagem, e custo baixo. Dentre os vários tipos de resina poliéster, destaca-se a ortoftálica por seu custo atrativo ⁽⁹⁾ e variedade de aplicações ⁽¹⁰⁾.

A fase dispersa, denominada de reforço, também pode ser composta de materiais poliméricos, cerâmicos e metálicos, podendo ser de formato particulado ou fibroso. Os componentes da fase dispersa podem ser aleatoriamente arranjados, ou organizados em algum tipo de padrão. As fibras podem ser contínuas, longas ou curtas. Industrialmente, as fibras mais tradicionais são as sintéticas, onde se destaca a fibra de vidro por suas propriedades químicas,

mecânicas e térmicas, e pela sua viabilidade econômica em relação a outras fibras artificiais ^(11,12). Das aplicações das fibras de vidro, na grande maioria, há o compósito conhecido com polímero reforçado com fibras de vidro (FGRP) ou simplesmente *fiberglass* sendo o compósito mais comum no setor automotivo ⁽¹³⁾.

O agrupamento de fibras curtas para posterior processamento dá origem a um material chamado de manta. Neste caso, as fibras são organizadas aleatoriamente, sendo seu uso em compósitos muitas vezes preferido industrialmente devido a sua natureza semi-anisotrópica, ou seja, estas mantas possuem propriedades físicas equivalentes considerando duas direções do compósito (largura e comprimento) diferentemente de tecidos ou estruturas com fios unidirecionais. Outra vantagem das fibras curtas sobre as fibras longas é o menor custo do processo por não usar teares e a possibilidade de uso de matérias-primas de comprimentos variados como fibras vegetais ^(12, 14, 15).

Os materiais compósitos estão sendo empregados cada vez mais em substituição aos materiais tradicionais, cujas características individuais não atendem às crescentes exigências de melhor desempenho, segurança, economia e durabilidade. Outra característica marcante dos compósitos é sua versatilidade quanto ao largo espectro de propriedades físicas, químicas e mecânicas que podem ser obtidas pela combinação de diferentes tipos de matriz e pelas várias opções de reforços ⁽¹⁶⁻¹⁸⁾.

2.2 Matrizes Poliméricas para Compósitos com Fibras

A fase matricial possui várias funções dentro de um material compósito. Em primeiro lugar, ela liga as fibras umas às outras e atua como meio através do qual uma tensão externa é aplicada, transmitida e distribuída para as fibras. A segunda função é a de proteger as fibras individuais contra danos superficiais, como resultado da abrasão mecânica ou de reações químicas com o ambiente ⁽¹⁹⁾.

Os polímeros termorrígidos têm as moléculas quimicamente unidas através de ligações cruzadas, resultando em uma rede rígida tridimensional ⁽²⁰⁾. Os seguintes fenômenos podem ocorrer durante esta reação, chamada de cura: evolução de calor (calor de reação), evolução de voláteis, aumento na viscosidade, gelificação ou gelação, vitrificação e degradação ⁽²¹⁾.

Os tipos mais comuns de resinas termorrígidas são ⁽²²⁾: resina poliéster ortoftálica (mais comum e de uso generalizado); resina poliéster isoftálica (aplicada em moldes feitos de fibras de vidro, em tubulações e piscinas); resina poliéster tereftálica – (alto grau de transparência, flexibilidade de aplicações, resistência à temperaturas elevadas, água e manchas); resina éster vinílica (alta resistência química e mecânica, especialmente contra impactos) e resina epóxi amina (utilizada para peças estruturais e em revestimentos para proteção química e de intempéries). A seguir, são apresentadas as estruturas químicas das resinas poliéster insaturadas ortoftálica e isoftálica (Figuras 2.1 e 2.2), sendo as matrizes utilizadas neste estudo.

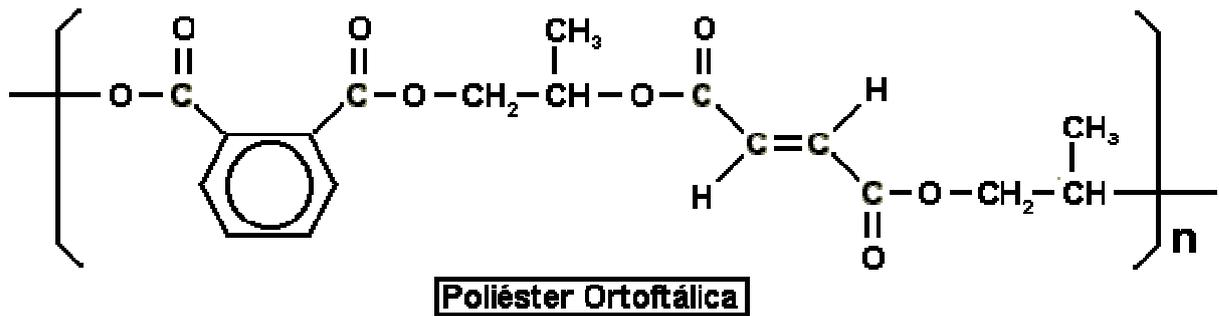


Figura 2.1 – Estrutura química da resina poliéster ortoftálica ⁽²²⁾

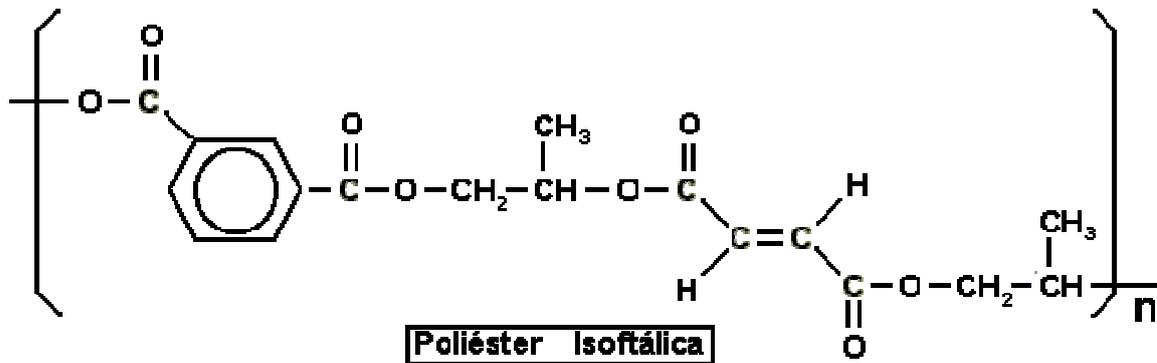


Figura 2.2 – Estrutura química da resina poliéster isoftálica ⁽²²⁾

2.4 Reforços Fibrosos

Os reforços para compósitos podem se apresentar numa série de outras classificações decorrentes dos tipos e arranjos dos reforços existentes ^(1, 23). Conforme mostra esquematicamente o diagrama da Figura 2.3 observa-se que os reforços em um compósito podem consistir de fibras ou partículas.

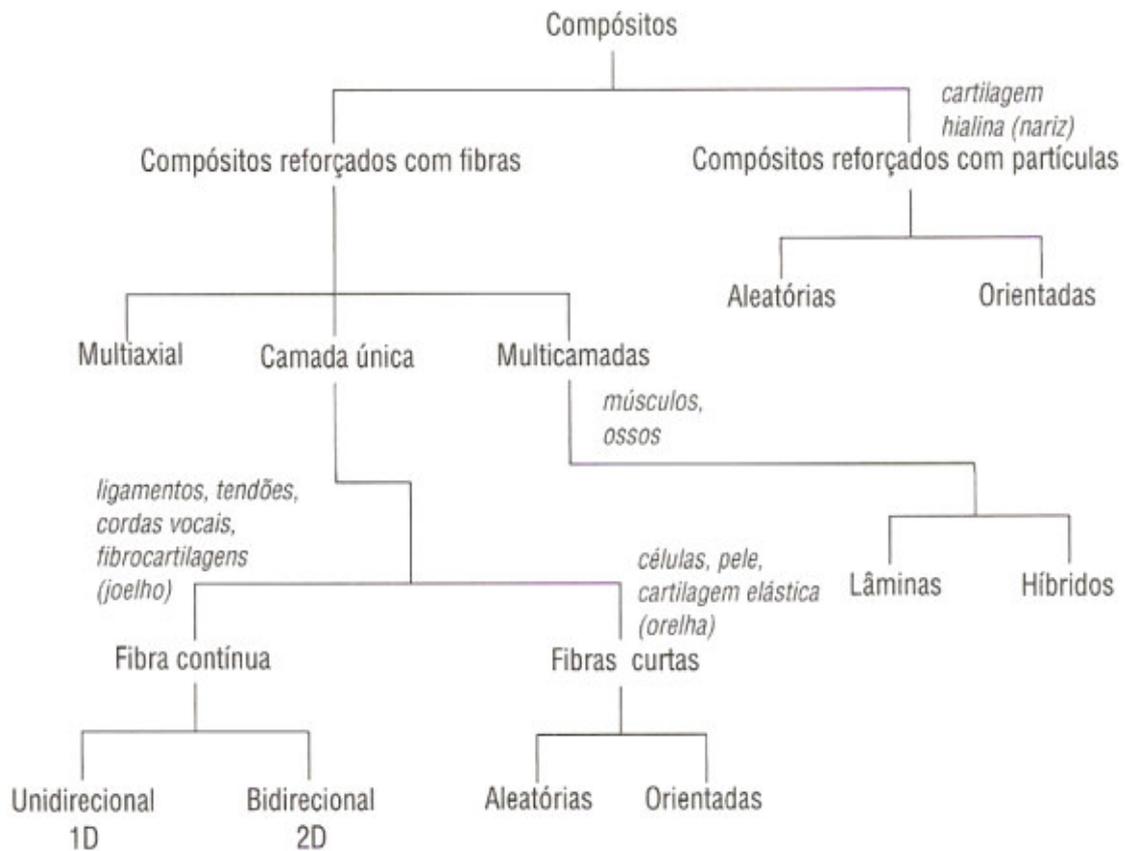


Figura 2.3 - Proposta de classificação hierárquica de compósitos sintéticos e naturais ⁽²¹⁾

No caso do reforço na forma de fibras pode-se dispô-las em feixes paralelos entre si, de modo a formar e orientar o reforço em multidireções, multicamadas ou na forma de camadas isoladas ou lâminas ⁽²¹⁾.

Os compósitos obtidos com fibras contínuas podem apresentar, geralmente, reforço unidirecional ou bidirecional. Nestes casos, o material é moldado de forma que, em cada camada de compósito, a fase de reforço contínua é dotada de uma orientação preferencial ^(19, 24). Casos de lâminas compósitas são ilustradas esquematicamente na Figura 2.4.

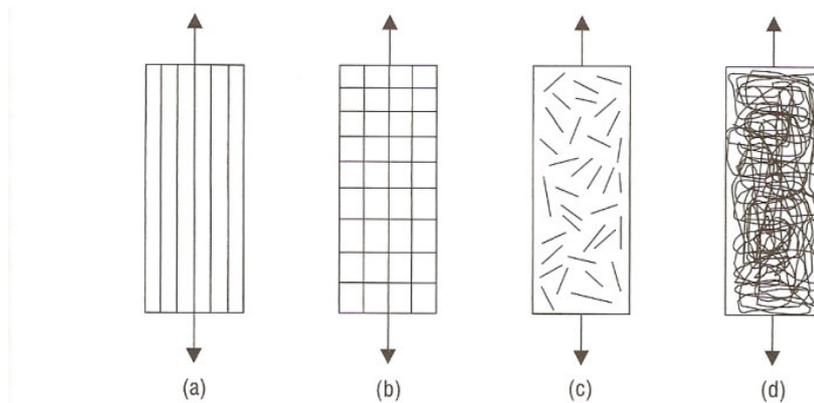


Figura 2.4 - Lâminas com reforço tipo (a) unidirecional, (b) tecido bidirecional, (c) fibras picadas (manta de fibras curtas) e (d) manta contínua, submetidas a esforços de tração uniaxial longitudinal ⁽²¹⁾

A fibra é um corpo que tem uma elevada razão de aspecto, ou seja, a relação entre o comprimento e as dimensões laterais (diâmetro) é muito desproporcional. As fibras ou filamentos são o elemento de reforço dos compósitos estruturais que suportam carregamento mecânico, resistem a variações de temperatura de -50 a 150 °C, sem apreciável alteração de suas propriedades mecânicas ⁽²⁵⁾.

As fibras se constituem em um meio efetivo de reforço porque apresentam menor número de defeitos que em sua forma mássica. À medida que se tornam mais finas, os materiais tendem a apresentar menor número de defeitos que possam induzir as falhas e, dessa forma, a resistência tende a se aproximar da resistência teórica do material, representada pela resistência coesiva das camadas adjacentes de átomos ⁽¹⁹⁾.

2.4.1 Fibra de Vidro

O tipo de fibra sintética mais utilizada em compósitos com matriz polimérica é a de vidro devido principalmente ao seu baixo custo, alta resistência à tração, e grande inércia química. As desvantagens dessa fibra são associadas ao baixo módulo de elasticidade (em comparação a outras fibras sintéticas), auto-abrasividade e à baixa resistência a fadiga quando agregada. As fibras de vidro são isotrópicas e, portanto, o módulo de elasticidade nas direções axial e transversal ao filamento é idêntico. As fibras de vidro podem ser produzidas tanto na forma de filamentos contínuos quanto na forma de fibras picadas ⁽²¹⁾.

A produção de compósito de fibra de vidro é trabalhada de forma artesanal, tendo maior liberdade de forma. Uma de suas principais características é a baixa densidade comparada aos metais. O peso específico do laminado com fibra de vidro é em torno de 1,5 g/cm³. A fibra de vidro tem ainda muitas características importantes como, por exemplo, isolante elétrico, isolante térmico, resistência ao fogo, alta resistência mecânica e à oxidação, resistência à umidade, baixo custo ⁽²²⁾.

A resina termorrígida misturada à fibra de vidro, se transforma em material de excepcionais propriedades mecânicas após a cura ^(11, 12, 15). O polímero reforçado com fibra de vidro é também conhecido comercialmente como *fiberglass*. A matriz geralmente utilizada para este compósito é a resina poliéster.

2.4.2 Sisal

O uso de fibras naturais de origem vegetal em compósitos envolve atualmente aspectos ambientais, sociais e econômicos que necessitam ser salientados. O crescimento demográfico mundial médio é tal que, a cada onze anos, há um crescimento superior a um bilhão de pessoas. Aliados a esses fatos, há escassez progressiva de recursos energéticos e minerais em geral, além do êxodo rural e outros. Neste cenário, a busca por matéria-prima renovável e de baixo custo tem sido um fator de significativa importância no direcionamento das pesquisas que envolvem o uso de fibras vegetais em compósitos ⁽⁵²⁾.

Todas as fibras vegetais são de natureza celulósica. São colhidas de diferentes partes da planta: caule, folha, semente, etc. As fibras mais puras e de maior importância na indústria têxtil são obtidas de algodão e recobrem a semente. As fibras mais duras, como a piaçava, são retiradas de palmeiras e são úteis na fabricação de escovas e vassouras ⁽²⁵⁾.

Derivados de fibras naturais, como a fibra de sisal, têm como principais produtos os fios biodegradáveis utilizados em artesanato, no enfardamento de forragens e cordas de várias utilidades, inclusive navais. O sisal também é utilizado na produção de estofados, pasta para indústria de celulose, produção de tequila, tapetes decorativos, remédios, biofertilizante, ração animal e adubo orgânico. As fibras naturais já estão sendo utilizadas em algumas aplicações como substitutas das fibras sintéticas, devido ao seu apelo ecológico ⁽²⁾.

Entre as fibras vegetais empregadas como reforço em compósitos formados de uma matriz polimérica, uma das mais citadas na literatura nas

últimas décadas é o sisal. O sisal é uma importante fibra cultivada no Brasil, utilizada principalmente em cordoaria e artesanato, mas que pode ter seu valor agregado multiplicado se utilizado como reforço de compósitos poliméricos. O sisal é uma fibra ligno-celulósica leve (1,0 a 1,2 g/cm³), atóxica, que apresenta alto módulo e resistência específica ⁽²⁶⁾ custa aproximadamente dez vezes menos que a fibra de vidro e, ao contrário desta fibra inorgânica, causa menos danos por abrasão aos equipamentos e moldes. Entre outras vantagens do sisal pode-se citar a facilidade de modificação superficial, sua abundância no Brasil, facilidade de cultivo, o fato de ser um material biodegradável que provem de fonte renovável, além de apresentar boas propriedades como isolante térmico e acústico ^(27, 28). Estes fatores, aliados à alta tenacidade, à resistência à abrasão e ao baixo custo tornam o sisal uma das mais estudadas fibras naturais ^(29, 30).

As principais desvantagens do uso do sisal como de outras fibras vegetais em compósitos poliméricos estão relacionadas à natureza polar e hidrofílica bem como a propensão destas fibras a ataques de fungos e bactérias.

A extração de fibras a partir das folhas de sisal envolve o corte e a descorticação das mesmas, seguidos da lavagem, secagem e da limpeza das fibras. Todas estas etapas, as quais envolvem muitas vezes processamento artesanal, influenciam as propriedades finais das fibras, sendo que podem causar o surgimento de microtrincas nas paredes de cada uma das fibras. De uma planta de sisal, pode-se extrair de 700 a 1400 fibras, que variam de 0,5 a 1 m de comprimento. A anatomia das fibras de sisal é caracterizada por uma composição multicelular de pequenas células, longitudinalmente dispostas e unidas ⁽³¹⁾. Estas fibras possuem seção transversal arredondada, porém irregular e variável, com diâmetros médios na faixa de 10 a 30 µm, sendo constituídas de fibrilas ou

microfibras individuais com comprimentos que variam de 1 a 8 mm, e valores médios de 3 mm, aproximadamente. As seções transversais das fibras, via de regra, decrescem em direção às extremidades livres das folhas. Além disso, a resistência à tração das fibras de sisal não é uniforme ao longo das mesmas. As regiões mais próximas às raízes da planta apresentam menor rigidez e resistência comparando-se às regiões superiores da planta ⁽³²⁾. Diante de tantos fatores que exercem influência não é de se admirar a razão pela qual as propriedades mecânicas das fibras vegetais são tão variáveis ⁽²¹⁾.

O sisal, (*Agave spp. Agavaceae*) é uma planta utilizada para fins comerciais. O *Agave sisalana* é cultivado em regiões semi-áridas. No Brasil, os principais produtores são os estados da Paraíba e da Bahia. Do sisal, utiliza-se principalmente a fibra das folhas que, após o beneficiamento, é destinada majoritariamente à indústria de cordoaria. O sisal, *Agave Sisalana Perrine*, é uma planta originária do México. Regiões de plantio e comércio atualmente são a Tanzânia, Quênia, Uganda (África Oriental) e Brasil, que fazem parte dos maiores cultivadores de sisal do mundo. Também são destaque os países: Angola, México, e Moçambique ⁽³³⁾.

As fibras de sisal se destacam entre as fibras vegetais produzidas no Brasil, pelas características físico-químicas e propriedades mecânicas. Esta fibra está entre as fibras vegetais mais utilizadas mundialmente. Sua difusão pelo Brasil ocorreu aproximadamente na década de 20, inicialmente no estado da Paraíba e somente no final da década de 30 foi difundido pela Bahia. Atualmente o Brasil é o maior produtor de sisal do mundo e a Bahia é responsável por 80% da produção da fibra nacional. O sisal teve seu apogeu econômico durante a crise do petróleo nas décadas de 60 e 70. Com a utilização das fibras sintéticas, porém,

tem havido a necessidade de preservação da natureza e a forte pressão dos grupos ambientalistas vem contribuindo para o incremento da utilização de fios naturais. O ciclo de transformação do sisal em fios para fins comerciais tem início aos 3 anos de vida da planta, ou quando suas folhas atingem até cerca de 140 cm de comprimento que podem resultar em fibras de 90 a 120 cm. As fibras representam apenas 4 a 5% da massa bruta da folha do sisal. As folhas são cortadas a cada 6 meses durante toda vida útil da planta que é de 6 a 7 anos. Ao final do período é gerada uma haste, a flecha, onde surgem as sementes de uma nova planta. O sisal pode ser colhido durante todo o ano ⁽³³⁾. “É uma planta resistente á aridez e ao sol intenso do sertão nordestino” ⁽³⁴⁾.

2.4.3 Mantas

A utilização de mantas e tecidos para uso como reforço em compósitos é citada em artigos científicos utilizando diversas formas de tramas, arranjos e fibras. Devido a organização das fibras na trama os tecidos garantem melhor distribuição de reforço que as mantas. Mesmo confeccionados manualmente, tecidos de fibra de sisal são utilizados como reforços ^(35, 36).

Outras formas menos usuais de preparação de tecidos para compósito foram usadas. Carvalho e Cavalcante ⁽³⁷⁾ desenvolveram tecidos tricotados de juta variando o teor de reforço através da inclusão de camadas de tecido. Estes compósitos resultaram em uma resistência ao impacto relativamente alta, porém resistência à tração (transversal) com valores inferiores aos da matriz pura, devido ao tipo de entrelaçamento das fibras

De modo a estudar características isotrópicas de materiais, compósitos reforçados por mantas são avaliados por Nóbrega e colaboradores ⁽³⁸⁾, que utilizam mantas de fibras curtas (de aproximadamente 3 cm). Compósitos poliméricos têm sido preparados usando fibras tratadas quimicamente na forma de mantas (fibras curtas) incorporadas à resina poliéster insaturada. As propriedades físico-mecânicas destes compósitos são estudados em função da fração volumétrica de fibra, razão de aspecto, tipo de agente de acoplamento e combinações sisal/vidro ⁽³⁹⁾. Nestes trabalhos não foram discutidos os métodos de fabricação de mantas, nem sua relação com as propriedades dos compósitos estudados.

Por outro lado Kaveline e colaboradores ⁽⁴⁰⁾ investigaram as propriedades estocásticas de mantas de fibras naturais e de disposição aleatória. Estocástico é definido como homoganeamente aleatório, sendo assim, propriedades estocásticas avaliam o quanto as fibras estão distribuídas aleatoriamente em uma manta. Neste estudo foi desenvolvido um método para estimar quantitativamente a heterogeneidade de fibras curtas de sisal e vidro separadamente. O autor não faz associação entre as propriedades estocásticas e as propriedades mecânicas.

Como observado, os periódicos fornecem poucas informações sobre processos e parâmetros de fabricação de compósitos híbridos. Alguns trabalhos na literatura citam variações na ordem de montagem dos laminados ⁽⁴¹⁾. Em menor frequência propõe variações nos métodos de fabricação de tecidos e mantas de fibras híbridas ⁽⁴²⁾.

2.5 Compósitos com Fibras Vegetais

O estudo sobre compósitos reforçados por fibras vegetais (como o linho, cânhamo, algodão, curauá) vem se desenvolvendo, sobretudo, em virtude da preocupação atual com a questão ambiental. Estas fibras são oriundas de fontes renováveis, são atóxicas e como são biodegradáveis não poluem ^(2, 43, 44, 45). Características como baixa densidade, baixo custo e menor abrasividade aos equipamentos e considerável resistência mecânica também chamam a atenção para compósitos reforçados por estas fibras ⁽³⁹⁾. Fibras de caule como linho, juta, cânhamo e *kenaf*, assim como fibras de folhas de sisal, abacaxi e banana e ainda fibras de frutos ou sementes como algodão e de coco são mencionadas como bio-fibras e reforços em potencial para compósitos na indústria automotiva ⁽⁴⁾.

Ainda podem-se ver outros exemplos de uso destes materiais ecológicos em termorrígidos, porém com uma frequência mais discreta na literatura ^(4, 6, 10, 30, 43). Fibras longas e alinhadas de curauá reforçam compósitos de resina poliéster e seu desempenho é analisado através de ensaios mecânicos ⁽⁴²⁾. Monteiro e colaboradores ⁽⁴⁶⁾, também utilizaram a fibra de coco como reforço e os compósitos produzidos com esta fibra foram avaliados pela sua resistência mecânica. Como complemento deste estudo, as fibras também foram observadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS). O bagaço de cana de açúcar, um recurso abundante no Brasil, serviram de reforço, também, para a resina poliéster insaturada nos compósitos estudados por Fernandes, Sánches e Sánches ⁽⁴⁷⁾ e El-Tayeb ⁽⁴³⁾. A

durabilidade de compósitos de fibras naturais foi estudada sob condições de umidade, hidrotérmicas e de intemperismo ^(11, 48).

Dhakal, Zhang e Richardson ⁽⁴⁹⁾ observaram o efeito da absorção de água nas propriedades mecânicas de compósitos de fibras curtas de cânhamo e poliéster insaturado. As amostras foram preparadas pelo processo de *hand lay up* (acomodação manual de camadas de mantas e resina líquida) seguido pelo processo de moldagem por compressão à quente.

Para um melhor desempenho fibra/matriz, é usual a realização de diferentes tratamentos superficiais nas fibras antes de atuarem como reforço. Embora o tratamento químico seja conduzido para promover a separação de fibras individuais e a adesão com a matriz do compósito, efeitos indesejáveis como baixo desempenho mecânico, desestruturação através do forte inchamento ou degradação superficial podem ocorrer ⁽⁵⁰⁾.

Quimicamente as fibras vegetais consistem de celulose, hemicelulose, lignina, pectina e uma pequena quantidade de ceras e gorduras ⁽⁵¹⁾. Algumas fibras naturais são modificadas industrialmente por processos químicos, para atender a exigências do mercado de vestuário ⁽²⁵⁾.

Nota-se ultimamente que a fibra de sisal, em especial, vem sendo a base de reforço em diversos trabalhos. Kuruvilla e Mattoso ⁽⁵²⁾ fornecem em seu artigo de revisão uma fonte de pesquisa em trabalhos publicados citando as características ressaltadas do sisal em detrimento de outras fibras vegetais. Gomes e colaboradores ⁽⁵³⁾ compararam sisal com brim e cardo, assim como Nicolai e colaboradores ⁽⁵⁴⁾ comparam as fibras de sisal e coco através de ensaios de resistência à flexão e ensaios térmicos onde obtiveram resultados melhores para o sisal em relação a fibra de coco.

A magnitude da adesão fibra-matriz sisal/resina poliéster foi investigada através de ensaios de *pull-out* (ensaio mecânico que visa medir a tensão necessária para desprender uma fibra da matriz) por Sydenstricker e colaboradores ⁽⁵⁵⁾ e a sua correlação com os tratamentos químicos aplicados às fibras ⁽⁵⁰⁾. A interferência do tamanho de fibra no desempenho dos compósitos também são estudados em Kuruvilla ⁽³⁴⁾.

Se em um primeiro momento as fibras vegetais foram utilizadas para funções de baixa solicitação mecânica, é necessária atualmente a sua utilização em aplicações que requerem um conjunto de propriedades superiores. Dentro deste contexto e considerando o elevado aumento recente do preço do petróleo, instaura-se um quadro extremamente favorável para a busca da diminuição do nível de dependência do Brasil de matérias-primas oriundas do petróleo. Por isso, motivado por um crescente número de consumidores favoráveis ao uso de materiais que causem menor impacto ambiental, pela necessidade de diminuir custos e para melhorar o desempenho de seus produtos, a indústria automobilística tem sido a pioneira na introdução de fibras vegetais em suas peças ⁽²¹⁾.

2.6 Compósitos Híbridos

Compósitos laminados híbridos com fibras vegetais e fibras de vidro (mantas distintas de um único material cada) apresentam boa resistência e menor densidade que os reforçados unicamente por fibras de vidro. Por outro lado, este

tipo de compósito tende a apresentar problemas de delaminação entre as camadas de materiais diferentes ⁽⁵⁶⁾.

Rodrigues e Fujiyama ⁽⁵⁷⁾ utilizaram tecidos híbridos de fibras de malva/juta/sisal e avaliaram suas propriedades mecânicas como a resistência à flexão. Assim como Carvalho, Almeida e Fonseca ⁽⁵⁶⁾ observaram o comportamento de compósitos de tecidos híbridos de algodão/sisal em matriz de poliéster.

Como alternativa a limitações como a delaminação para reforços laminados híbridos e dificuldade e custos envolvidos na confecção de tecidos híbridos, tem-se a utilização de mantas híbridas únicas de fibras no processo de confecção. A hibridização de reforços de fibras sintéticas e vegetais é utilizada de modo a obter produtos com propriedades intermediárias ⁽¹⁹⁾.

Mishra e colaboradores ⁽⁵⁸⁾ analisaram propriedades mecânicas e de absorção d'água em compósitos poliéster reforçados com fibras de vidro e fibras de sisal e da folha de abacaxi. John e Naidu ⁽⁵⁹⁾ estudaram as propriedades de flexão de compósitos poliéster de mantas combinadas de sisal e vidro em função do tratamento químico das fibras de sisal e do conteúdo de reforço. Mais recentemente, os pares de fibra juta/vidro também foram foco de interesse de estudos ⁽⁶⁰⁾ e as diversas conformações de tecidos de sisal/vidro mostram a significativa relação que estes materiais tão distintos podem obter ⁽³⁰⁾. Em 2006 as fibras de vidro com fibras de sisal e folha de abacaxi (curauá) voltam a ser estudadas por Idicula e colaboradores ⁽¹⁸⁾ em suas propriedades termo-físicas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

As seguintes matérias-primas foram utilizadas neste trabalho:

- Fibras de sisal: bobina na forma de *yarn* (fio multifibrilar torcido) de aproximadamente 5 kg, de 4 mm de diâmetro, sem pigmentação, com anti-mofo. As fibras de sisal na forma de cordas finas (Figura 3.1), oriundas da região nordeste do país, foram fornecidas por duas empresas desta região, a CISAF para os ensaios preliminares (denominado lote A) e a SISALÂNDIA FIOS NATURAIS, para o restante dos ensaios (denominado lote B). O custo da fibra de sisal na forma de *yarn* é de R\$ 3,40/kg e o custo da fibra de sisal não fiada (fios de aproximadamente 1 m de comprimento, soltos) é de R\$ 2,00/kg.
- Fibras de vidro: (Figura 3.1), obtida na forma de *roving* (bobina de fios), pela empresa Vetrotex, referência: EC 2400 P207, com massa específica de 2,5 g/cm³, com *sizing* (substância associada à fibra de

vidro industrial com a função de aumentar a aderência fibra-matriz) compatível com resina ortoftálica, e ideal para aplicações onde é necessário o corte da fibra, como no *spray-up* (*processo onde as fibras de vidro são imersas em resina e cortadas num processo contínuo, o compósito de fibra de vidro é formado pela estática e a resina entre as fibras*). O custo desta fibra é de R\$ 5,80/kg.

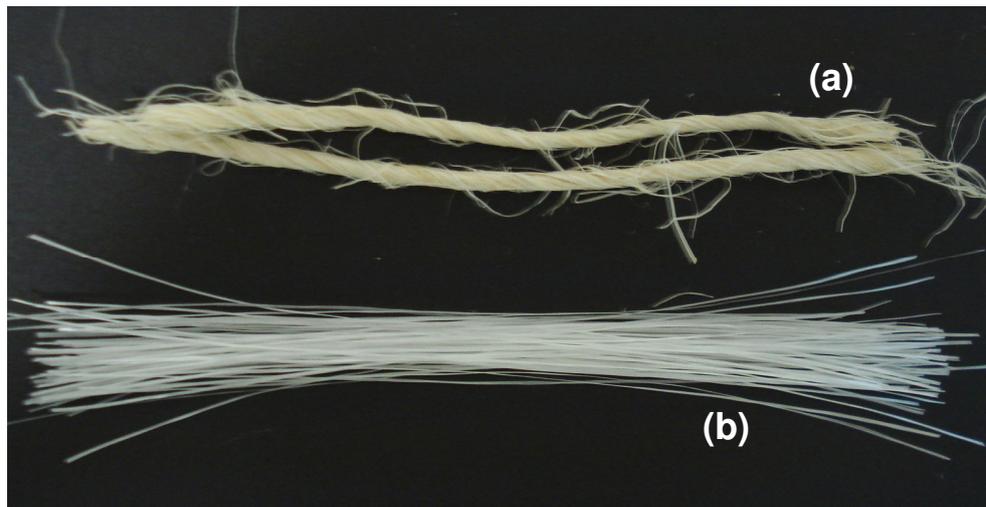


Figura 3.1 – Fios de sisal (a) e filamentos de fibra de vidro (b), em tamanho natural.

- Resina Poliéster: foram utilizadas dois tipos de resina poliéster insaturada: isoftálica e ortoftálica. A resina isoftálica (utilizada para a rota de experimentos preliminares), foi fornecida pela empresa FIBERGLASS, referência 105, com acelerador de cobalto. A resina ortoftálica, da ELEKEIROZ S.A, referência: UC 2090, com acelerador de cobalto e monômero de estireno, foi utilizada para as demais rotas de experimentos denominadas rotas de experimentos 1 (partes 1 e 2) e 2. Sendo que em cada uma destas rotas e partes foi utilizado um lote diferente de resina. O iniciador utilizado para ambas as resinas foi

o peróxido de metil-etil-cetona (P-MEK), no volume de 2% do total de resina, fornecido pelas mesmas empresas das respectivas resinas. O custo de ambas as resinas ficou em torno de R\$ 12,00/L. Os valores de resistência à tração (na força máxima) e módulo elástico obtidos experimentalmente para a resina ortoftálica foram, respectivamente: 38,27 MPa e 3870 MPa.

3.2 Equipamentos

3.2.1 Equipamentos de processamento

- Estufa com Circulação Forçada de Ar

Marca: Marconi Equipamentos para Laboratórios; Modelo: MA 035;
Potência: 50/60 Hz.

- Ventilador Centrífugo Seibt

Marca: Seibt Máquinas para Plásticos; Modelo: VCS 220;
Potência: 0,5 cv; Vazão: 540 m³/h; Pressão: 105 mmCA.

- Prensa Hidráulica com Aquecimento

Marca: Schulz; Modelo: PHS 15t; Pressão máxima: 3,5 MPa.

- Lixadeira/Politriz Universal

Marca: Arotec Equipamentos; Velocidades: 600 rpm (rotações por minuto);
Diâmetro do prato: 200 mm; Dimensões: 600 X 420 X 270 mm.

- Vibrador Eletromagnético

Marca: Produtest Equipamentos; Modelo: T; Frequência: constante a 3.600 vpm (vibrações por minuto).

3.2.2 Equipamentos para ensaios

- Balança Analítica

Marca: Bel Equipamentos; Modelo: SSR 600 - Classe II; Pesagem máxima: 600 g.

- Máquina Universal de Ensaio

Marca: EMIC; Modelo: DL 3.000; eletromecânica e microprocessada; Capacidade: 3.000 kgf (30 kN); Faixa de Velocidades: 0,01 a 1000 mm/min; Medição de Força: células de carga intercambiáveis; Dimensões: 1790 x 860 x 450 mm;

- Pêndulo de Impacto

Marca: CEAST; Modelo: 6545/000; Pêndulo de impacto de baixa energia; Faixa de absorção de energia: 0.5 J à 5.5 J.

3.2.3 Moldes

Para a confecção dos compósitos na rota de ensaios preliminar, utilizou-se um molde para compressão (molde 1), do tipo macho-fêmea, composto de 2 partes: inferior e superior (tampa), como vê-se na Figura 3.2. Na parte inferior

continha uma cavidade fechada de área de 15 x 15 cm que dava forma ao compósito. A tampa era reentrante e encaixa-se a parte inferior. De modo a limitar a altura final do compósito utilizaram-se batentes (pequenas chapas de aço com a espessura final do compósito) entre a tampa e a aba da parte inferior. O molde foi usinado em aço inox.

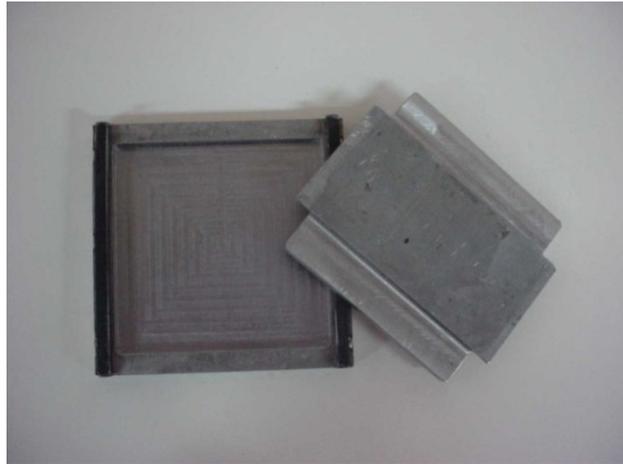


Figura 3.2 – Molde 1 para compressão

Nas rotas 1 e 2 subseqüentes, foi utilizado o molde 2, de 3 partes, (Figura 3.3), semelhante ao molde 1, cuja diferença é a inserção de uma placa de apoio no fundo para facilitar a extração do compósito. A área da cavidade deste molde foi de 17 x 17 cm.

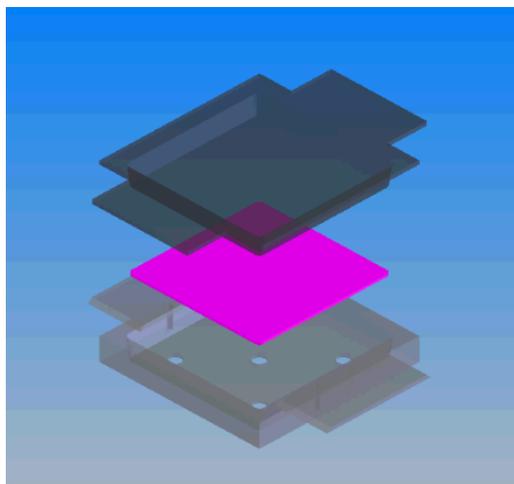


Figura 3.3 – Projeto do molde 2 para compressão

Além disso, a parte inferior do molde possuía orifícios para a inserção de pinos extratores. Estes pinos estavam acoplados a um sistema de extração, que era utilizado na própria prensa onde os compósitos foram confeccionados.

3.3 Estimativa da Massa de Reforço e Volume de Resina

Para se preparar um compósito com um volume definido de reforço representado por v_f (fração volumétrica de reforço), utilizou-se uma quantidade de reforço padrão de modo a se obter uma fração volumétrica de 25% de reforço no total do compósito, que é um valor pouco abaixo do utilizado industrialmente, em processos como a moldagem por transferência de resina (RTM). As fórmulas utilizadas para o cálculo de v_f padrão ⁽²¹⁾ foram adaptadas para um sistema de mantas de gramatura desconhecida.

Neste trabalho, para a obtenção do valor da massa de reforço, calculou-se o volume total (médio) da placa de compósito através da confecção de placas feitas com resina poliéster não reforçada. Assim, obtém-se além do volume da placa curada, o volume de resina líquida a ser utilizada no procedimento. Lembra-se aqui que o processo de moldagem por compressão normalmente utiliza um excedente de resina que vaza para fora do molde. Neste caso, utilizou-se um excedente de 10 % do total de resina.

Através do V_{tot} (volume da placa final), estima-se o V_f (volume de reforço) e o V_m (volume de resina) para esta peça, pelas equações a seguir (Equações 3.1 e 3.2):

$$V_f = V_{tot} \cdot v_f \quad (\text{Equação 3.1})$$

$$V_{tot} = V_f + V_m \quad (\text{Equação 3.2})$$

Com o valor de V_f (volume de reforço), calcula-se a massa correspondente através da densidade aparente das fibras a serem utilizadas. No caso de mantas híbridas, a massa de reforço é estimada conforme a proporção de volume de cada fibra e as densidades aparentes de cada fibra (Equação 3.3).

$$M_f = V_v \cdot \rho_v + V_s \cdot \rho_s \quad (\text{Equação 3.3})$$

3.4 Métodos de Confeção de Mantas

Durante o estudo foram desenvolvidos 4 métodos de confeção de mantas (Manual, Água, Leito-ar e Vibracional), sendo que 2 destes (Manual e Água) tiveram 2 variantes de processo (Manual-lav e Etanol) . A nomenclatura dos métodos pode ser vista na Tabela 3.1 que segue.

Tabela 3.1 – Métodos de confecção de mantas

Método	Descrição
Manual	Deposição manual de fibras
Manual-lav	Deposição manual de fibras – Fibra de vidro lavada
Água	Deposição de fibras em fase líquida – Água destilada
Etanol	Deposição de fibras em fase líquida – Etanol
Leito-ar	Arranjo de fibras por leito fluidizado - Ar
Vibracional	Deposição de fibras em meio vibracional

Para todos os métodos, as fibras de sisal foram previamente lavadas em água destilada. Em todos os métodos, a fibra de vidro foi utilizada na forma “bruta”, ou seja, como é obtida industrialmente, com exceção do método Manual-lav, onde a fibra de vidro foi lavada com água destilada.

Após secas, cortadas (tamanhos conforme itens 3.6, 3.7 e 3.8) e desfiadas, todas as fibras foram pré-misturadas manualmente, independente do teor de fibra vegetal ou sintética, ou do método, Este procedimento visou a separação de filamentos do feixe, e uma melhor homogeneização entre as fibras naturais e sintéticas. Após a pré-mistura, as fibras estavam prontas para a utilização em qualquer dos métodos de confecção de mantas.

3.4.1 Método de Deposição Manual de Fibras

Estando secas e pré-misturadas as fibras foram dispostas manual e aleatoriamente buscando-se cobrir homogeneamente a área do molde. Este procedimento foi realizado com a ajuda de um aparador de fibras, feito de papelão (devido a estática das fibras) e nas dimensões do molde (Figura 3.4). As fibras foram então comprimidas a 2 MPa de pressão, por 20 min, na temperatura do processamento do compósito (90°C para ensaios preliminares e rota 1 e 60°C para rota 2), formando-se assim a manta pronta para uso como reforço. Na Figura 3.5 é mostrado um béquer com a pré-mistura de fibras e a manta antes da compressão. De modo a manter o teor de umidade baixo nas mantas, a mesmas foram estocadas em um dessecador até a hora do uso no compósito.



Figura 3.4 – Processo de produção de mantas por deposição manual (Métodos Manual e Manual-lav)

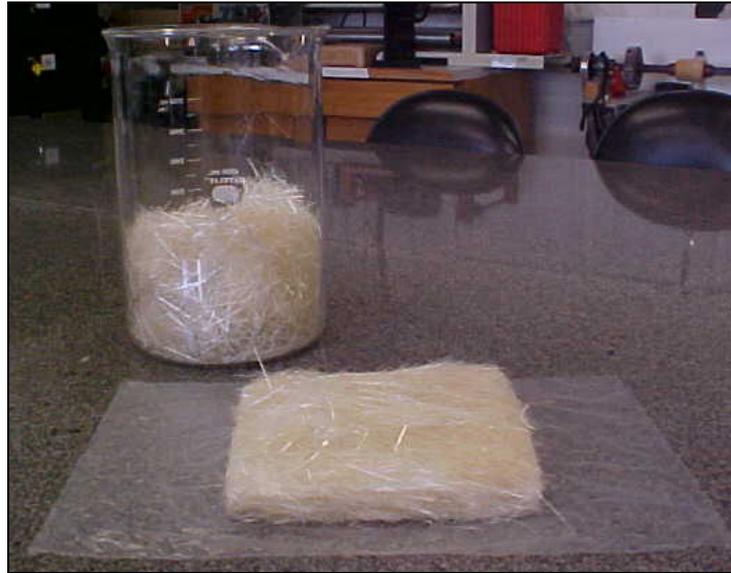


Figura 3.5 – Pré-mistura e manta híbrida produzida pelo Método Manual

3.4.2 Método de Deposição de Fibras em Fase Líquida

Realizada a pré-mistura, as fibras foram imersas em uma cuba com 20 L de água destilada (Método Água), ou álcool etílico comercial (Método Etanol), com ajuda de uma leve agitação manual com um bastão que promoveu a mistura das fibras enquanto as mesmas ficavam submersas. Após a precipitação das fibras, a tela de contenção foi suspensa, sendo removido o excesso de líquido. As mantas foram retiradas da tela e secas em estufa com circulação de ar a 60 °C, por 180min. Secas, as mantas foram comprimidas por 20 min, a 2 MPa de pressão, em temperatura de processamento do compósito (90 °C para ensaios preliminares e rota 1 e 60 °C para rota 2).

A área útil do dispositivo era um pouco maior que o molde (22 x 22 mm) de compressão, necessitando-se reduzir a manta através de corte com tesoura ou guilhotina. Após o corte, as mantas foram novamente pesadas para a confirmação e correção da massa de reforço. O projeto do dispositivo (cuba) com a tela de

contenção é mostrado na Figura 3.6. Na Figura 3.7 é mostrada a cuba com os dois diferentes tipos de líquidos utilizados.

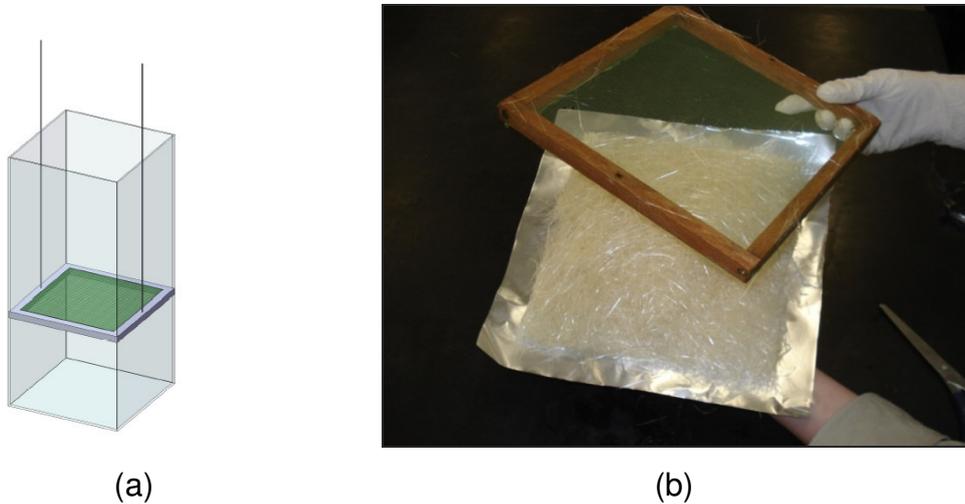


Figura 3.6 – Cuba de vidro e tela de contenção de reforço para o processo por deposição em meio líquido: (a) projeto (b) manta obtida pelo Método Etanol

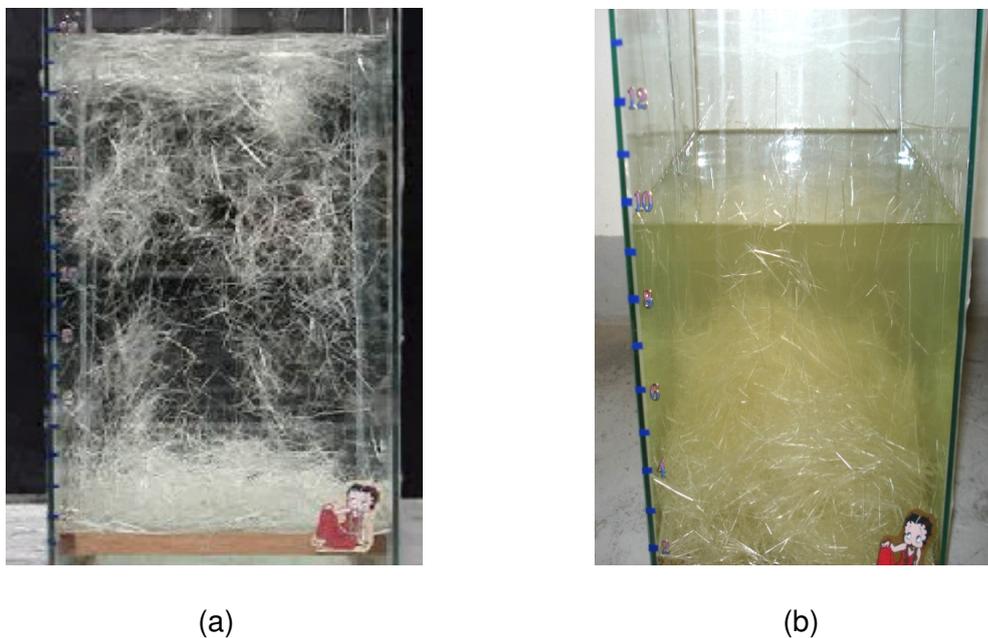


Figura 3.7 – Processo de deposição de fibras em fase líquida: (a) fase aquosa (b) fase etílica.

3.4.3 Método de Arranjo de Fibras por Leito Fluidizado - Ar

Neste método, as fibras foram alimentadas em uma câmara selada conectada a uma entrada de ar pela base. A função do ar é a fluidização das fibras e sua mistura das fibras no interior da câmara. Pela variação do fluxo de ar introduzido, as fibras são carregadas até a tela de contenção superior arranjando-se de modo a produzir uma manta uniforme e homogênea. A Figura 3.8 mostra o equipamento de fluidização de fibras e o ventilador centrífugo utilizado para o fornecimento de ar.

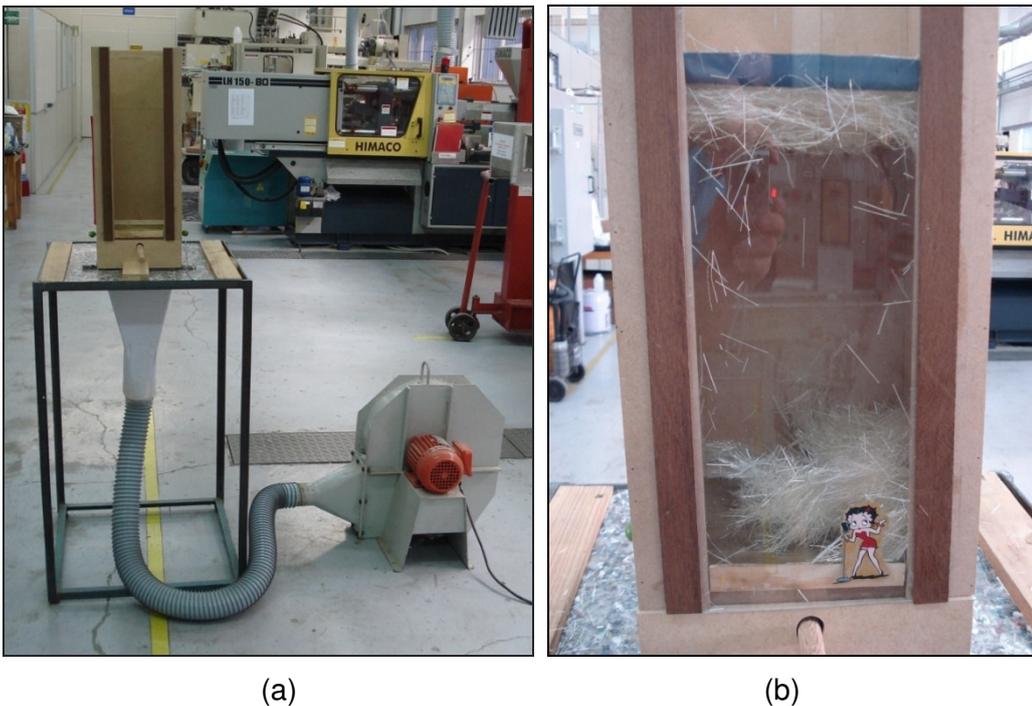


Figura 3.8 – Equipamento para a produção de mantas por leito fluidizado com ar (Método Leito-Ar): (a) equipamento e ventilador centrífugo (b) fibras aeradas formando a manta na tela de contenção superior

No final do processamento a maioria das fibras se encontrava na tela de contenção superior devido ao fluxo induzido de ar nas mesmas. Neste momento,

a tela de contenção inferior é elevada até aproximadamente 10 cm da tela de contenção superior. Neste momento, desliga-se o suprimento de ar e a manta, que estava na tela superior, caia por gravidade na tela inferior mantendo seu formato, sendo então retirada do aparato.

3.4.4 Método de Deposição de Fibras em Meio Vibracional

Neste método, as fibras são colocadas manualmente no topo de uma seqüência de três estágios. Cada estágio é semelhante a uma peneira e tem o objetivo de promover a orientação aleatória das fibras (Figura 3.9). Através da ação da gravidade e com o auxílio de um campo vibracional, as fibras são conduzidas à base do dispositivo (Figura 3.10).

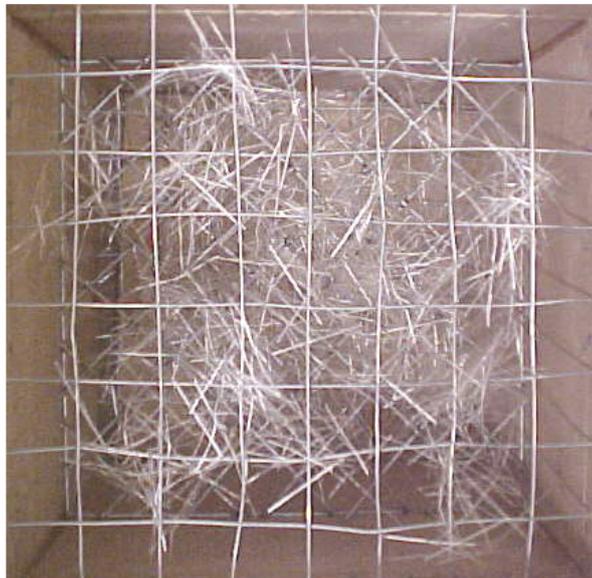


Figura 3.9 – Aspecto superior do equipamento, mostrando os estágios de orientação e as fibras

A vibração foi provocada por um equipamento geralmente utilizado para a separação granulométrica em peneiras. O nível de vibração selecionado foi de

100% da potência do equipamento, e as fibras permaneceram no aparato por 20 minutos para a acomodação na forma de manta.



Figura 3.10 - Dispositivo para o método de deposição de fibras em meio vibracional (Método Vibracional)

3.6 Rota de Ensaio Preliminar

Este conjunto de ensaios preliminares teve como objetivo nortear os trabalhos posteriores e buscar familiaridade com a confecção de mantas. Nesta etapa, buscou-se os primeiros subsídios para o trabalho com mantas e compósitos e estimou-se a viabilidade das rotas através dos resultados. Assim, foi

possível estudar as variáveis e padronizar os procedimentos de modo a reduzir erros operacionais e aumentar a confiabilidade para rotas seguintes.

As variáveis consideradas na rota de ensaios preliminar:

- a) Tamanho de fibra: 1, 3 e 5 cm;
- b) Tratamento superficial das fibras de sisal: não tratadas, lavadas com água destilada e tratada com solução de NaOH (2 mol.L^{-1});
- c) Processo de confecção de mantas: Manual (deposição manual de fibras);
- d) Ensaios: densidade, teor de vazios, absorção de água, tração, módulo elástico, impacto, MEV (microscopia eletrônica de varredura).

Primeiramente, as fibras de sisal (lote A) foram cortadas (em três comprimentos diferentes) e fracionadas em três partes: uma parte permaneceu sem tratamento de superfície (S/T), outra foi imersa em solução alcalina de hidróxido de sódio (NaOH), e a outra foi lavada com água destilada (H_2O). A fração volumétrica do reforço foi de 25% no total do compósito e este reforço foi composto por 100% de fibra de sisal. Foram feitas mantas em triplicata para cada condição e a nomenclatura usada mostrada pela Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Amostras para a rota de experimentos preliminares

Comprimento da Fibra de Sisal	Tratamento		
	S/T	NaOH	H_2O
1 cm	L1-ST	L1-NaOH	L1- H_2O
2 cm	L2-ST	L2-NaOH	L2- H_2O
3 cm	L3-ST	L3-NaOH	L3- H_2O

Parte das fibras que foram tratadas por NaOH foram banhadas na solução alcalina 2 mol.L^{-1} por 60 minutos, sendo em seguida lavadas em água corrente para a retirada de traços de hidróxido.

A outra parte das fibras de sisal foi imersa em água destilada por 10 minutos, com agitação ocasional das fibras. Foi retirada a água impura do béquer mantendo-se as fibras, recolocada mais uma vez a mesma quantidade de água destilada, e deixado para descansar por mais 20 minutos.

Para estes dois processos, seja tratamento superficial ou limpeza de fibra, foram utilizados béqueres de 4000 mL e bastão de vidro para agitação manual e separação das fibras. A proporção utilizada de fibra natural e líquido foi de 10g/L de água destilada.

Após a lavagem ou o tratamento, as fibras de sisal foram escorridas e espalhadas sobre bandejas de alumínio e colocadas na estufa para secagem (Figura 3.11). A temperatura de secagem foi de $105 \text{ }^\circ\text{C}$, durante 120 minutos, com circulação forçada de ar.



Figura 3.11 – Processo de secagem das fibras naturais

Secas, as fibras foram preparadas pelo método de disposição manual de fibras (A1) de forma aleatória. Após montadas, no molde 1, foram comprimidas por 1 h, a 2 MPa de pressão, em temperatura ambiente, formando-se assim a manta de 15 x 15 cm de área para o molde 1.

A técnica de fabricação dos compósitos utilizada foi a moldagem por compressão à quente. Como desmoldante, aplicou-se um óleo a base de silicone (Silicone spray, fornecido pela Mosar Indústria Química) na superfície do molde e sobre este foi depositado um filme de poli(cloreto) de vinila (PVC) comercial para inibir a adesão da resina curada com ao molde.

A resina líquida (isoftálica), já misturada com o iniciador, foi vertida no molde inferior. A manta de sisal foi cuidadosamente colocada sobre a resina e foi esticado mais um filme de PVC sobre a manta, seguido do fechamento do molde. O molde foi pressionado lentamente para a expulsão de bolhas de ar do interior do compósito, até que se alcançasse uma pressão de 1 MPa, à temperatura de 90°C por 95 min. A proporção de fibra de vidro e fibra de sisal no reforço foi variada e explícita nos itens 3.6, 3.7 e 3.8.

Após a cura, o molde foi resfriado até uma temperatura passível de manuseio com luvas (entre 50 e 60°C) e o compósito foi desmoldado com a ajuda de um formão. As dimensões das placas de compósitos produzidas nesta etapa foram de 15 x 15 x 0,3 cm (molde 1).

Os corpos de prova foram obtidos mediante o corte destas placas em serra-fita. As superfícies de corte sofreram lixamento a seco em politriz utilizando-se diferentes gramaturas de lixas (100, 150 e 200) e velocidade de 600 rpm, para a remoção das irregularidades provocadas pela serra.

3.6 Rota de Experimentos 1 – Parte 1

Na rota de experimentos 1 introduziu-se, além do Método Manual, o Método Água (deposição de fibras em fase aquosa) e uma variante do Método Manual, o Método Manual-lav (deposição manual de fibras – fibra de vidro lavada). Nestes métodos manteve-se o tratamento físico (lavagem) para a fibra de sisal, porém, para comparação das vias seca e úmida, o Método Manual-lav foi realizado com a fibra de vidro previamente lavada.

As variáveis consideradas para a rota de experimentos 1 (parte 1):

- a) Tamanho de fibra: 3 cm;
- b) Teor de fibra de vidro no reforço: 0, 25, 50, 75 e 100% (e seu complemento em fibra de sisal);
- c) Tratamento superficial das fibras de sisal: lavadas com água destilada;
- d) Tratamento superficial das fibras de vidro: sem tratamento, lavadas com água destilada;
- e) Processo de confecção de mantas: Manual, Manual-lav e Água;
- f) Ensaio: densidade, absorção de água, tração, módulo elástico, impacto e MEV (microscopia eletrônica de varredura).

As fibras de vidro e de sisal (lote B) foram cortadas e lavadas em água destilada por 10 minutos, com agitação ocasional das fibras. Terminado este tempo, foi retirada a água impura, e recolocada mais uma vez a mesma quantidade de água destilada, e deixado para descansar por mais 20 minutos. A relação água/fibra para a lavagem foi a mesma utilizada para a rota de ensaios preliminar, ou seja, 100 mL de água destilada para cada 1 g de fibra de sisal.

Para o Método Manual-lav, as fibras de vidro foram lavadas usando o mesmo procedimento das fibras de sisal. Após, foram secas em estufa com circulação de ar a 60°C por 180 minutos. Para determinação de temperatura e tempo de secagem fez-se a curva de secagem, até a estabilização da perda de massa. A lavagem das fibras sintéticas tem o intuito de comparar o método em via seca e um método em via aquosa.

A fração volumétrica total de reforço foi fixado em 25%. Este volume foi distribuído entre as fibras de vidro e de sisal, seguindo 5 composições diferentes, a saber:

- a) 1,00 de fibra de vidro e 0,00 de fibra de sisal (MA-0, AG-0 e ML-0);
- b) 0,75 de fibra de vidro e 0,25 de fibra de sisal (MA-25, AG-25 e ML-25);
- c) 0,50 de fibra de vidro e 0,50 de fibra de sisal (MA-50, AG-50 e ML-50);
- d) 0,25 de fibra de vidro e 0,75 de fibra de sisal (MA-75, AG-75 e ML-75);
- e) 0,00 de fibra de vidro e 1,00 fibra de sisal (MA-100, AG-100 e ML-100).

A nomenclatura utilizada para as amostras nesta rota de experimentos, incluindo as informações sobre o tipo de manta utilizado, ser vista na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Amostras para a rota de experimentos 1 (parte 1)

Teor de Fibra de Vidro (%)	Método		
	Manual	Água	Manual-lav
0	MA-0	AG-0	ML-0
25	MA-25	AG-25	ML-25
50	MA-50	AG-50	ML-50
75	MA-75	AG-75	ML-75
100	MA-100	AG-100	ML-100

Os compósitos foram preparados pelo processo de moldagem por compressão a quente utilizando para esta rota o molde 2. Este foi impregnado

com cera de carnaúba (Tec Glace-N, WAX OL8, Polinox do Brasil) como desmoldante e após foi polido. A cada compósito, foi utilizada uma camada de filme de polietileno de baixa densidade (LDPE) em contato com a superfície do molde e a tampa, com o intuito de inibir a adesão da resina curada com o molde e facilitar a remoção da peça.

Parte da resina líquida (ortoftálica, do lote 1), já misturada ao iniciador, foi vertida no molde inferior. Sobre esta, foi cuidadosamente depositada a manta e, após, o restante da resina foi vertido sobre a manta. Com o molde fechado, o mesmo foi pressionado lentamente para a expulsão de bolhas de ar do interior do compósito, até que se alcançasse uma pressão de 2 MPa. A moldagem foi conduzida à temperatura de 90 °C por 95 min.

Após a cura, o compósito foi retirado rapidamente do molde, sendo resfriado em uma prensa fria até a temperatura ambiente por no máximo 15 minutos. As dimensões das placas de compósitos produzidas nesta etapa foram de 17 × 17 × 0,3 cm (molde 2). Os corpos de prova foram obtidos mediante corte das placas em serra-fita e lixamento a seco em politriz, utilizando-se diferentes tipos de lixa, para a remoção de irregularidades provocadas pelo corte.

3.7 Rota de Experimentos 1 – Parte 2

As condições de processo para a parte 2 rota de experimentos 1 foram similares as da rota 1. Porém, na parte 2, utilizam-se os métodos Leito-ar (arranjo de fibras por leito fluidizado) e Vibracional (deposição de fibras em meio

vibracional), reduz-se as opções teor de fibra de vidro e elimina-se os ensaios físicos densidade e absorção de água.

As variáveis consideradas na rota de experimentos 1 (Parte 2) foram:

- a) Tamanho de fibra: 3 cm;
- b) Teor de fibra de vidro no reforço: 0, 50 e 100% (e seu complemento em fibra de sisal);
- c) Tratamento superficial das fibras de sisal: lavadas com água destilada;
- d) Tratamento superficial das fibras de vidro: sem tratamento (original da indústria);
- e) Processos de confecção de mantas: Leito-ar e Vibracional;
- f) Ensaio: resistência à tração, módulo elástico e resistência ao impacto.

Tanto as fibras de sisal quanto as de vidro foram cortadas em 3 cm, segundo a apresentado na rota 1 (parte 1). A limpeza e a secagem das fibras também repetiram-se conforme rota anterior. O volume de reforço também foi fixado em 25% do total do compósito. Este volume foi distribuído conforme as composições da fibra de vidro e de sisal. Foram utilizadas 3 frações volumétricas de reforço:

- a) 1,00 de fibra de vidro e 0,00 de fibra de sisal (AR-0 e VB-0);
- b) 0,50 de fibra de vidro e 0,50 de fibra de sisal (AR-50 e VB-50);
- c) 0,00 de fibra de vidro e 1,00 de fibra de sisal (AR-100 e VB-100).

Tabela 3.4 – Amostras para a rota de experimentos 1 (parte 2)

Teor de Fibra de Vidro (%)	Método	
	Leito-ar	Vibracional
0	AR-0	VB-0
50	AR-50	VB-50
100	AR-100	VB-100

Os compósitos foram preparados pelo processo de moldagem por compressão a quente utilizando para esta rota o molde 2, utilizando a resina poliéster ortoftálica de lote 2. Os procedimentos para a confecção, corte e tratamento dos corpos de prova foram idênticos ao citado na rota de experimentos (parte 1).

3.8 Rota de Experimentos 2

Nesta rota de experimento foi realizado um estudo comparativo das propriedades físicas e mecânicas dos métodos e alteradas algumas condições de processo em relação à rota de experimentos 1. Reduziu-se a temperatura de moldagem de 90°C (rota 1) para 60°C (rota 2), mas tempo de residência do compósito no molde permaneceu em 95 min. A resina utilizada para esta etapa foi a resina poliéster ortoftálica do lote 3.

Dos métodos de confecção de manta utilizados para esta rota, foram escolhidos 4 já mencionados na rota 1 (partes 1 e 2): Manual (deposição manual de fibras), Água (deposição de fibras em fase aquosa), Leito-ar (arranjo de fibras por leito fluidizado) e Vibracional (deposição de fibras em meio vibracional). Além destes, foi utilizado uma variante do Método Água, o Método Etanol (deposição de fibras em fase etílica) onde houve a substituição da água destilada por etanol comercial.

As variáveis consideradas nesta rota de experimentos 2 foram:

- a) Tamanho de fibra: 3 cm;
- b) Teor de fibras no reforço: 50 % de fibra de vidro e 50% de fibra sisal;

- c) Tratamento superficial das fibras de sisal: lavadas com água destilada;
- d) Tratamento superficial das fibras de vidro: sem tratamento;
- e) Processos de confecção de mantas: Manual, Água, Etanol, Leito-ar e Vibracional;
- g) Ensaio: distribuição de massa específica, resistência à tração, módulo elástico e resistência ao impacto.

As fibras foram cortadas e limpas da mesma maneira que na rota 1 (partes 1 e 2). O volume de reforço permaneceu em 25% do total do compósito. Nesta etapa foram utilizados, somente, reforços híbridos contendo a fração volumétrica de 0,50 de fibra de vidro e 0,50 de fibra de sisal (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 – Amostras para a rota de experimentos 2

	Método				
Teor de Fibra de vidro (%)	Manual	Água	Etanol	Leito-ar	Vibracional
50	MA-50	AG-50	ET-50	AR-50	VB-50

3.9 Ensaio Físicos de Caracterização

A massa específica dos materiais (resina, fibras de vidro e sisal e compósito) foi calculada conforme a norma técnica ASTM 792⁽⁶¹⁾. Este método se baseia no princípio de Arquimedes onde: “todo o corpo mergulhado em um fluido em repouso sofre, por este fluido, uma força vertical para cima, cuja intensidade é igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo”.

Neste experimento foi usada uma balança analítica, um suporte, um béquer e uma haste com cesto. O fluído utilizado foi acetato de n-butila, de massa específica de $0,814 \text{ g/cm}^3$. A região de onde foram extraídas as amostras pode ser observada na Figura 3.12. Esta disposição dos corpos de prova na placa também proporcionou a avaliação dos métodos de confecção de mantas pela distribuição de massa específica do compósito. A partir do dados obtidos nos ensaios de massa específica também é possível calcular o teor de vazios através das equações da norma ASTM D 2734 ⁽⁶²⁾.

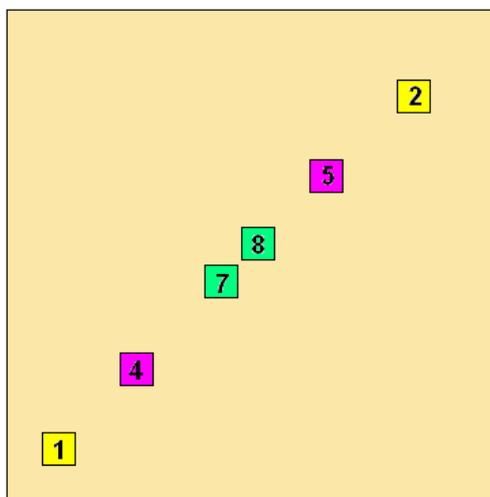


Figura 3.12 – Diagrama da localização das amostras para massa específica extraídas em uma placa de compósito de dimensões de 17 x 17 cm

O ensaio de absorção de água foi realizado conforme norma ASTM D 570 ⁽⁶³⁾. Para este ensaio foram extraídas 6 amostras de placa-compósito com dimensões de 1,5 x 1,5 x 0,3 cm. O procedimento escolhido foi o de imersão em água à temperatura ambiente por 48 horas. Após o tempo de imersão as amostras foram enxugadas em papel absorvente previamente umedecido e pesadas. Os cálculos foram feitos relacionando-se as massas úmidas e secas.

Todos os corpos de prova para ensaio físicos foram acondicionados, por 48 horas, e ensaiados a uma temperatura de 23°C e 50% de umidade relativa do ar

conforme respectivas normas. Os valores médios, bem como o desvio padrão, foram calculados para o número de corpos de prova exigido em cada norma destes ensaios.

3.10 Ensaio Mecânicos

Os ensaios de resistência à tração foram realizados conforme os procedimentos indicados na norma ASTM D 3039⁽⁶⁴⁾, com corpos de prova do tipo I, porém com tamanhos adaptados ao tamanho das placas de compósito obtido. Os corpos de prova utilizados possuíam a dimensão de 15 x 1,5 x 0,3 cm. Para este ensaio foi utilizada uma máquina de ensaios universal (EMIC DL 3000), com velocidade de ensaio de 5 mm/min (experimentos preliminares) e 2 mm/min (demais rotas). Os dados de módulo elástico foram obtidos deste ensaio com o acoplamento de um extensômetro com alcance de 80 mm de comprimento do corpo de prova.

Os ensaios de resistência ao impacto Izod, sem entalhe, foram realizados em equipamento CEAST Resil 25, de acordo com a norma ASTM D 256⁽⁶⁵⁾. O pendulo utilizado foi de 4 J (intermediário dos pêndulos de 2 J e 5 J, utilizados para compósitos de fibras de sisal e vidro, respectivamente) de modo a se obter sensibilidade para amostras híbridas.

Todos os corpos de prova para ensaio mecânicos foram acondicionados a uma temperatura de 23°C e 50% de umidade relativa do ar por 48 horas. Os ensaios foram realizados nas mesmas condições de temperatura e umidade, conforme normas, e os valores médios, bem como o desvio padrão, foram

calculados para o número de corpos de prova sugerido em cada norma de ensaio mecânico.

3.10 Microscopia Eletrônica de Varredura

A análise da morfologia das fibras de sisal e vidro, e dos compósitos de resina poliéster reforçado com as mantas produzidas por estas fibras foi realizada por microscópio eletrônico de varredura. Foi utilizado o equipamento do Centro de Microscopia da UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) da marca Jeol, modelo 6060, com diversas ampliações. Foram obtidas microscopias das fibras e de superfícies de compósitos de corpos de prova de impacto fraturados, sendo todos os objetos de análise metalizados com ouro. Buscou-se caracterizar e identificar a topografia das fibras sob os diversos tratamentos e analisar as interfaces de adesão fibra-matriz nas regiões de quebra dos compósitos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Rota de Experimentos Preliminares

No início deste trabalho foram realizados testes preliminares com objetivo de avaliar e conhecer o processo de obtenção de compósitos utilizando fibras vegetais. Foram confeccionados compósitos com fibras tratadas e fibras não tratadas. Variou-se o tratamento da fibra de sisal com água destilada e com solução alcalina de NaOH (2 mol.L^{-1}). Nestes experimentos foram utilizadas fibras em 3 diferentes tamanhos: 1, 3 e 5 cm.

Foram analisadas as propriedades físicas das amostras como densidade e absorção de água, em seguida as propriedades mecânicas como resistência à tração, módulo elástico e resistência ao impacto.

4.2.1 Propriedades Físicas

Os compósitos foram caracterizados através de determinação de massa específica como pode ser visto na Figura 4.1. A análise desta figura (Figura 4.1) mostra que a massa específica nos compósitos reforçados com fibra de sisal não

sofreu uma variação expressiva em seus valores. Desta forma conclui-se que o tratamento químico e os diferentes comprimentos de fibra não influenciaram significativamente nos valores de massa específica dos compósitos com fibras naturais.

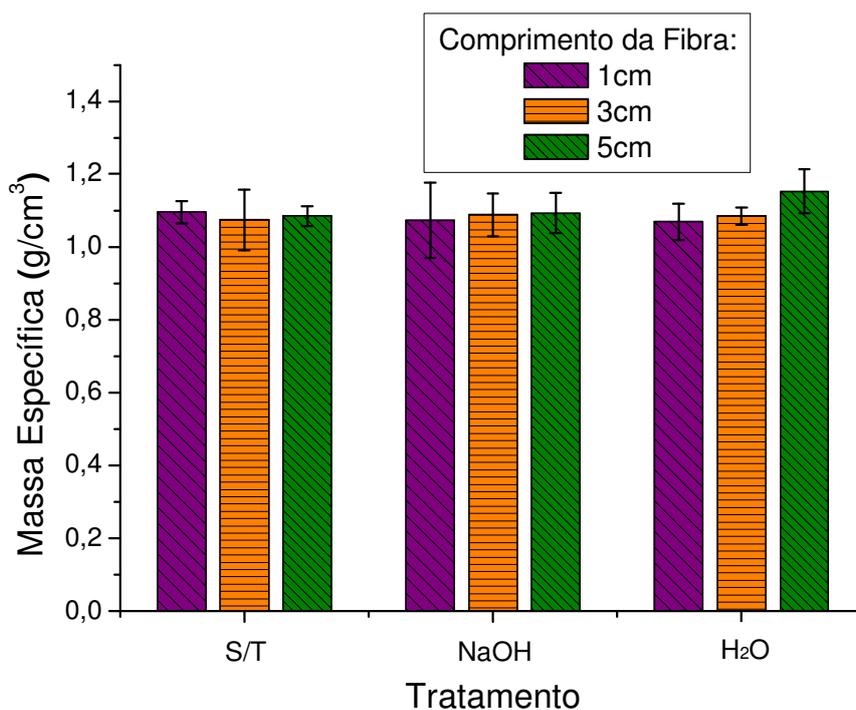


Figura 4.1 – Massa específica de compósitos com fibras de sisal sem tratamento (S/T), tratadas com solução alcalina (NaOH) e com água destilada (H₂O), todos para o Método Manual

O mesmo comportamento da Figura 4.1 pode-se observar na Figura 4.2, para teor de vazios, onde não ocorreram oscilações significativas nos resultados em função do tratamento e, também, em função do comprimento de fibra. Este comportamento mostra, indiretamente, uma tendência para os valores de massa específica das amostras. Em contra-partida, os valores dos desvios-padrão se mostraram altos, indicando falta de homogeneidade entre as amostras.

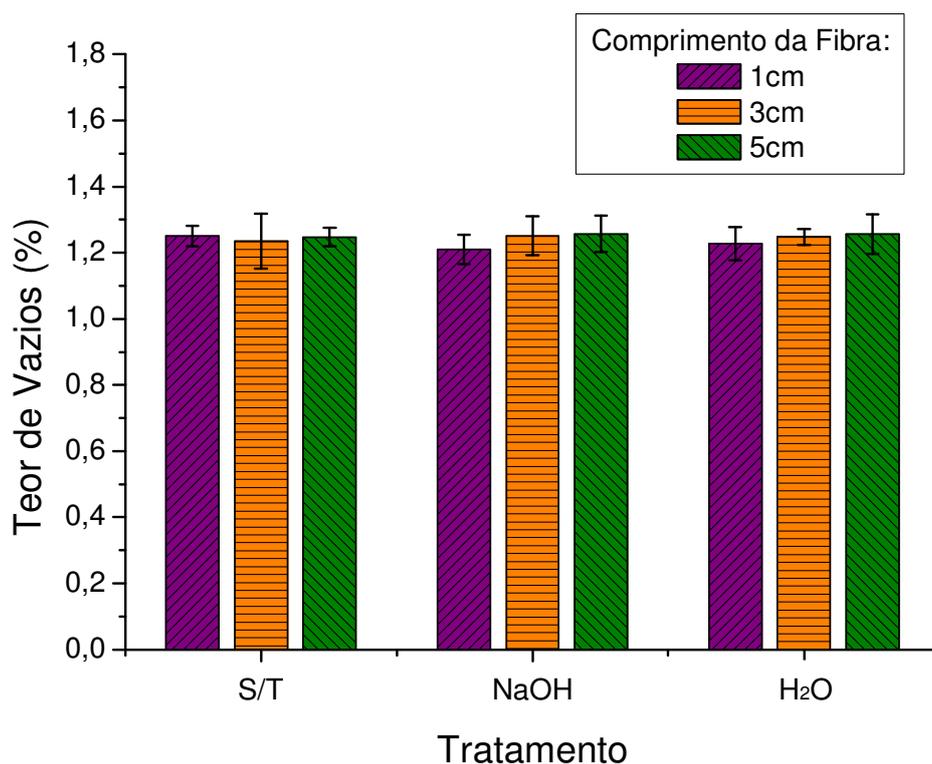


Figura 4.2 – Teor de vazios de compósitos com fibras de sisal sem tratamento (S/T), tratadas com solução alcalina (NaOH) e com água destilada (H₂O), todos para o Método Manual

Quanto à absorção de água nos compósitos (Figura 4.3 e Tabela 4.1), apesar do grande desvio-padrão encontrado nos resultados, observou-se que os compósitos de fibras sem tratamento absorvem substancialmente mais água que os compósitos de fibras tratadas. Rowell e colaboradores ⁽⁶⁶⁾ submeteram sisal sob diferentes tratamentos em água e observaram várias curvas de absorção de água para cada amostra e mostraram as diferentes formas de interação da fibra com o tempo de imersão desta com o solvente.

Os resultados para absorção de água, tanto com a limpeza com a água destilada como com o tratamento químico de soda cáustica, podem ser explicados pela possível remoção da lignina e outros componentes presentes na superfície da

fibra vegetal tornando a fibra mais porosa e rugosa. Esta nova topografia da fibra pode torná-la mais hidrofóbica para as fibras tratadas.

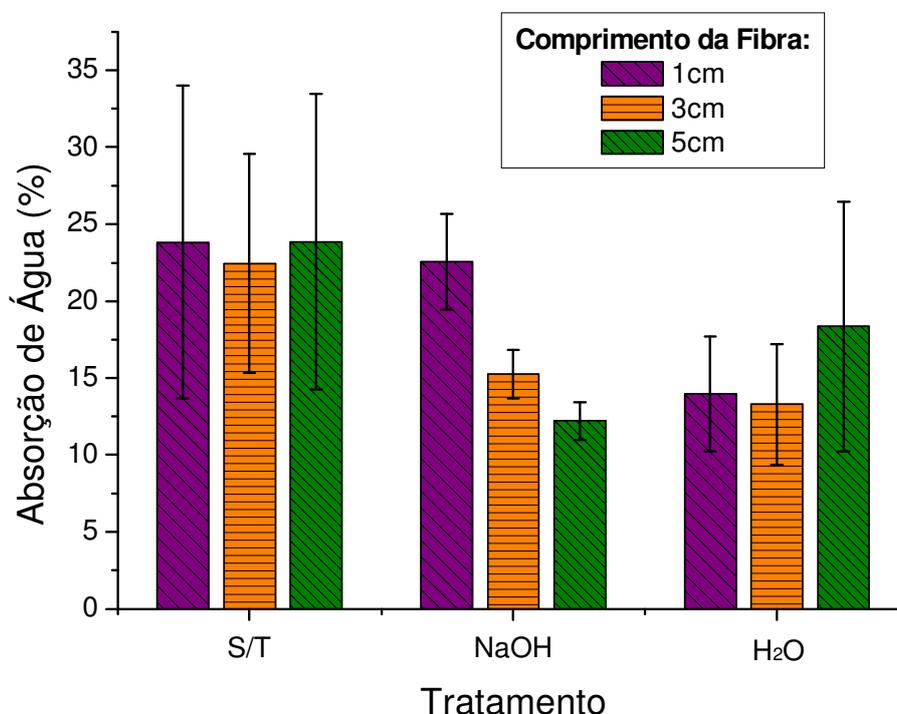


Figura 4.3 – Absorção de água em compósitos com fibras de sisal sem tratamento (S/T), tratadas com solução alcalina (NaOH) e com água destilada (H₂O)

De modo a confirmar estes resultados, fez-se o ensaio de absorção da água na fibra de sisal, isoladamente. Na Tabela 4.1, que é um comparativo entre a fibra de sisal e os diferentes compósitos, nota-se que a absorção de água é menor para as fibras tratadas com solução de NaOH e com solução aquosa. Esta queda na absorção reflete que os dois tratamentos afetaram ou modificaram a morfologia superficial da fibra vegetal. Segundo Wambua e colaboradores ⁽⁴⁴⁾ a fibra de sisal *in natura*, absorve em média 11% da umidade atmosférica sendo esperados valores maiores para estas fibras no ensaio de imersão em água.

Tabela 4.1 – Valores de absorção de água para fibras de sisal e para compósitos reforçados com fibra de sisal de diferentes tamanhos (1, 3 e 5 cm) e tratamentos (*in natura*, solução alcalina e água destilada)

	Absorção de Água (%)			
	Fibras de Sisal	Compósitos		
		1 cm	3 cm	5 cm
S/T	123,5 ± 7,8	23,8 ± 10,2	22,5 ± 7,1	23,9 ± 9,6
NaOH	120,1 ± 9,5	22,6 ± 3,1	15,3 ± 1,6	12,2 ± 1,2
H ₂ O	116,9 ± 6,1	14,0 ± 3,7	13,3 ± 3,9	18,4 ± 8,1

Pode-se observar, em geral, que para todos os ensaios físicos os valores de desvio-padrão são muito grandes. Estes desvios se devem as irregularidades características da fibra vegetal que reforçaram o compósito, conforme comenta Kuruvilla e Matoso ⁽⁵²⁾ em seu artigo de revisão sobre sisal. Foi realizada a caracterização das fibras de sisal utilizadas neste trabalho via MEV, e observadas as irregularidades nas superfícies das mesmas (Figura 4.4). As micrografias das fibras tratadas são mostradas na sessão posterior.

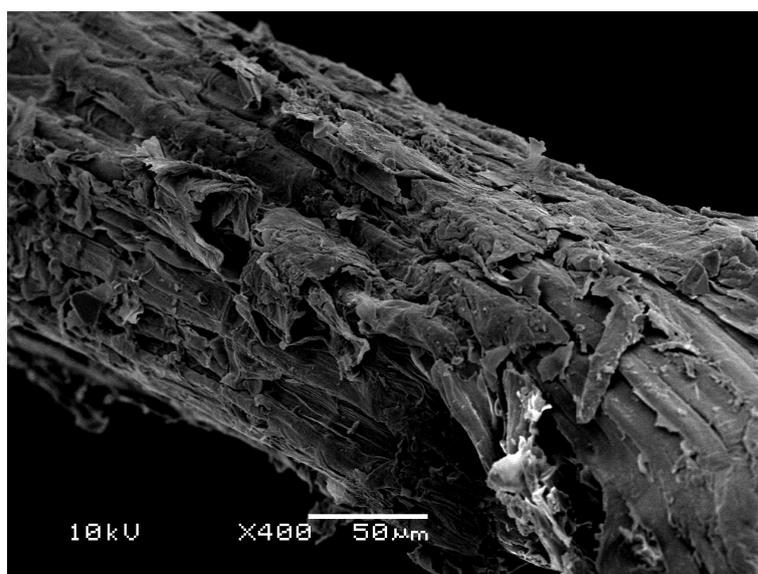


Figura 4.4 – Micrografia da fibra de sisal *in natura* (x 400)

4.2.2 Propriedades Mecânicas

Os resultados dos ensaios mecânicos, especialmente de resistência à tração, dão uma indicação indireta da eficiência da adesão do reforço (tratado ou não superficialmente) com a matriz polimérica ⁽⁵⁴⁾. Como observa-se nas Figuras 4.5 e 4.6, os valores de resistência à tração e de alongamento na ruptura para amostras com fibras tratadas com água destilada foram comparáveis em relação aos resultados dos compósitos reforçados por fibras tratadas com solução de NaOH.

De fato, embora o tratamento alcalino promova vários sítios apolares (devido a ligação dos grupos hidroxila) para a ancoragem da resina na superfície da fibra, ele por sua vez, atenua o diâmetro da fibra pela remoção de camadas superficiais de sujeiras e componentes da fibra que tem estrutura lignocelulósica e pode eventualmente levar ao enfraquecimento do reforço vegetal ^(28, 66).

A explicação para o desempenho favorável dos compósitos de fibras tratadas com água provavelmente está em um tratamento menos agressivo que o alcalino, todavia a lavagem garante a retirada de compostos (como agentes anti-mofo, anti-roedores e corantes) e resíduos oriundos das etapas de produção industrial do fio de sisal que podem prejudicar a adesão da fibra no meio polimérico. A análise via MEV (Figuras 4.4, 4.7 e 4.8) demonstra a alteração da morfologia superficial da fibra de sisal com o tratamento (aumento da rugosidade), confirmando essa hipótese.

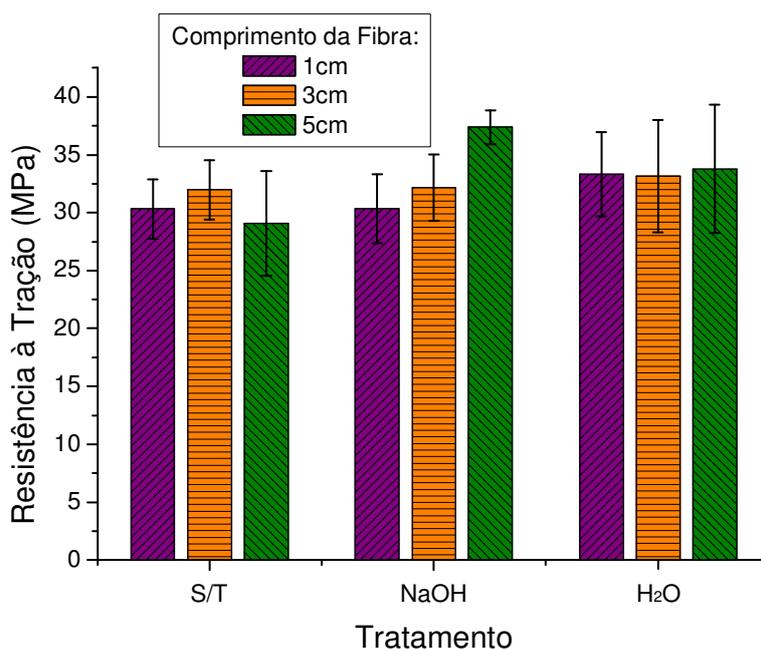


Figura 4.5 – Resistência à tração de compósitos com fibras de sisal sem tratamento, tratadas com água destilada e com solução alcalina

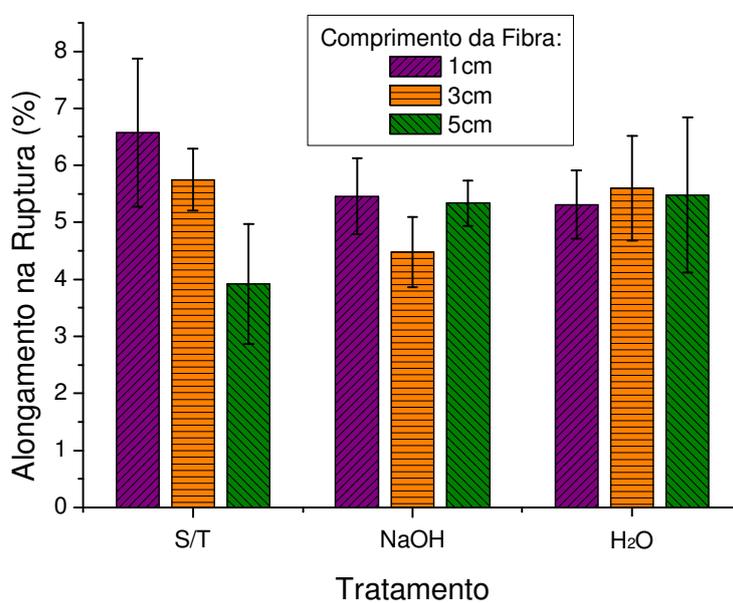


Figura 4.6 – Alongamento na ruptura em compósitos com fibras de sisal sem tratamento, tratadas com água destilada e com solução alcalina

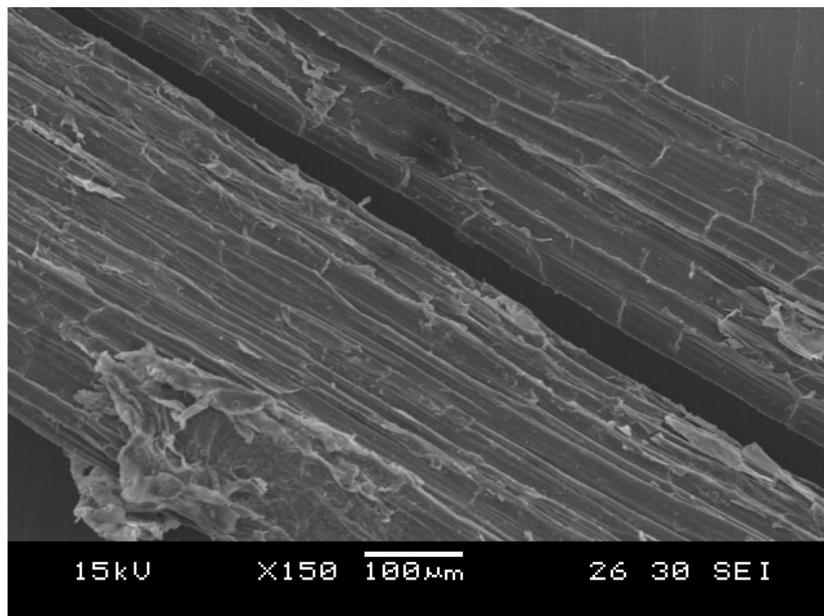


Figura 4.7 - Micrografia da fibra de sisal lavada com água destilada (x 150)

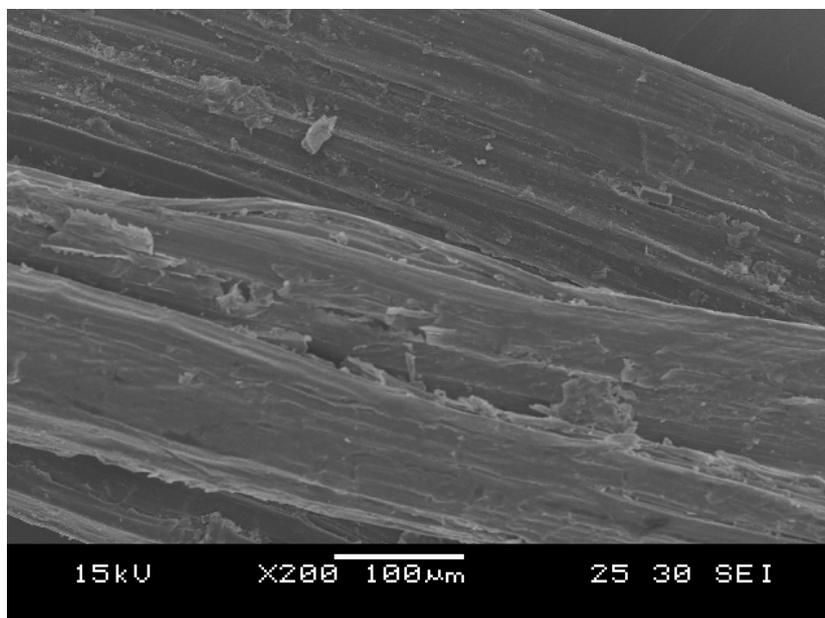


Figura 4.8 – Micrografia da fibra de sisal com tratamento de solução de NaOH (x 200)

Na Figura 4.5, observa-se em geral aumento nos valores de resistência à tração nos compósitos com fibras tratadas com solução de NaOH 2 mol.L⁻¹ e nas fibras lavadas com água destilada. Os compósitos confeccionados com fibras de 1 e 3 cm mantiveram o mesmo comportamento mecânico, nos diferentes tratamentos. Os compósitos contendo fibras de 5 cm tiveram um comportamento mais aleatório, dificultando observar uma tendência de desempenho. Este comportamento pode ser justificado em função da dificuldade da dispersão das fibras de 5 cm no interior do molde utilizado neste trabalho. A cavidade do molde onde foram prensados as mantas e os compósitos possuía a dimensão de 15 x 15 cm. Foi observado que durante o processo de preparação dos compósitos as bordas laterais das mantas com fibras de 5 cm possuíam um arranjo diferenciado das fibras do centro do manta. Esta dificuldade gerou compósitos menos homogêneos.

A Figura 4.9 mostra os dados obtidos para módulo elástico dos compósitos com fibra de sisal com diferentes tratamentos e comprimentos. Observa-se pouca variação nos resultados apresentados para esta propriedade. Assim, para o sisal, tanto o tratamento quanto o tamanho da fibra não interferiu no módulo elástico dos compósitos.

Os resultados de resistência ao impacto (Figura 4.10) mostram que houve uma queda nos valores de resistência ao impacto nos compósitos com fibra tratada com NaOH. Esta queda pode ser explicada pela degradação da fibra devido ao ataque químico que modificou a estrutura da fibra, causando fragilidade⁽⁶⁷⁾. A variação dos valores de desvio-padrão da Figura 4.10 são desvios intrínsecos ao tipo de reforço utilizado (natural).

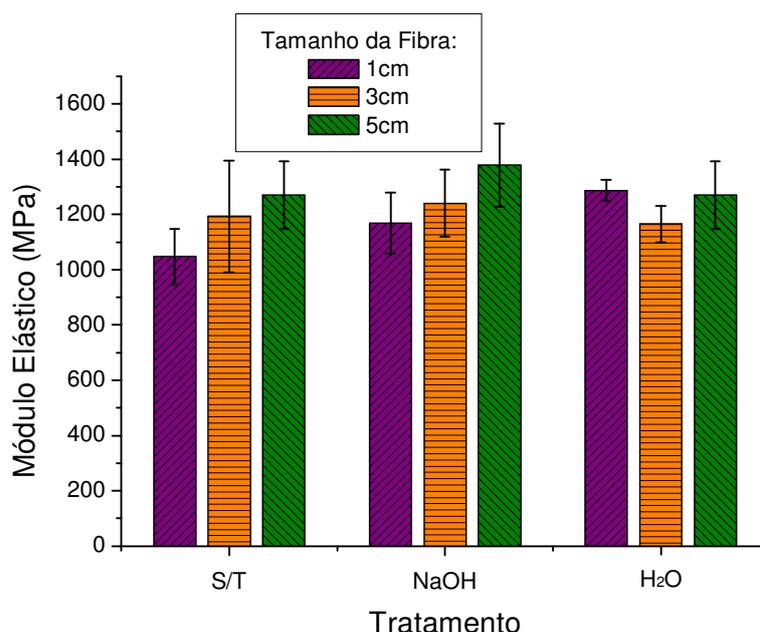


Figura 4.9 – Módulo elástico em compósitos com fibras de sisal sem tratamento, tratadas com água destilada e com solução alcalina

A literatura cita ⁽⁵⁵⁾ que o tratamento químico das fibras implica em uma maior interação entre a fibra e a matriz polimérica. Isto refletiria em uma transferência de esforço da matriz (que é mais frágil), para a fibra (que é mais dúctil e resistente), como foi observado nos compósitos tratados com água se comparados com os sem tratamento. Porém observa-se que as condições de tratamento utilizadas por Kuruvilla e Mattoso ⁽⁵²⁾ foram mais brandas que as utilizadas no presente trabalho (concentração alcalina menor). Em função dos bons resultados dos compósitos reforçados por mantas de fibras tratadas com água destilada, optou-se por abandonar o tratamento com condições alcalinas. Nota-se, além disso, que o tratamento utilizando água destilada não gera efluentes químicos e possui menor custo.

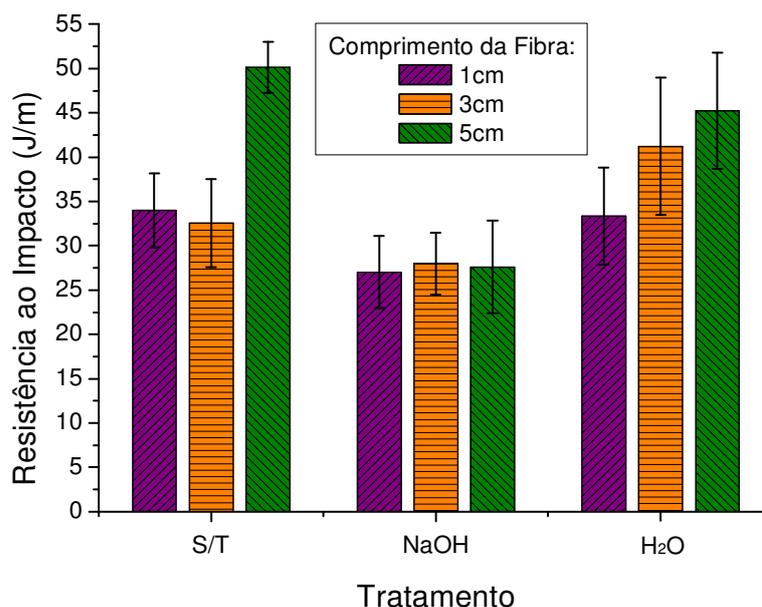


Figura 4.10 – Resistência ao impacto em compósitos com fibras de sisal sem tratamento, tratadas com água destilada e com solução alcalina

Observou-se, também que fibras mais longas resultam em uma maior absorção de energia no impacto, pois possibilitam maior dissipação de energia ao longo de seu comprimento ^(45, 49), e por conseqüência, da sua área interfacial. Assim, é possível observar que o tratamento das fibras por água destilada promove um maior grau de adesão fibra-matriz em comparação às fibras não tratadas.

4.2.4 Considerações Gerais

Visto a grande interferência dos parâmetros práticos do processo de obtenção de compósitos poliméricos no seu desempenho final, este tópico tem a função de comentar sobre dificuldades e possíveis modificações a serem realizadas nos procedimentos das próximas etapas.

O tamanho de fibra escolhido foi o de 3 cm, pois acomodou melhor as fibras no molde em função da sua área útil, obtendo-se melhor reprodutibilidade que a fibra de 5 cm. Observou-se que os valores obtidos para compósitos de fibras de 5 cm não foram superiores o suficiente em comparação aos resultados de 3 cm para justificar a utilização de fibras de 5 cm. Quanto ao tratamento de fibra para as próximas etapas deste trabalho, escolheu-se o de água destilada, em função dos bons resultados obtidos, conforme já discutido.

O ensaio de teor de vazios não foi realizado nos experimentos subseqüentes devido aos altos desvios-padrão obtidos nos resultados dos ensaios preliminares. Este erro é atribuído, também, ao cálculo de massa específica teórica pois utilizou-se o valor de massa específica das fibras medido experimentalmente para o cálculo do teor de vazios. Todavia, os valores de massa específica já possuem erros que se acumulam dificultando a obtenção de dados reprodutíveis.

Para os ensaios preliminares, a temperatura e o tempo de secagem das fibras foram escolhidos observando a temperatura de ebulição da água (105°C por 2h). Porém, com o avanço do estudo observou-se que esta temperatura poderia agredir componentes da fibra vegetal ^(66, 67). Nas rotas de ensaios subseqüentes optou-se por reduzir a temperatura de secagem de 105°C (rota preliminar) para 60°C. Para se conseguir uma redução da umidade equivalente, aumentou-se o tempo de 90 (rota preliminar) para 180 min, assegurando a evaporação de toda a água superficial da fibra e manteve-se a circulação forçada de ar.

Quanto à parte de confecção do compósito, observaram-se possíveis aspectos que poderiam ser melhorados. Primeiramente, devido à dificuldade de extração do compósito curado do molde e de possíveis danos causados na

amostra neste procedimento, optou-se por trocar o molde 1 por outro projetado com extratores (molde 2), de maior cavidade, maior facilidade de manuseio e conseqüentemente possibilitou o aumento da velocidade de produção de compósitos devido a redução no tempo de espera e preparo.

Trocou-se também o tipo de desmoldante empregado, pois o óleo de silicone não era eficiente no desmolde e seu custo era elevado. Em substituição, utilizou-se a lubrificação por cera de carnaúba no molde cuja reaplicação só se faz necessária a cada 10 moldagens, aproximadamente.

O filme de poli(cloreto de vinila) (PVC) comercial, utilizado nos testes preliminares, foi substituído pelo filme de polietileno de baixa densidade (LDPE). Observou-se que o filme de LDPE teve menor adesão que PVC à resina poliéster e ao molde, o que facilitou também o desmolde.

Nos testes subseqüentes, também optou-se por substituir a resina isoftálica pela ortoftálica em virtude das possibilidades reais de aplicação e custo, visto que a resina isoftálica tem propriedades pouco superiores que a ortoftálica ⁽²²⁾, não alterando de forma significativa as propriedades mecânicas dos compósitos obtidos.

A forma de inserção da resina poliéster na rota preliminar foi apenas na parte inferior do molde. Já nas outras rotas de experimentos que seguem, utilizou-se metade da resina na parte inferior do molde, depositou-se a manta e o restante da resina foi vertido sobre a manta. Este procedimento foi utilizado para diminuir o empenamento observado nas placas iniciais.

4.3 Rota de Experimentos 1 – Parte 1

A rota de experimentos 1 foi o início do trabalho em termos do desenvolvimento de métodos de confecção de mantas híbridas. A partir desta etapa o método de fabricação de mantas é definido como a variável principal de estudo. Nesta fase foram desenvolvidos e avaliados os seguintes métodos: Manual (deposição de manual de fibras), Água (deposição de fibras em fase líquida – Água destilada) e Manual-Lav (deposição de manual de fibras – Fibra de vidro lavada). O desempenho das mantas foi avaliado através da confecção de compósitos. A seguir as propriedades dos mesmos são discutidas.

Os objetivos desta rota são a análise da interferência do teor de fibra natural sobre o compósito híbrido, a influência da água destilada sobre o *sizing* da fibra de vidro através do desempenho do compósito e a análise comparativa entre os métodos de confecção de mantas. O *sizing* é uma substância (líquida) aplicada à fibra de vidro durante a manufatura deste. Segundo Feih e colaboradores ⁽⁶⁸⁾, o *sizing* é o agente de ligação entre a superfície da fibra de vidro e a matriz polimérica.

4.3.1 Propriedades Físicas

A Figura 4.11 mostra a massa específica dos compósitos em função do teor de fibra de vidro na manta. Pode ser observado que há uma tendência de

aumento da massa específica com o aumento de teor de fibra de vidro. Este acréscimo se manteve considerando todos os processos em separado. Em geral, propriedades que não dependem da morfologia tendem a seguir a regra da mistura.

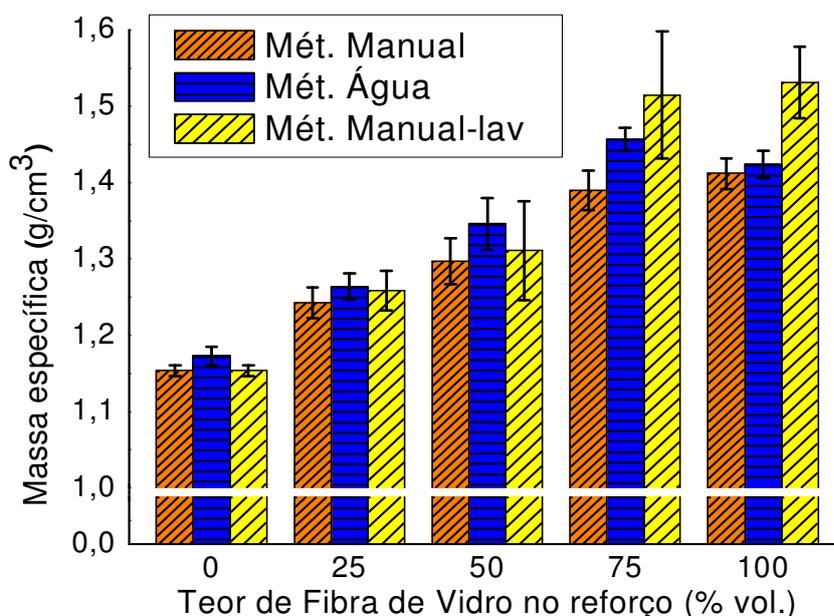


Figura 4.11 – Massa específica dos compósitos em função do de teor de fibra de vidro na manta, considerando os três métodos de fabricação de reforço

A análise da Figura 4.11 apresenta uma oscilação dos valores de massa específica das amostras nos diferentes métodos de confecção. O aumento do teor de vidro nos reforços gera um aumento no erro da massa específica determinada. As maiores variações foram observadas em teores elevados de fibra de vidro, como os de 75 e 100% de fibra de vidro. Estes resultados podem ser explicados devido a perdas de reforço durante a produção e manuseio das mantas e deslocamento de fibras para uma região do compósito. Mantas onde predomina a fibra de vidro requerem mais cuidados com manuseio, pois a fibra de vidro possui baixo fator de atrito. Quanto à absorção de água nos compósitos (Figura 4.12) é nítido o comportamento mais higroscópico da fibra de sisal em relação à fibra de

vidro ⁽⁴⁴⁾. O aumento do teor de fibra de vidro no reforço diminui a absorção de água nos compósitos. Os compósitos cujo reforço é constituído apenas de fibra vegetal absorvem, em média, 15 vezes mais água que os compósitos de apenas fibra de vidro, como observado na Figura 4.12.

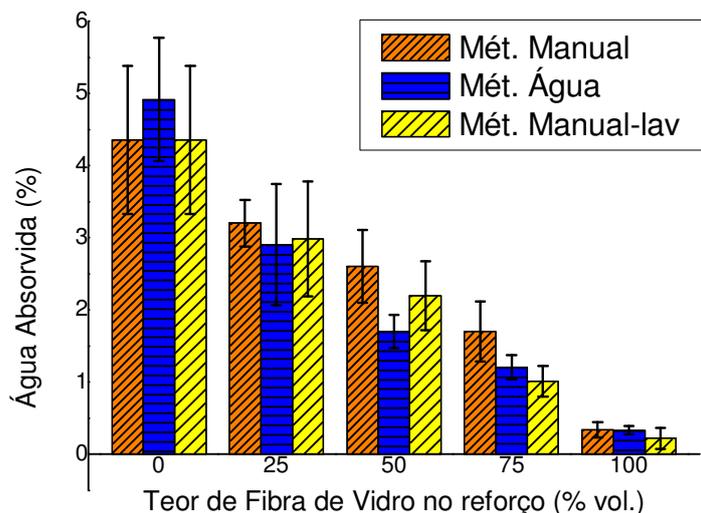


Figura 4.12 – Absorção de água em compósitos em função do teor de fibra de vidro, considerando os três métodos de fabricação de reforço

A análise da Figura 4.12, comparando-se o método Manual e o método Manual-lav, ainda mostra que a lavagem de fibra de vidro influencia nos valores de absorção de água. Observou-se que, para amostras contendo fibra de vidro, durante a fabricação da manta pelo método Água, houve alteração da tensão superficial da fase aquosa formando espuma. Este é um indicativo que aditivos da fibra de vidro foram removidos durante o ensaio. Conclui-se, que a imersão da fibra de vidro em água pode interferir ou até mesmo remover parte do *sizing* pré-aplicado a fibra como confirmado nas Figuras 4.13 e 4.14 e corroborado por Brows e colaboradores ⁽⁶⁹⁾. Este estudo afirma que o *sizing* é uma mistura solúvel em água contendo lubrificante, um formador de película e um agente de acoplamento.

Observa-se, que os compósitos com fibra de vidro lavada absorvem menos água que os compósitos com fibra de vidro não lavada. Este fato se justifica, também, pela remoção de parte do sizing no processo de confecção de mantas utilizando o meio aquoso. Como referido por Brown e colaboradores ⁽⁶⁹⁾ o *sizing* é solúvel em meio aquoso, por conseqüência possui características higroscópicas. Este comportamento também é corroborado pelos resultados obtidos para absorção de água dos compósitos do método Água (Figura 4.12).

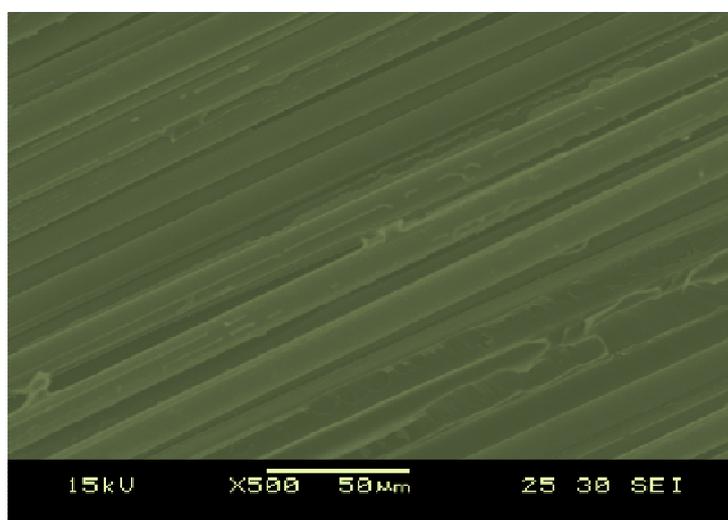


Figura 4.13 - Micrografia das fibras de vidro comercial, antes da lavagem

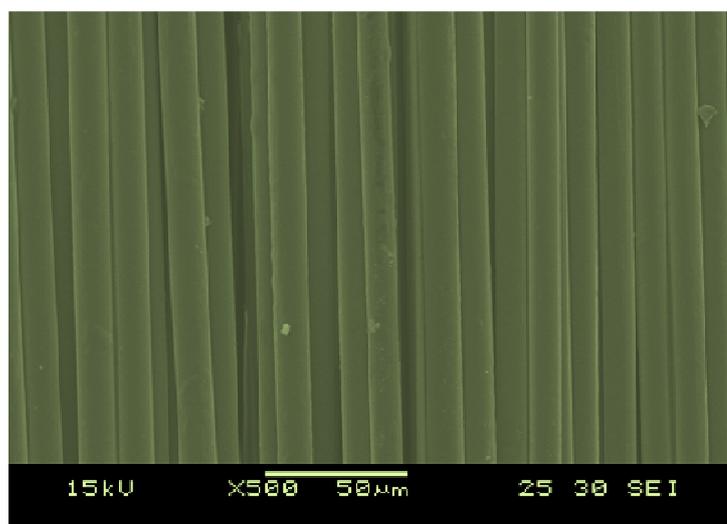


Figura 4.14 – Micrografia das fibras de vidro lavadas com água destilada

A partir dos dados da Figura 4.12 pode-se esboçar um modelo de comportamento de absorção de água nos compósitos. Nota-se um comportamento linear de absorção de acordo com o teor de fibra. As equações de reta e seus respectivos coeficientes de determinação são os seguintes:

- a) Método Manual: $y = 4,205 - 0,0410x$; $R^2 = -0,9957$
- b) Método Água: $y = 4,386 - 0,0435x$; $R^2 = -0,9682$
- c) Método Manual-lav: $y = 4,349 - 0,0381x$; $R^2 = -0,9919$

Considerando que no ajuste linear, os coeficientes de determinação (R^2) são próximos à unidade, vê-se que a propriedade de absorção de água é compatível com a regra das misturas, para os diferentes métodos.

4.3.2 Propriedades Mecânicas

As Figuras 4.15 e 4.16 apresentam as curvas medianas tensão *versus* deformação obtida nos ensaios de tração dos compósitos reforçados com diferentes teores de fibra de vidro, obtidas pelo método manual. Na Figura 4.16, as curvas são mostradas em deformação específica inferior à 0,2 %. Este procedimento foi adotado para se observar melhor os valores de módulo elástico, através da inclinação da reta de ajustes dos pontos. Observou-se que à medida que se adiciona fibra de vidro à formulação do reforço, ocorre o aumento nos valores de módulo elástico. Ou seja, com o aumento do teor da fibra de vidro aumenta a rigidez dos compósitos.

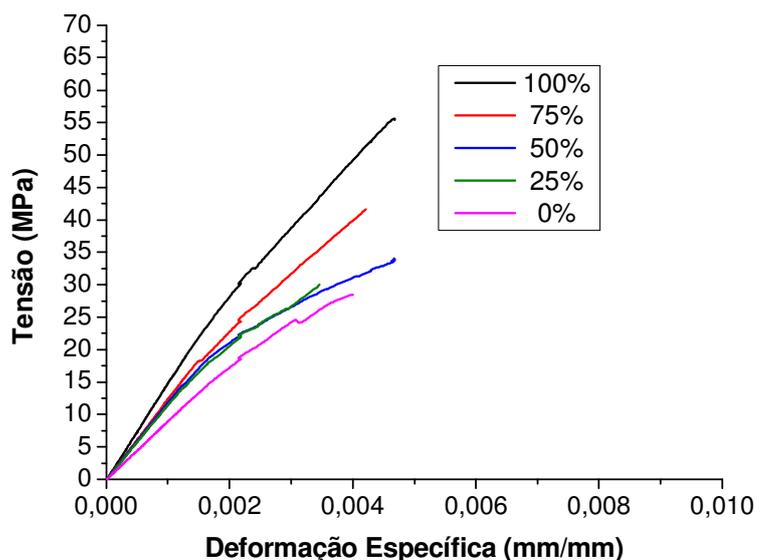


Figura 4.15 – Curvas de tensão em função da deformação específica dos compósitos para diversos teores de fibra de vidro (método Manual)

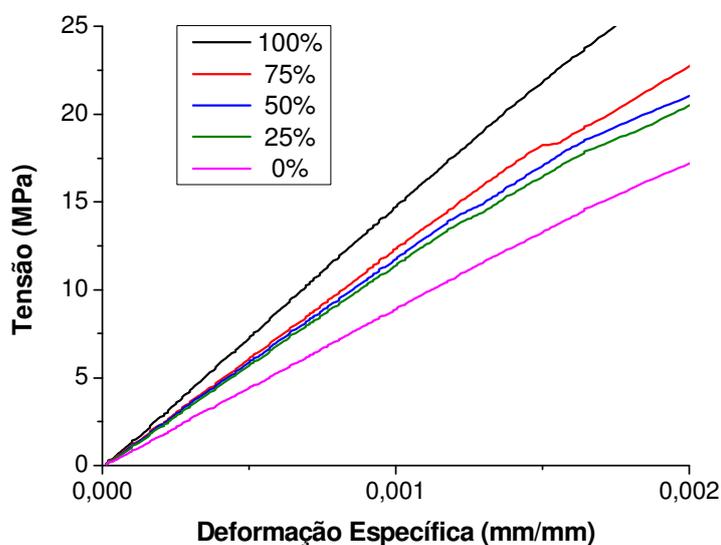


Figura 4.16 – Curvas de tensão em função da deformação específica dos compósitos para diversos teores de fibra de vidro (método A) – deformação de 0,002 mm/mm

Os resultados de resistência a tração (Figura 4.17) indicam que o acréscimo no teor de fibra de vidro aumenta também os valores de resistência à tração. Este fato justifica o uso de compósitos híbridos, pois a adição de fibra de

vidro gerou uma melhoria nas propriedades mecânicas dos compósitos obtidos. Analisando o desempenho dos métodos, pode-se observar que para altos teores de fibra de vidro, os métodos Manual e Manual-lav foram mais eficientes em termos de propriedades mecânicas.

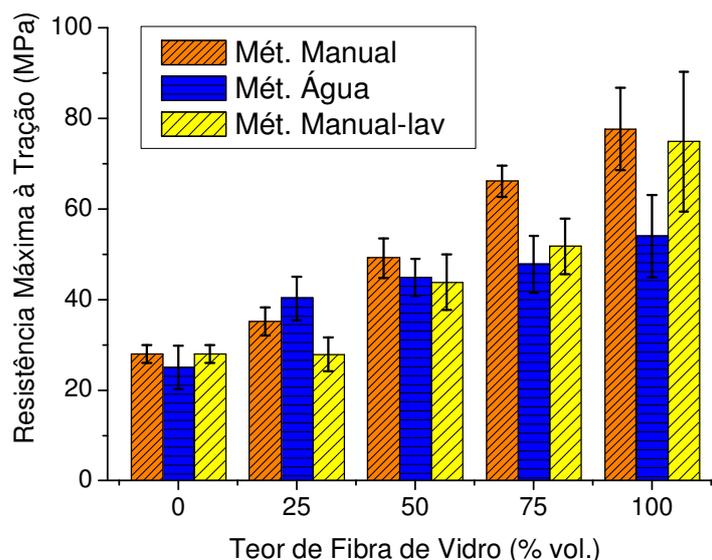


Figura 4.17 – Resistência à tração em função do teor de fibra de vidro na manta, considerando os três métodos de fabricação de reforço

As mantas confeccionadas pelo método Água (Figura 4.18), ficaram mais compactas do que as mantas confeccionadas pelos métodos Manual e Manual-lav (Figura 4.19). A altura média das mantas recém fabricadas foi de 1 cm para o método Água e 3 cm para os métodos Manual e Manual-lav. As mantas confeccionadas pelo método água, contendo altos teores de fibra de vidro (75 e 100%) possuíam alturas médias inferiores a 1cm. Acredita-se que devido a maior compactação das mantas produzidas pelo método Água, houve dificuldade de permeação da resina pela manta durante o processamento (principalmente para mantas com teor superior a 50% de fibra de vidro), produzindo propriedades

mecânicas inferiores. A análise dos ensaios de módulo elástico e resistência ao impacto reproduzem esta hipótese (Figuras 4.21 e 4.22).

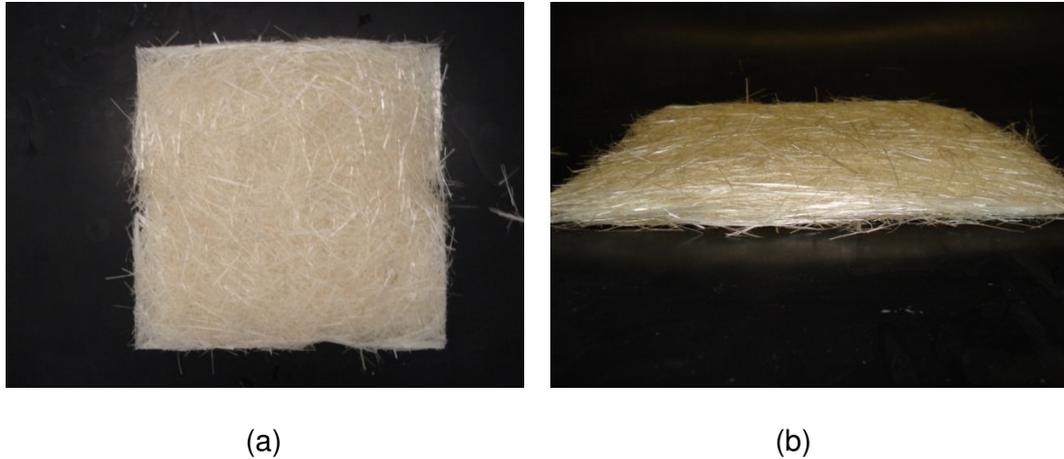


Figura 4.18 – Manta (50% vidro / 50% sisal) produzida pelo Método Água
(a) vista superior (b) vista lateral



Figura 4.19 – Manta (50% vidro / 50% sisal) produzida pelo método Manual e Manual-lav (a) vista superior (b) vista lateral

Pela análise das propriedades de resistência à tração (Figura 4.17) e módulo elástico (Figura 4.21) nota-se uma clara diferença entre os métodos, que é melhor evidenciada nas composições de reforço ricas em fibra de vidro. O tipo de método de fabricação de reforço utilizado não interfere significativamente em amostras com teores inferiores a 50% de fibra de vidro. Os compósitos com

predominância de fibra de sisal mostraram uma maior reprodutibilidade, pois os valores de desvio padrão foram menores até 50% de fibra de vidro no reforço. É possível ainda interpretar que a fibra de vidro coopera positivamente em compósitos de mantas onde predomina a fibra vegetal. Por outro lado, nos compósitos contendo 75 e 100% de fibra de vidro, o sisal parece atuar como impureza, com baixo nível de reprodutibilidade. Na Figura 4.20 observa-se a diferença de morfologia da fibra de sisal e da fibra de vidro o que gera o baixo índice de reprodutibilidade em altos teores de fibra de vidro no reforço. Observa-se também que o diâmetro da fibra de sisal é bem maior que o diâmetro da fibra de vidro.

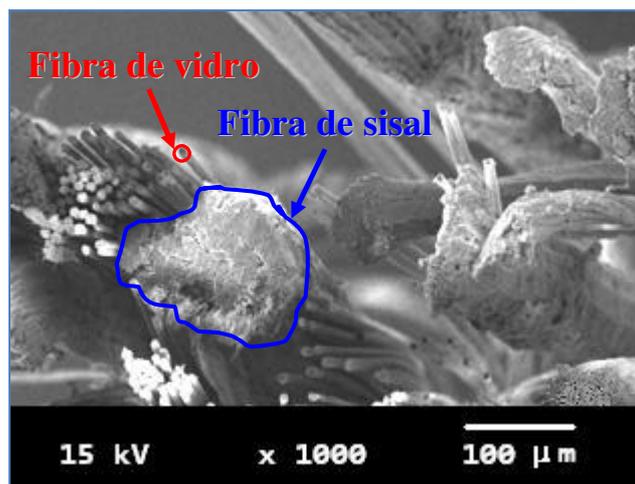


Figura 4.20 – Micrografia da seção transversal de compósito fraturado contendo 75% de fibra de vidro no reforço (x 100)

Na Figura 4.21 pode-se observar o aumento dos valores de módulo em função do aumento do teor de fibra de vidro. Este fato já era esperado, visto que o módulo elástico da fibra de vidro isolado é superior ao da fibra de sisal.

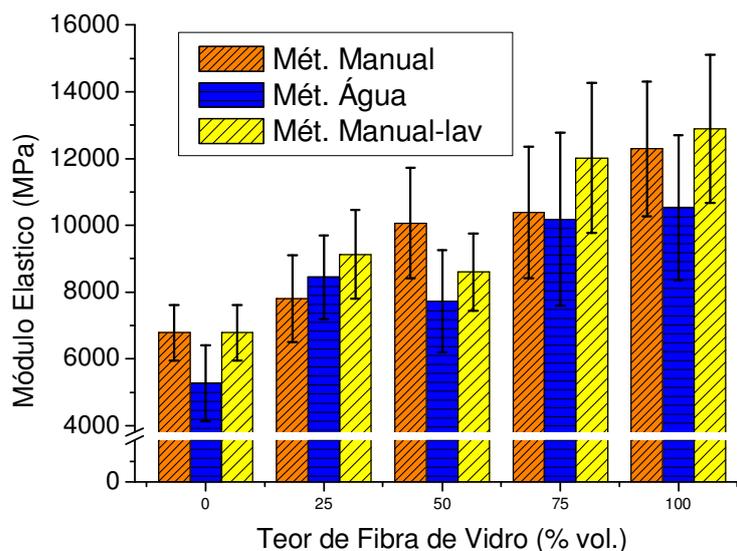


Figura 4.21 – Módulo elástico em tração em função do teor de fibra de vidro, considerando os três métodos de fabricação de reforço

A Figura 4.22, resistência ao impacto *versus* teor de fibra de vidro no reforço, apresenta uma clara tendência a um aumento da resistência em compósitos com o aumento de fibra de vidro na composição do reforço. Considerando que a adesão com a matriz é superior com fibra de vidro em relação à fibra vegetal, pode-se concluir que, pelo menos, parte da energia está sendo transferida da matriz à fibra durante o impacto. Se não houvesse dissipação de energia, os resultados seriam constantes e de valor próximo à resistência o impacto da resina poliéster pura ⁽⁴⁹⁾. Da mesma forma, anteriormente, foi observado que os compósitos com baixo teor de fibra de vidro (25 e 50%) se mostraram mais reprodutíveis.

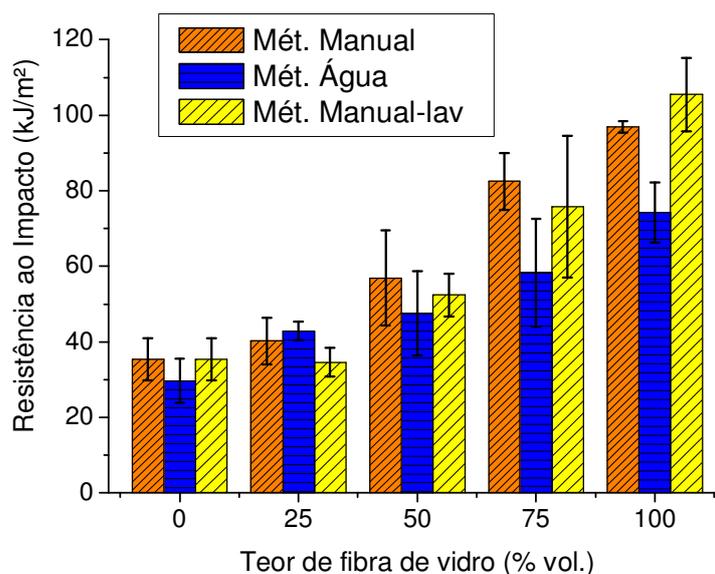


Figura 4.22 – Resistência ao impacto em função do teor de fibra de vidro na manta, considerando os três métodos de fabricação de reforço

Outro aspecto mostrado pelas Figuras 4.18, 4.19 e 4.20 é a diferença nos resultados entre o método Água e os métodos Manual e Manual-lav. Cabe lembrar que ocorrem dois fenômenos pertinentes na produção de mantas pelo método Água; o primeiro é a compactação das fibras verticalmente devido à pressão exercida pela água sobre a manta; e o segundo, é a aglomeração das fibras de vidro em contato com o meio líquido (água). A pouca afinidade das fibras no meio aquoso repercute em uma maior afinidade entre as fibras, juntando-as. Ou seja, num meio de pouca afinidade as fibras tendem a se unir afastando-se do meio. Este comportamento é similar ao fenômeno da coalescência das partículas de óleo em meio aquoso. Esta união entre as fibras, bem destacada nas fibras de vidro (que são hidrofóbicas em comparação com as fibras vegetais) corroboram as diferenças mostradas nas Figuras 4.17, 4.21 e 4.22, entre os métodos para amostras de teores acima de 50% de fibra sintética.

Como resultado, temos formações agrupadas de fibra de vidro, em mantas fabricadas pelo método Água. Estes feixes dificultam a impregnação pela matriz polimérica das fibras, ficando algumas fibras mais internas não recobertas pela resina. Estes feixes de fibra dentro da matriz polimérica prejudicam a total transferência de esforços, como ocorre com as fibras isoladamente distribuídas. Isto acarreta em diminuição da razão de aspecto da unidade de reforço, gerando uma diminuição na transferência de esforço fibra-matriz, que responde negativamente na resistência mecânica ao impacto. Este comportamento também poderia ser esperado nas amostras que utilizaram mantas elaboradas pelo método Manual-lav já que as fibras de vidro também foram lavadas, porém a diferença nos resultados entre o método Manual-lav e o método Manual não foi muito significativa.

A partir da avaliação das propriedades mecânicas do método Água, observou-se a necessidade de desenvolver processos mais eficientes na produção de mantas que será discutido na rota de experimentos 1 – parte 2.

4.4 Rota de Experimentos 1 – Parte 2

Em função das dificuldades encontradas no Método Manual-lav, conforme discutido anteriormente, foram desenvolvidos dois métodos alternativos: Método Leito-ar (arranjo de fibras via leito fluidizado) e o Método Vibracional (deposição de fibras em meio vibracional) que não envolvem a utilização de água.

Considerando-se apenas o teor de fibra de vidro nos compósitos, pode-se observar que houve uma linearidade dos resultados obtidos nos resultados dos métodos Manual, Manual-lav e Água para todas as propriedades.

A análise dos compósitos na rota de experimentos 1 (parte 1) mostrou que os compósitos com teores de 50% de fibra de vidro possuem propriedades superiores a dos compósitos contendo somente sisal. Estes compósitos demonstraram um bom nível reprodutibilidade e facilidade de fabricação não sendo necessário o uso de ligantes para estas mantas (agentes ligantes, como goma, são substâncias de caráter adesivo adicionadas às mantas no processo industrial cuja função é manter a integridade e a forma da manta). Associados a estas duas colocações tem-se que o custo do sisal na forma de fibra, a granel, é da ordem de R\$ 2,00/kg, assim o uso de 50% de sisal em compósitos para uso na produção de pequenas peças na indústria automotiva gera uma economia de 33% em matéria-prima. Assim, nesta etapa optou-se por utilizar apenas três tipos de composição de reforço: 0, 50 e 100% de teor de fibra de vidro, em volume.

4.4.1 Propriedades Mecânicas

A análise da Figura 4.25 mostra que a adição de fibra de vidro no total do reforço aumenta a resistência à tração do compósito híbrido sisal/vidro, quando esta é comparada aos compósitos produzidos com reforço com a fibra de sisal como predominante, como havia sido observado na rota de experimentos 1 – parte 1.

O método Leito-ar, para os compósitos híbridos, mostrou resultados superiores em comparação com o método Vibracional, analisando-se principalmente compósitos híbridos. Uma possibilidade para este resultado é que o método Leito-ar causa um alto grau de anisotropia nos reforços híbridos devido ao processo de aeração das fibras. A análise das Figuras 4.23 e 4.24 corrobora este fato pois observa-se que a manta produzida pelo método Leito-ar é mais simétrica e com melhor dispersão das fibras de vidro.



Figura 4.23 - Manta produzida pelo Método Leito-ar: (a) vista lateral e (b) vista superior

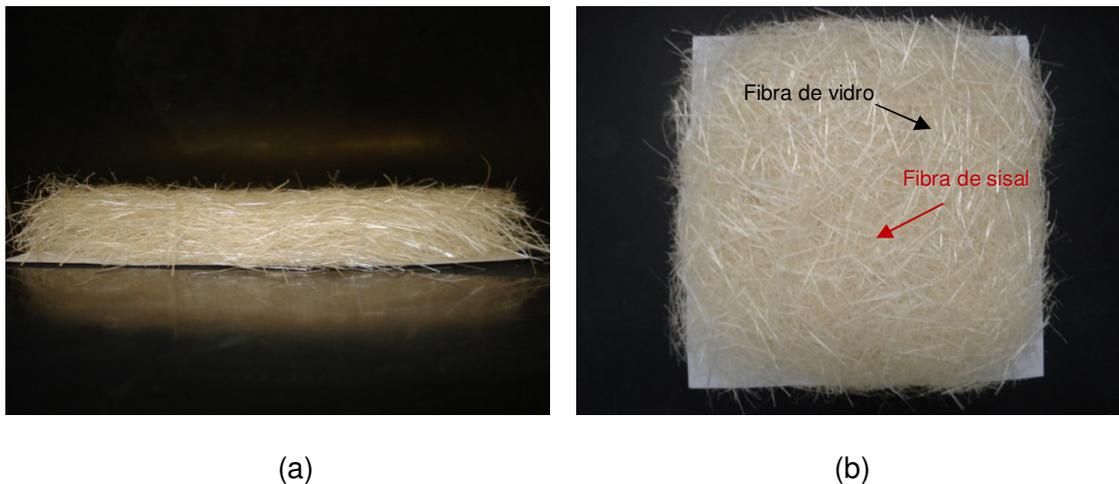


Figura 4.24 - Manta produzida pelo Método Vibracional: (a) vista lateral e (b) vista superior.

Observa-se novamente (como na rota 1 - parte1), que as mantas confeccionadas com 100% de fibra de vidro são de difícil reprodução em comparação com as mantas contendo sisal. Nas mantas onde há apenas fibra de vidro, que tem superfície lisa, há o deslocamento das fibras na manta no momento do processamento, o que gera mantas com distribuição heterogênea de fibras, falta de confiabilidade e altos valores de desvio-padrão nos resultados.

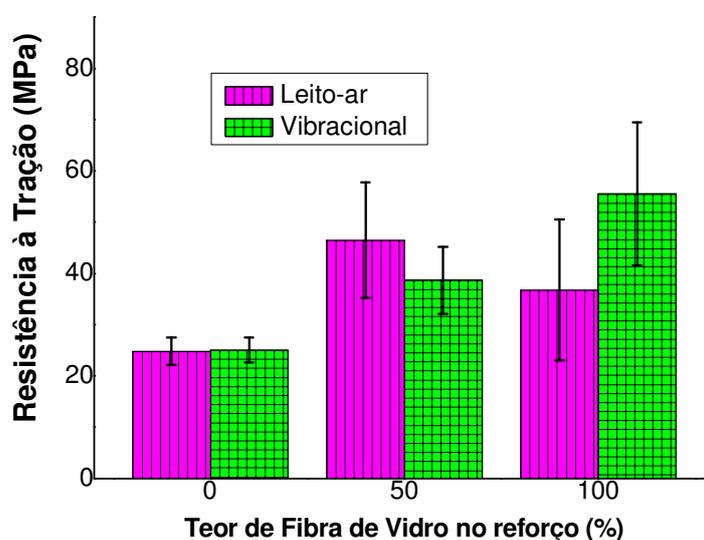


Figura 4.25 – Resistência à tração dos compósitos como função da composição e do método de preparação da manta

A análise do módulo elástico (Figura 4.26) mostra que para os compósitos híbridos, o método Leito-ar também foi o mais adequado. O efeito híbrido de sisal e vidro para o módulo elástico dos compósitos, observado na Figura 4.25 para tração, também se reproduz para a propriedade de módulo elástico como se pode ver na Figura 4.26.

Em um compósito híbrido, as propriedades dependem principalmente do módulo elástico e da porcentagem de alongamento no ponto de ruptura das fibras que reforçam o compósito. O módulo elástico da fibra de vidro é muito maior que

da fibra vegetal, no caso, o sisal. Ou seja, a ductibilidade, ou grau de extensão da fibra de vidro é baixo comparado a do sisal. Isto resulta em fratura frágil (pouco dúctil) e em baixa deformação da fibra de vidro, a qual transfere uma alta tensão para a fibra de sisal que possui baixa resistência à tração. Este mecanismo gera falhas em regiões da manta e, conseqüentemente, a falha do compósito.

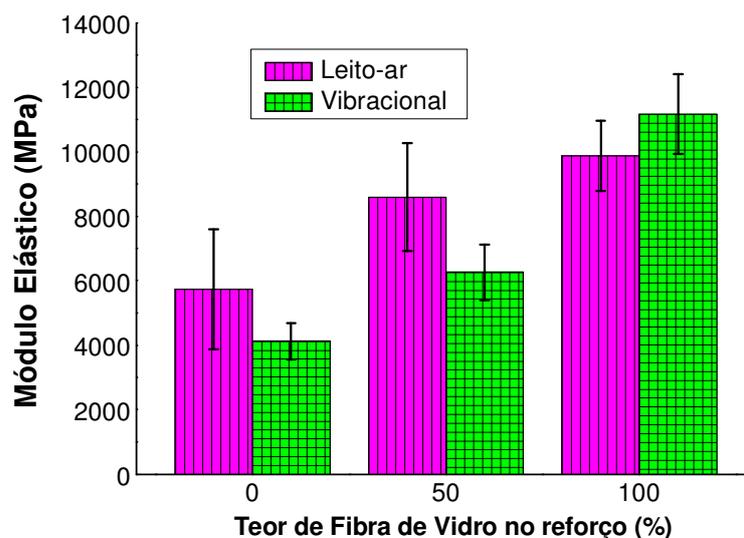


Figura 4.26 – Módulo elástico dos compósitos como função da composição e do método de preparação da manta

A transferência de energia da resina poliéster para as fibras no ensaio de resistência ao impacto dos compósitos é mostrada na Figura 4.27. A análise dos resultados para compósitos híbridos não demonstrou vantagem de um método de confecção em relação ao outro.

A análise das propriedades mecânicas mostrou que o método Leito-ar apresentou melhores resultados nos compósitos híbridos, comparando-se com o método Vibracional. Estes resultados podem ser justificados devido a melhor dispersão das fibras de vidro nas mantas híbridas, conforme já discutido anteriormente (Figuras 4.23 e 4.24).

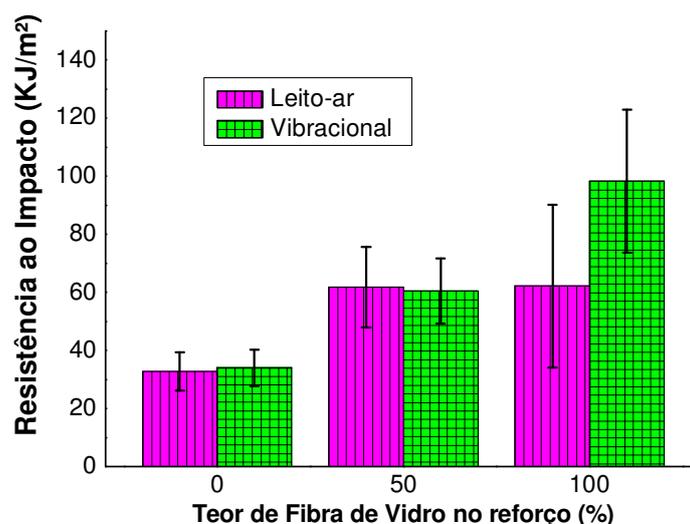


Figura 4.27– Resistência ao impacto nos compósitos como função da composição e do método de preparação da manta

Observa-se nas Figuras 4.26 e 4.27 uma tendência definida e crescente em relação à composição de fibra de vidro no reforço. Entretanto, cabe notar que para todas as amostras onde há 100% de fibra de vidro os resultados não são reproduzíveis. Esperava-se que os resultados de compósitos somente com fibras de sisal obtivessem maiores valores de desvio-padrão que os de fibra sintética, devido à natureza da fibra. Entretanto a forma de preparação das mantas demonstrou maior interferência que o tipo de material que compõe as fibras. Ou seja, os altos valores de desvio-padrão para amostras contendo apenas fibra de vidro se devem a má distribuição das fibras na manta, e não a origem das fibras. Como já foi discutido neste trabalho, as fibras de vidro são escorregadias em função do baixo teor de atrito. Assim há dificuldade de assentamento das fibras de vidro na manta no momento da confecção dos compósitos e se faz necessário uso de um agente ligante para as mantas de fibra de vidro. A composição adotada neste trabalho (50% de fibra de vidro) tem a vantagem, em função da rugosidade

natural do sisal, de não necessitar o uso de agente ligante para manter a integridade das mantas.

Entretanto, os valores dos compósitos obtidos ficaram aquém dos valores da literatura e da rota de experimentos 1. Para averiguar de forma mais efetiva a eficiência entre os métodos Manual, Manual-lav e Água entre os métodos Leito-ar e Vibracional, foi adquirido um novo lote resina poliéster para os experimentos realizados na rota de experimentos 2.

4.5 Rota de Experimentos 2

Nesta rota de experimentos foi realizado um estudo comparativo das propriedades físicas e mecânicas dos métodos e alteradas algumas condições de processo em relação à rota de experimentos 1. Houve uma redução na temperatura de processamento de 90°C para 60°C, mas manteve-se o tempo de residência em 95 min. Esta alteração foi realizada com o intuito de diminuir a velocidade de cura da resina e melhorar o grau de impregnação da manta. A mudança da temperatura da resina foi determinada através de ensaios de tempo de gel para a respectiva resina e para esta etapa foi utilizada resina poliéster ortoftálica do lote 3.

A análise dos métodos desenvolvidos mostrou que o método Água apresentava problemas de dispersão das fibras. As fibras de vidro são segregadas em relação às fibras de sisal em função de sua característica hidrofóbica. Foram realizados testes com diferentes fluídos: etanol e água e se observou que as fibras de vidro imersas em etanol obtiveram uma boa dispersão

(Figura 4.28). A seguir, na Figura 4.29 se observa a manta produzida pelo método Etanol. Desta forma, foi introduzido um novo método denominado Etanol (deposição de fibras em fase líquida – etanol) nesta rota de experimentos. Para esta etapa, foram utilizados apenas compósitos híbridos contendo 50% de fibra de vidro no reforço, sendo o reforço 25% do total do compósito.

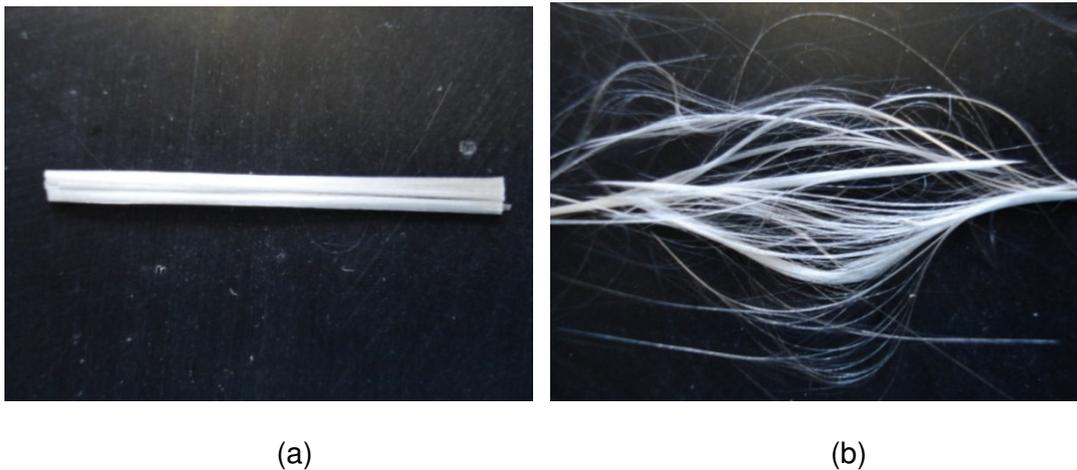


Figura 4.28 – Fibras de vidro após imersão em: (a) água destilada e (b) etanol comercial

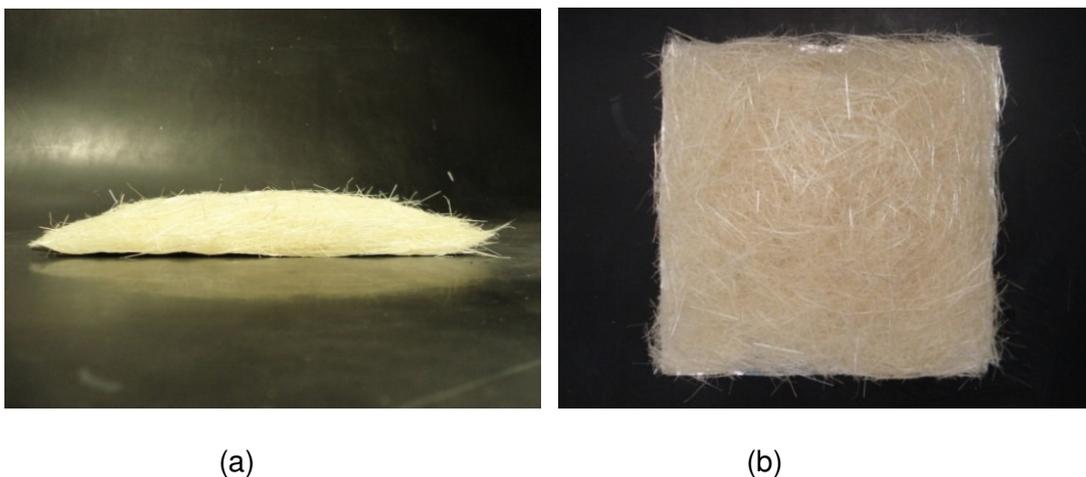


Figura 4.29 – Manta produzida pelo Método Etanol: (a) vista lateral e (b) vista superior

Nesta rota foram testados os Métodos Manual, Água, Etanol, Leito-ar e Vibracional de modo a ter uma comparação definitiva entre os diferentes métodos

desenvolvidos neste trabalho. O Método Manual-lav foi excluído desta última rota de experimentos em função de seu baixo desempenho das propriedades mecânicas dos compósitos.

4.5.1 Propriedades Mecânicas

A análise da Figura 4.30, de resistência a tração, demonstra que os compósitos obtidos pelos Métodos Manual e Leito-ar obtiveram melhor desempenho em comparação com os outros métodos. Da mesma forma, na análise dos valores de módulo elástico (Figura 4.31) e valores de resistência ao impacto (Figura 4.32), os métodos Manual e Leito-ar foram os que obtiveram melhores propriedades.

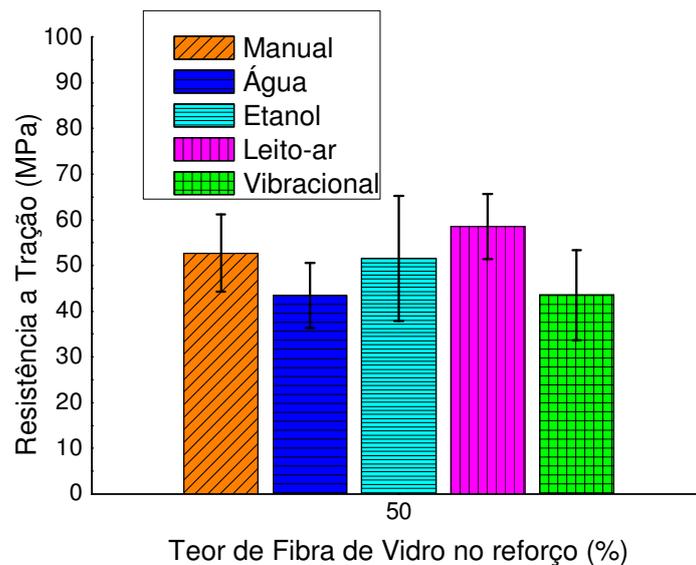


Figura 4.30 – Resistência a tração nos compósitos em função do método de preparação da manta (rota 2)

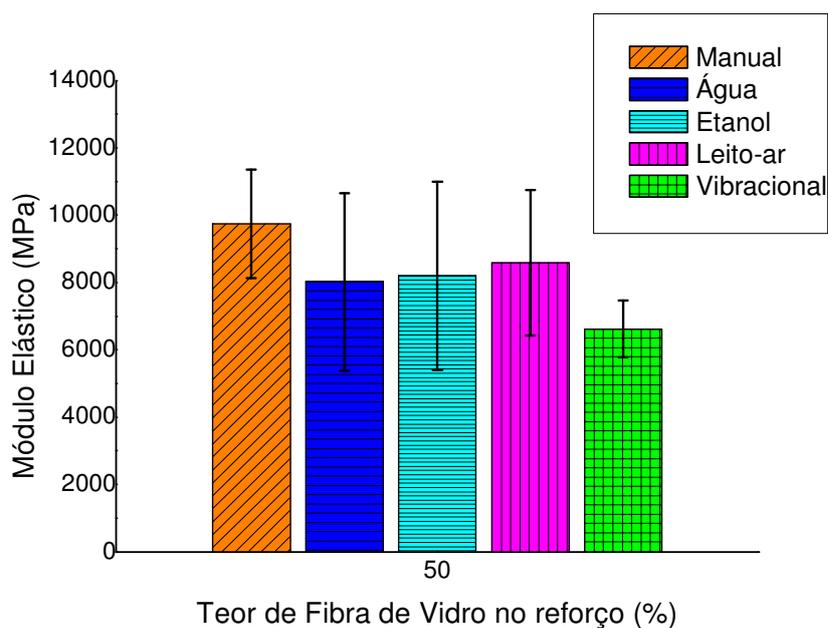


Figura 4.31 – Módulo de tração nos compósitos em função do método de preparação da manta (rota 2)

Comparando-se os métodos Água e Etanol, ambos de deposição de fibras em meio líquido, é possível observar que os valores para o método Etanol mantiveram-se sempre superiores ao método Água. Isto demonstra que o meio etílico seria mais conveniente para o uso de compósitos de fibra de vidro e seus híbridos, por possuir características de tensão superficial e molhabilidade diferentes da água. Entretanto, os valores obtidos pelo método Etanol mantiveram-se, em geral, inferiores aos de compósitos reforçados com mantas confeccionadas por via seca. Isto pode ser justificado em função da remoção de parte do sizing da fibra de vidro. Assim conclui-se que os métodos de via seca obtiveram melhor desempenho do que os métodos que utilizam fase líquida.

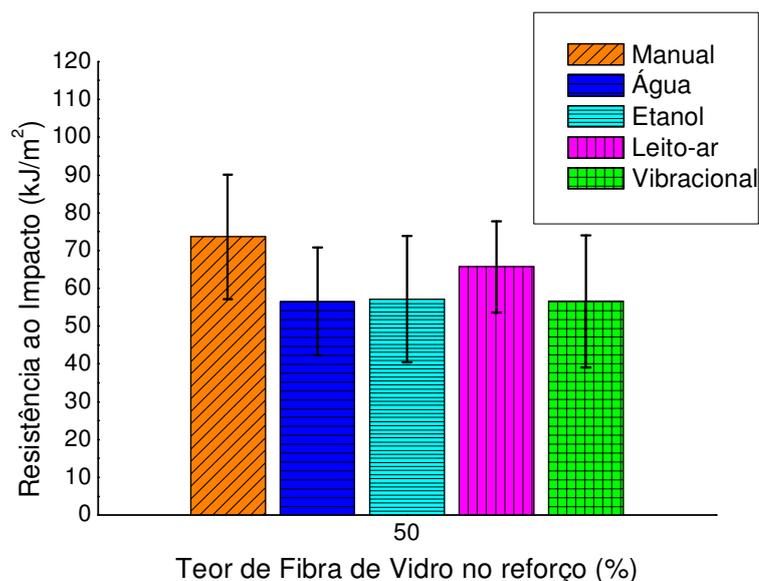


Figura 4.32 – Resistência ao impacto nos compósitos em função do método de preparação da manta (rota 2)

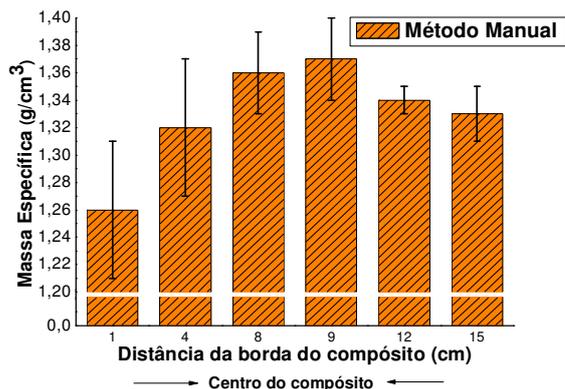
De modo geral, os métodos Manual e Leito-ar demonstraram maiores resultados em propriedades mecânicas. O método Leito-ar obteve melhores resultados em tração que os demais métodos. Por outro lado, o método Manual obteve o melhor desempenho nos ensaios de módulo elástico e resistência ao impacto.

Comparando-se todos os métodos desta última rota de experimentos, observa-se que os métodos de via seca (Leito-ar, Vibracional e Manual) apresentaram propriedades mecânicas destacadas em relação aos demais. Contudo, pelos resultados favoráveis obtidos pelo método Leito-ar e os desvios-padrão elevados nos resultados dos Métodos Vibracional e Manual, recomenda-se o Método Leito-ar para futura aplicação industrial. Como a fibra de vidro é conhecida pela geração de problemas de saúde ocupacional e dessa forma não é recomendável o contato humano com esta fibra, descarta-se, também, o método manual em aplicações industriais.

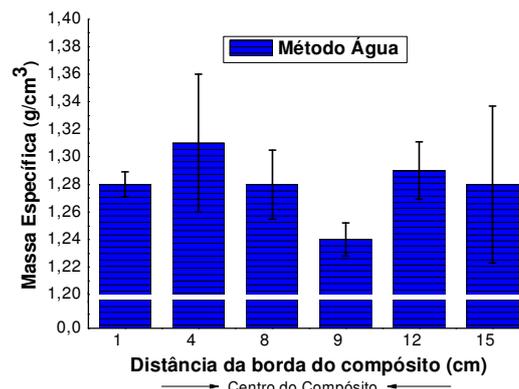
4.5.2 Avaliação via Distribuição de Massa Específica

Na parte final deste trabalho foi realizada uma avaliação da homogeneidade dos compósitos híbridos processados com 25% em volume de reforço (contendo 50% de fibra de vidro no reforço). Esta avaliação tem o objetivo de corroborar os resultados obtidos até o momento. Como foi descrito na metodologia foram retiradas amostras em diferentes pontos de uma placa de compósito padrão (molde 2) utilizada neste trabalho. Esta avaliação foi feita a partir da medida de massa específica das amostras retiradas da placa padrão.

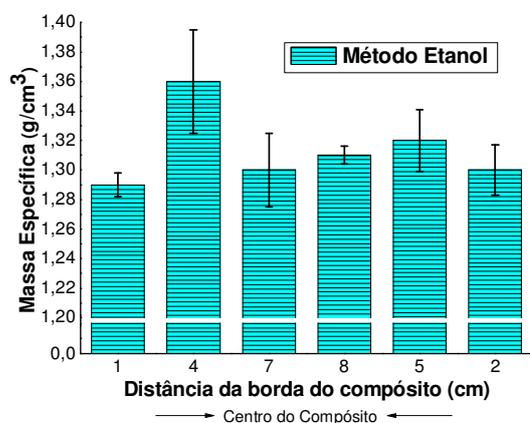
Na figura 4.33 estão demonstrados os resultados desta análise de distribuição por massa específica. Observa-se que os compósitos obtidos utilizando o método Manual possuem massa específica menor nas bordas do compósito. Analisando os métodos em fase líquida (Água e Etanol) observam-se variações nos valores de massa específica nas diversas regiões observadas no compósito. Esta observação é feita devido ao método de processamento (Água e Etanol), pois a agitação manual das fibras provoca diferenças de distribuições. A análise dos métodos de via seca (Métodos Leito-ar e Vibracional) mostra uma maior homogeneidade dos compósitos.



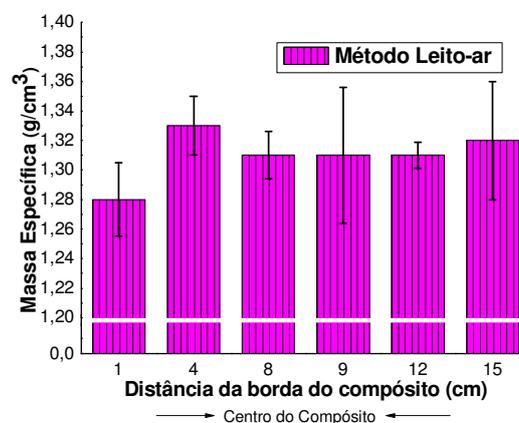
(a)



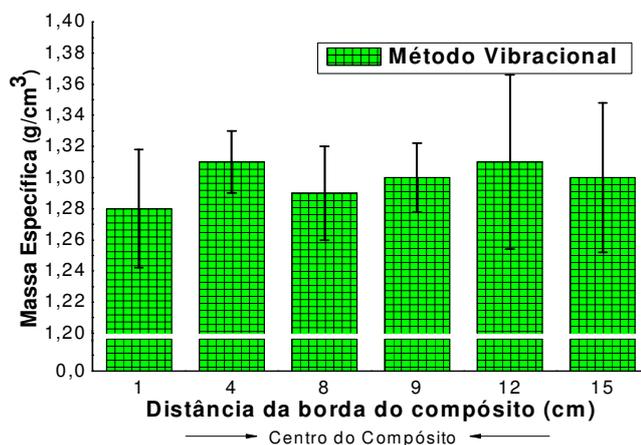
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.33 – Distribuição de massa específica para compósitos de fibra de vidro e sisal utilizando mantas obtidas pelo método: (a) Manual, (b) Água, (c) Etanol, (d) Leito-ar e (e) Vibracional

5 CONCLUSÕES

As fibras de sisal tratadas com água destilada produziram compósitos com propriedades superiores à fibra *in natura*. Verifica-se que fibras tratadas com água destilada receberam um tratamento menos agressivo que o alcalino. Porém, esta lavagem é suficiente para a retirada de compostos e sujidades inerentes ao fio de sisal que prejudicam a adesão da fibra na matriz poliéster. A análise via MEV demonstra que realmente houve alteração na morfologia superficial da fibra de sisal, confirmando essa hipótese.

A avaliação do comprimento das fibras demonstrou que o tamanho de fibra de 3 cm é ideal em função da acomodação desta fibra ao molde de compressão utilizado neste trabalho.

A análise de diferentes compósitos contendo 25% de reforço, mas com diferentes teores de fibra de vidro no reforço (0, 25, 50, 75 e 100% em volume), demonstrou que as amostras contendo 50% de fibra de vidro obtiveram um bom nível de reprodutibilidade, facilidade de manuseio e a viabilidade de confecção sem o auxílio de agente ligante.

Os resultados mostraram que as mantas fabricadas pelo Método Água pareceram dificultar a permeação da resina por entre as fibras o que gerou propriedades mecânicas inferiores e menos reprodutíveis que os métodos de via seca. Comparando-se os métodos Água e Etanol é possível observar que os

valores de propriedades mecânicas para o método Etanol mantiveram-se sempre superiores ao método Água. Entretanto, os valores obtidos pelo método Etanol mantiveram-se, em geral, inferiores aos de compósitos reforçados com mantas confeccionadas por métodos de via seca.

Sobre a avaliação da homogeneidade dos compósitos híbridos com 25% em volume de reforço (contendo 50% de fibra de vidro) conclui-se que o método Manual possui massa específica menor nas bordas do compósito. Analisando os métodos em fase líquida (Água e Etanol) observa-se variações de massa específica em função da localização do corpo de prova no compósito (placa). Na análise dos métodos por via seca (Métodos Leito-ar e Vibracional) observa-se uma maior homogeneidade dos compósitos.

Comparando-se todos os métodos na última rota de experimentos, observa-se que os métodos de via seca (Leito-ar, Vibracional e Manual) apresentaram propriedades mecânicas destacadas em relação aos demais. Contudo, devido as desvantagens operacionais do Método Manual e os desvios elevados nos resultados do Método Vibracional recomenda-se a utilização do Método Leito-ar em função de seus resultados favoráveis, sua facilidade e baixo custo de implementação utilizando instalações de ar comprimido existentes na indústria.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SAPUAN, S. M.; MALEQUE, M. A. Design and fabrication of natural woven fabric reinforced epoxy composite for household telephone stand. **Materials and Design**, v. 26, p. 65-71, 2005.
2. JOSHI, S. V.; DRZAL, L. T.; MOHANTY, A. K.; ARORA, S. Are natural fibre composites environmentally superior to glass fibre reinforced composites? **Composites Part A**, v. 35, p. 371-6, 2004.
3. POU, J.; BOUTINGUIZA, M.; QUINTERO, F.; LUSQUINOS, F.; SOTO, R.; PEREZ-AMOR, M. Comparative study of the cutting of car interior trim panels reinforced by natural fibers. **Journal of Laser Applications**, v. 13, n. 3, p. 90-95, 2001.
4. BROSIUS, D. Natural fiber composites slowly take root. **Composites Technology**, p. 32-37, fev. 2006.
5. IGEA – Instituto gaúcho de estudos automotivos. **Revista Painel Automotivo**. Porto Alegre, ano 8, n. 58, Jun. 2006.
6. D'ALMEIDA, J. R. M.; MONTEIRO, S. N. Compósitos reforçados por fibras naturais – Oportunidades e desafios. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS), 58., Rio de Janeiro, 2003. **Anais...** São Paulo: ABM, 2003, p. 1725-1734.
7. HASELKA, H. Fiber composites of raw renewable materials for the ecological lightweight design. **Materialwissenschaft und Werkstofftechnik**, v. 29 n. 6, p. 300-311, 1998.
8. PIGGOTT, M. **Load bearing fibre composites**. 2.ed. Canada: Kluwer Academic Publishers, 2002.
9. FOULK, J.; MANIKANDAN, K. C.; THOMAS, S. Thermal and dynamic mechanical analysis of polystyrene composites reinforced with short sisal fibres. **Composites Science and Technology**, v. 61, p.2519 – 2529, 2000.
10. EL-TAYEB, N. S. M.; YOUSIF, B. F. Evaluation of glass reinforced polyester composite for multi-pass abrasive wear applications. **WEAR**, v. 262, p. 1140-1151, 2007.

11. MOUZAKIS, D. E.; ZOGA, H.; GALIOTIS, C. Accelerated environmental ageing study of polyester/glass fiber reinforced composites (GFRPCs). **Composites part B: engineering**, v. 39, p. 467-475, 2008.
12. SOUTIS, C. Fibre reinforced composites in aircraft construction. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 41, p. 143-151, 2005.
13. KIM, P.J.; LEE, D. G. Surface quality and shrinkage of the composite bus housing panel manufactured by RTM. **Composite Structures**, v.57, p.211-220, 2002.
14. UMER, R.; BICKERTON, S.; FERNYHOUGH, A. Characterising wood fibre mats as reinforcements for liquid composite moulding processes. **Composites: Part A; Applied Science and Manufacturing**, v. 38, p. 434-448, 2007.
15. GRUJICIC, M.; BELL, W. C.; THOMPSON, L. L.; KOUDELA, K. L.; CHEESEMAN, B. A. Ballistic-protection performance of carbon-nanotube-doped poly-vinyl-ester-epoxy matrix composite armor reinforced with E-glass fiber mats. **Materials Science and Engineering A**, v.479, p. 10-22, 2008.
16. SMITH, F. C.; MOLONEY, L. D.; MATTHEWS, F. L. Fabrication of woven fibre/polycarbonate repair patches. **Composites Part A**, v. 27A, p. 1089-1095, 1996.
17. CAPRINO, G.; PRISCO, U.; GIORLEO, L. Monotonic and fatigue behaviour of chopped-strand-mat/polyester composites with rigid and flexibilised matrix. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, v. 38, p. 234-243, 2007.
18. IDICULA, M.; BOUDENNE, A.; UMADEVI, L.; IBOS, L.; CANDAU, Y.; THOMAS, S. Thermophysical properties of natural fibre reinforced polyester composites. **Composites Science and Technology**. V.66, p. 2719–2725, 2006.
19. CALLISTER Jr. W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 5.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
20. MAZALI, C. A. I. **Compósitos de resina éster vinílica e aditivos a base de sílica**. 2003. 71 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo,2003.
21. LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.
22. MATOS, E. **Fibra de vidro**. Brasília: Centro de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Universidade de Brasília, 2005.
23. FU, S. Y.; FENG, X. Q.; LAUKE, B.; MAI, Y. W. Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate-polymer composites. **Composites Part B: engineering**, v. 62, p. 1397-1406, 2008.

24. VERMURUGAM, R.; MANIKANDAN, V. Mechanical properties of palmyra/glass fiber hybrid composites. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, v. 38, p. 2216-2226, 2007.
25. MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução à polímeros**. 2.ed. Revista e ampliada. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.
26. GASSAN, J.; BLEDZKI, A. K. Composites reinforced with cellulose based fibres. **Progress in Polymer Science**, v. 24, p. 221–274, 1999.
27. AMICO, S. C.; COSTA, T. H. S.; CARRERA, L. C.; SANTANA, W.; GALVÃO, D. A. Caracterização de fibras de sisal da região nordeste do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 16., Uberlândia, 2001. **Proceedings...** Uberlândia: ABCM, 2001. V. 2, p. 34-40.
28. FROLLINI, E.; PAIVA, J. M. F.; TRINDADE, W. G.; RAZERA, I. A. T.; TITA, S. P. Natural Fibers, Plastics and Composites. New York: **Klumer Academic Publishers**, USA, 2004, p. 193-225.
29. KURUVILLA, J.; TOLEDO FILHO, R. D.; BEENA, J.; SABU, T. & CARVALHO, L. H.; A Review on Sisal Fibre Reinforced Polymer Composites; **Revista Bras. Eng. Amb.**, v. 3, n. 3, p. 367-379, 1999a.
30. CARVALHO, L. H. Propriedades mecânicas de tração de compósitos poliéster/tecidos híbridos sisal/vidro. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 16, n. 1, p. 33-37. 2006.
31. ANDRADE, JR. T. E. et.al. Influência da temperatura de infiltração de alumínio gasoso em ligninocelulósicos nas propriedades de Al₂O₃ biomórfica. **Cerâmica**, São Paulo, v. 53, n. 325, Jan./Mar. 2007.
32. MARTIN, A. R. **Avaliação das propriedades de fibras de sisal de diferentes variedades visando aplicação em compósitos poliméricos**. 1998. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1998.
33. SISALÂNDIA. **Sisal**. Retirolândia, BH: Sisalândia Fios Naturais Ltda, 2007. Disponível em: <<http://sisalandia.sites.uol.com.br>> Acesso em: 3 set. 2007.
34. KURUVILLA, J.; MEDEIROS, E. S.; CARVALHO, L. H. Compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras curtas de sisal. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 9, n. 4, out./dez. 1999b.
35. MEDEIROS, E. S.; KURUVILLA, J.; CARVALHO, L. H.; AGNELLI, J. A. M.; MATTOSO, L. H. C. Propriedades mecânicas de compósitos de resina fenólica reforçada por tecidos híbridos de juta e algodão. CONGRESSO BRASILEIRO DE POLIMEROS, 6., Gramado, 2001. **Anais...** São Carlos: ABPOL, 2002.

36. ALMEIDA, M.; CARVALHO, L. H.; V. M. FONSECA. Water sorptions effects on the tensile properties of unsaturated polyester/cotton – sisal hybrid fabric composites. In: AMERICAS REGIONAL MEETING - PPS, 2004. **Proceedings...** São Carlos: UFSCAR, 2005. 1 CD-ROM.
37. CARVALHO, L. H.; CAVALCANTE, J. M. F. Comportamento mecânico de compósitos poliéster insaturado/tecido tricotado de juta. CONGRESSO BRASILEIRO DE POLIMEROS, 6., Gramado, 2001. **Anais...** São Carlos: ABPOL, 2002.
38. NÓBREGA, M. M. S.; FONSECA, V. M.; CARVALHO L. H. Uso de fibras de caroá e macambira compósitos de matriz poliéster. CONGRESSO BRASILEIRO DE POLIMEROS, 8., Águas de Lindóia, 2005. **Anais...** São Carlos: ABPOL, 2006.
39. MATHUR, V. K. **Composite materials from local resources Construction and Building Materials**, 20 (2006) p. 470–477.
40. KAVELINE, K.G.; N.S. ERMOLAEVA, P.V. KANDACHAR. Investigation of stochastic properties of the natural fiber mats. **Composites Science and Technology**, v.66 p. 160–165, 2006.
41. DRUMMOND, M. L., C. C. ANGRIZANI e S. A. AMICO. Influence of the stacking sequence on the mechanical properties of glass/sisal hybrid composites. In: Anais do 6º Simpósio Internacional de Polímeros Naturais e Compósitos, Gramado, 2007.
42. MONTEIRO, S. N.; AQUINO, R. C. M. P.; LOPES, F. P. D.; CARVALHO, E. A.; D'ALMEIDA, J. R. M. Comportamento mecânico e características estruturais de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas e alinhadas de curauá **Revista Matéria**, v. 11, n. 3, p. 197–203, 2006.
43. EL-TAYEB, N. S. M. A study on the potential of sugarcane fibers/polyester composite for tribological applications. **WEAR**, v.265, p. 223-235, 2008.
44. WAMBUA, P.; IVENS, J.; VERPOEST, I. Natural fibres: can they replace in fibre reinforcement plastics? **Composites Science and Technology**. v. 63, p. 1259–1264, 2003.
45. CARVALHO, L. H - Chemical Modification of Fiber for Plastic Reinforcement in Composites. In: LEÃO, A. L.; CARVALHO, F. X.; FROLLINI, E., **Lignocellulosic – Plastic Composites**. USP and UNESP, Brazil, 1997.
46. MONTEIRO, S. N. TERRONES, L. A. H.; LOPES, F. P. D; D'ALMEIDA, J. R. M. Mechanical Strength of Polyester Matrix Composites Reinforced with Coconut Fiber Wastes. **Revista Matéria**, v. 10, n. 4, p. 571–576, 2005.
47. FERNANDES, C. A. O.; SÁNCHEZ, C. G.; SANCHEZ, E. M. S. Compósito de resina poliéster insaturado com bagaço de cana de açúcar. CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 6., Gramado, 2001. **Anais...** São Carlos: ABPOL, 2002.

48. SINGH, B. GUPTA, M. VERMA, A. The durability of jute fibre reinforced phenolic composites. **Compos Sci Technol**, v. 60, p. 581-589, 2000.
49. DHAKAL, H. N.; ZHANG, Z. Y.; RICHARDSON, M. O. W.; ERRAJHI, O. A. Z. The low velocity impact response of non-woven hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites. **Composites Structures**, v. 81, p. 559-567, 2007.
50. BALEY, C.; BUSNEL, F.; GROHENS, Y.; SIRE, O. Influence of chemical treatments on surface properties and adhesion of flax fibre – polyester resin. **Composites: Part A; Applied Science and Manufacturing**, v. 37, p. 1626-1637, out. 2006.
51. IOZZI, M. A.; MARTINS, M. A.; MATTOSO, L. H. C. Propriedades de compósitos híbridos de borracha nitrílica, fibras de sisal e carbonato de cálcio. **Polímeros**, São Carlos, v. 14, n. 2, Apr./June 2004.
52. KURUVILLA J.; MATTOSO L. H. C. Sisal Fibre reinforced polymer composites: Status e future. **Natural Polymers and Composites**. Proceedings from the Third International Symposium on Natural Polymers and Composites, 2000.
53. GOMES, M. G.; FANGUEIRO, R.; JOBIM, G.; PEREIRA, C. G. Composite materials reinforced by textile and natural waste fibers. SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE MACROMOLÉCULAS, 41., Rio de Janeiro, 2006. **Anais...** São Carlos: ABPOL, 2006.
54. NICOLAI, F. N. P.; BOTARO, V. R.; DE MORAES, D.; SIQUEIRA, G. A. F.; RODRIGUES JR., F. Vinylester matrix composite reinforced with sisal, coconut, and glass-fiber applied at the interior design of the naval engineering. SIMPOSIO INTERNACIONAL DE MACROMOLÉCULAS, 41., Rio de Janeiro, 2006. **Anais...** São Carlos: ABPOL, 2006.
55. SYDENSTRICKER, T. H. D.; MONCHNAZ, S., AMICO, S. C. Pull-out and other evaluations in sisal-reinforced polyester biocomposites. **Polymer Testing**, v. 22, p. 375-380, 2003.
56. CARVALHO, L. H.; ALMEIDA, M. F.; FONSECA, V. M.; Propriedades mecânicas de compósitos de poliéster insaturado reforçado por tecidos híbridos de algodão/sisal. CONGRESSO BRASILEIRO DE POLIMEROS, 7., Belo Horizonte, 2003. **Anais...** São Carlos: ABPOL, 2004.
57. RODRIGUES, J. S.; FUJIYAMA, R.T. Avaliação do comportamento em flexão de compósitos reforçados por fibras naturais. **Plástico Industrial**, p. 186-190, abr. 2007.
58. MISHRA, S.; MOHANTY, A. K.; DRZAL, L. T.; MISRA, M.; PARIJA, S.; NAYAK, S. K.; TRIPATHY, S. S. Studies on mechanical performance of biofibre/glass reinforced polyester hybrid composites. **Composites Science and Technology**, v. 63, p. 1377–1385, 2003.

59. JOHN, S.; NAIDU, A. Flexural properties of fibre-reinforced polyester, epoxy and phenolic composites. **Journal of Materials Science**, v. 37, p. 1377 – 1386, 2004.
60. CAVALCANTI, W. S.; CARVALHO, L. H.; LIMA, A. G. B. Difusão de água em compósitos poliéster insaturado reforçados por tecido híbrido de juta-vidro: Modelagem e simulação. **Revista Matéria**, v. 10, n. 1, p. 14-23, mar. 2005.
61. ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D 792**: Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement. West Conshohocken, U.S., 2000.
62. ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D 2734**: Standard Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics. West Conshohocken, U.S., 1994.
63. ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D 570**: Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. West Conshohocken, U.S., 1998.
64. ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D 3039 / D 3039 M**: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. West Conshohocken, U.S., 2003.
65. ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D 256**: Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. West Conshohocken, U.S., 2004.
66. ROWELL, R. M.; HAN, J. S.; ROWELL, J. S. Characterization and Factors effecting Fiber Properties. In: Natural polymers and agrofibres based composites. São Carlos: EMBRAPA, 2000.
67. SEOUD, O. A.; REGIANA, A. M.; FROLLINI, E. Derivatization of cellulose in homogeneous conditions: a brief review. In: Natural polymers and agrofibres based composites. São Carlos: EMBRAPA, 2000.
68. FEIH, S.; WEI, J.; KINGSHOTT, P.; SORENSEN, B. F. The influence of fibre sizing on the strength and fracture toughness of glass fibre composites. **Composites: Part A; Applied Science and Manufacturing**, v. 36, p. 245-255, 2005.
69. BROWN, E.N.; DAVIS, A.K.; JONNALAGADDA, K.D.; SOTTOS, N.R. **Composites Science and Technology**, n. 65, p. 129-136, 2005.