



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS



TESE DE DOUTORADO

**ESTUDO HIGROTÉRMICO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS
REFORÇADOS POR FIBRAS VEGETAIS JUTA/ALGODÃO
MANUFATURADO POR RTM: CARACTERIZAÇÃO
MECÂNICA E SORÇÃO DE ÁGUA**

Aluna: **Maria Verônica Silva Pinto**

Orientadores: **Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima**

Dr. Sandro Campos Amico

Campina Grande – PB, Fevereiro de 2018.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PROCESSOS

**ESTUDO HIGROTÉRMICO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS
REFORÇADOS POR FIBRAS VEGETAIS JUTA/ALGODÃO
MANUFATURADO POR RTM: CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E
SORÇÃO DE ÁGUA**

Aluna: **Maria Verônica Silva Pinto**

Orientadores: **Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima**

Dr. Sandro Campos Amico

Doutorado em Engenharia de Processos, Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos.

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, como requisito para obtenção do título de Doutora em Engenharia de Processos.

Campina Grande – PB, Fevereiro de 2018.

P659ee Pinto, Maria Verônica Silva.

Estudo higrotérmico de compósitos poliméricos reforçados por fibras vegetais juta/algodão manufaturado por RTM : caracterização mecânica e sorção de água / Maria Verônica Silva Pinto. – Campina Grande, 2018.

129 f.: il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2018.

"Orientação: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, Sandro Campos Amico".

Referências.

1. Fibra Vegetal. 2. Compósitos híbridos. 3. Tecido juta/algodão. 4. RTM. I. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. II. Amico, Sandro Campos. III. Título.

CDU 677.1/2.:678.7(043)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TFE DE DOUTORADO DE MARIA VERÓNICA SILVA PINTO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE.

Tese de Doutorado aprovada em 28 de Fevereiro de 2018.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima (UFGG)
Orientador



Prof. Dr. Sábio Campos Amico (UFRGS)
Orientador



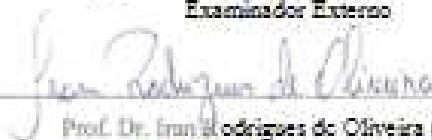
Prof. Dra. Laura Heckes de Carvalho (UFGG)
Examinadora externa



Prof. Dra. Wini Sales Gualberto (UFGG)
Examinadora Externa



Prof. Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior (UFGG)
Examinador Externo



Prof. Dr. Iran Rodrigues de Oliveira (UFGG)
Examinador Externo

Campina Grande, Fevereiro de 2018.

Nunca desistas de nada só por ser difícil, afinal, diz que aquilo que é difícil de conseguir, também é difícil de perder.

(Autor desconhecido)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à *Clarissa Coussirat Angrizani* pelo apoio, paciência e incentivo, sem seu auxílio não teria chegado até aqui.

AGRADECIMENTOS ESPECIAIS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por suportar as provas e pela oportunidade de ter concluído mais uma etapa na minha vida.

A minha família, especialmente a minha mãe Auta Silva Pinto e irmãs, pela paciência, apoio e incentivo.

A meu companheiro Edson Vieira de Souza que Deus me presenteou já no final desta jornada quando ainda estava em Porto Alegre –RS.

Ao Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima pelos ensinamentos, disponibilidade, comprometimento na busca dos melhores resultados.

Ao Prof. Dr. Sandro Campos Amico que foi mais que um professor, me recebeu e acolheu de braços abertos no Rio Grande do Sul, sempre disponível para o que fosse preciso.

Ao CNPq, à FINEP e a CAPES pelo apoio financeiro concedido ao Laboratório Experimental de Térmica e Fluidos (CCT/UFCG).

Aos amigos do Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos da UFCG e ao aluno de iniciação científica do PIBIC pela contribuição nos ensaios mecânicos Francisco Procópio Batista Neto.

Aos amigos que fiz em Porto Alegre/RS, do Laboratório de Materiais Poliméricos (LAPOL) e do Grupo de Materiais Compósitos (GCOMP) da Escola de Engenharia da UFRGS.

Ao PROCAD-NF/CAPES pelo apoio financeiro e por ter proporcionado a experiência de um doutorado sanduíche.

A UFRGS pela oportunidade de realizar esse trabalho. Por fim, agradeço a todos que estiveram comigo durante este período e que ainda continuarão, agora, me auxiliando na busca de novos e desafiadores objetivos.

RESUMO

ESTUDO HIGROTÉRMICO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS POR FIBRAS VEGETAIS JUTA/ALGODÃO MANUFATURADO POR RTM: CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E SORÇÃO DE ÁGUA

Atualmente existe uma maior preocupação com o ecossistema, que inclui uma legislação mais rigorosa e uma educação/conscientização da população quanto ao consumo e descarte de produtos. Neste sentido, este trabalho trata da utilização de fibras vegetais como reforço em compósitos de matriz polimérica. Os compósitos reforçados com fibras vegetais são biodegradáveis razoavelmente fortes, leves e não trazem danos à saúde. Entretanto apresentam baixo módulo de elasticidade, pobre resistência à umidade e baixa resistência mecânica, se comparado a compósitos reforçados de fibras sintéticas. Neste contexto, o objetivo deste trabalho, é caracterizar mecanicamente compósitos híbridos de tecido juta-algodão/poliéster a seco e com sorção de água em diferentes temperaturas, utilizando duas frações volumétricas de fibras. Os compósitos foram moldados pelo processo de RTM (Moldagem por Transferência de Resina), com frações volumétricas de fibras de 32 (4 camadas de tecido juta/algodão) e 48% (6 camadas de tecido juta/algodão). Foi realizado ensaio de sorção de água dos compósitos nas temperaturas de 25, 50 e 75 °C, e na sequência, os compósitos submetidos à sorção de água nas temperaturas de 50 e 75°C foram caracterizados em tração (ASTM D3039), impacto Izod (ASTM D256) e flexão (ASTM D790). Em todos os ensaios, verificou-se que quanto maior a temperatura do banho de água, menor o tempo para atingir a saturação máxima do compósito. Isto foi decisivo para a escolha das temperaturas de 50 e 75°C a fim de diminuir a quantidade de material nos estudos experimentais. Para as propriedades mecânicas em tração, flexão e impacto, fica evidente a perda das propriedades mecânicas dos compósitos quando estes absorvem água, o que pode ser atribuído à plastificação da matriz e ao descolamento das camadas de fibras dos compósitos, reduzindo a adesão interfacial entre fibra e matriz. Além disso, as fibras vegetais incham com a absorção da água.

Palavras-chave: fibra vegetal, compósitos híbridos, tecido juta/algodão.

ABSTRACT

HYDROTHERMAL STUDY OF POLYMERIC COMPOSITES REINFORCED BY JUTE/COTTON VEGETABLE FIBERS MANUFACTURED BY RTM: MECHANICAL CHARACTERIZATION AND WATER SORPTION

Currently there is a growing concern with the ecosystem, which includes stricter legislation and education / awareness of the population as to the consumption and disposal of products. Thus, this work deals about the use of vegetable fibers as reinforcement in polymer matrix composites. The composites reinforced with vegetal fibers are biodegradable reasonably strong, light in weight and do not damage health. However, they have low elastic modulus, poor moisture resistance and low mechanical properties when compared to synthetic fiber reinforced polymer composites of s. Therefore, the aim of this work is to mechanically characterize hybrid jute-cotton fabric/polyester composites in before and after water sorption at different temperatures using two volume fractions of fibers. The composites were molded by the RTM (Resin Transfer Molding) with volume fiber fractions of 32 (4 layers of jute/cotton fabric) and 48% (6 layers of jute/cotton fabric). Water sorption tests were conducted at 25, 50 and 75 ° C for all composites. Then, tensile (ASTM D3039), Izod impact (ASTM D256) and flexural (ASTM D790) samples were immersed in water at, s 50 and 75 ° C and their properties were determined at different time intervals . Results indicate that the higher the water bath temperature, the shortest the time for the composite reach the maximum saturation . This was decisive for choosing the temperatures of 50 and 75 °C in order to decrease the amount of material in the experimental studies. Mechanical properties of tensile strength, flexural and impact specimens indicates that composite mechanical properties decreased with water sorption and higher fiber content, which can be attributed to the plasticizing effect of water, fiber hygroscopy and to the displacement of the fiber layers in the composites reducing fiber/matrix interfacial adhesion. Besides, the vegetable fibers swelled with the absorption of water, which increases internal stresses.

Keywords: vegetable fiber, hybrid composites, jute / cotton fabric.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades físicas e mecânicas de várias fibras vegetais.....	37
Tabela 2.2 - Propriedades físicas e mecânicas de algumas fibras vegetais e de vidro.....	38
Tabela 3.1 - Esquema de quantidade de corpos de prova para cada ensaio mecânico.....	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Arcos Confeccionados de materiais compósitos em 800 a.c.....	23
Figura 2.2 - Classificação dos materiais compósitos quanto ao tipo de reforço.....	24
Figura 2.3 - Orientações dos reforços no compósito: compósito particulado (a), compósitos reforçados por fibras curtas orientadas (b) e fibras curtas aleatórias(c).....	25
Figura 2.4 - Etapas de fabricação dos compósitos.....	27
Figura 2.5 - Esquema simplificado do processo de moldagem por RTM	28
Figura 2.6 - Esquema da classificação de reforços em compósitos.....	31
Figura 2.7 - a) Planta de juta e b) extração da fibra de juta.....	40
Figura 2.8 - Diagrama esquemático da Tensão x Deformação dos materiais compósitos em relação as suas fases.....	42
Figura 2.9 - Materiais transversalmente isotrópicos.....	46
Figura 2.10 - Esquema representativo das abordagens micromecânica e macromecânica.....	48
Figura 2.11 - Curva de sorção de água de compósitos de poliestireno reforçados com fibras de sisal em função do tempo e do teor de fibra.....	51
Figura 2.12 - Curva de absorção de água para compósitos de polipropileno reforçados com 30% de fibras de sisal em diferentes temperaturas.....	53
Figura 3.1 - Tecido tramado com fibras de juta e algodão.....	69
Figura 3.2 - Aparatos do sistema RTM: controlador e regulador de pressão (a), molde (b), vaso de pressão (c) e filtro regulador de pressão de ar (d).....	70
Figura 3.3 - Molde RTM com orifício central (inlet) e quatro furos passantes (outlets).....	71
Figura 3.4 - Camadas de tecidos juta/algodão inseridos no molde RTM com orifício central.....	72
Figura 3.5 - Imagens da infiltração radial da resina poliéster no tecido juta/algodão unidirecional durante a moldagem por RTM.....	72
Figura 3.6 - Equipamento conhecido como banho maria utilizado para ensaio higrotérmico.....	73
Figura 3.7 - Amostras no interior do banho térmico sob placa aquecedora com temperatura de 50°C durante a sorção de água.....	75
Figura 3.8 - Corpos de prova de tração.....	76
Figura 3.9 - a) Máquina universal de ensaios INSTRON 3382 com uma célula de carga de 100KN com vídeo extensômetro. b) Ensaio de tração.....	77

Figura 3.10 - Máquina de ensaios de impacto CEAST IMPACTOR II.....	78
Figura 3.11 - Corpo de prova de impacto.....	78
Figura 3.12 - Corpos de prova de flexão.....	79
Figura 3.13 - Ensaio de flexão em três pontos.....	79
Figura 3.14 - Microscópio Eletrônico de Varredura.....	80
Figura 4.1 - Gráfico da absorção de água em função do tempo, até 504h, obtidas para compósitos reforçados com 32% de teor de fibra de tecido juta/algodão nas temperaturas de 25,50 e 75°C.....	81
Figura 4.2 - Gráfico da absorção de água em função do tempo, até 10h para os primeiros estágios iniciais de imersão de água, obtido para compósitos reforçados com 32% de teor de fibra de tecido juta/algodão nas temperaturas de 25,50 e 75°C.....	82
Figura 4.3 - Gráfico da absorção de água em função do tempo obtidas para compósitos de 48% de teor de fibra de tecido juta/algodão nas temperaturas de 25,50 e 75°C.....	84
Figura 4.4 - Gráfico da absorção de água em função do tempo, até 10h para os primeiros estágios iniciais de imersão de água, obtido para compósitos reforçados com 48% de teor de fibra de tecido juta/algodão nas temperaturas de 25,50 e 75°C.....	84
Figura 4.5 - Resistência à tração dos compósitos com 32% de teor de fibra de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 50°C e 75°C.....	86
Figura 4.6- Resistência à tração dos compósitos com 48% de teor de fibra de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 50°C e 75°C.....	87
Figura 4.7 - Resistência à tração dos compósitos com 32% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada na temperatura de 50°C.....	88
Figura 4.8 - Resistência à tração dos compósitos com 48% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada na temperatura de 50°C.....	89
Figura 4.9 - Resistência à tração dos compósitos com 32% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada na temperatura de 75°C.....	90
Figura 4.10 - Resistência à tração dos compósitos com 48% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada na temperatura de 75°C.....	90
Figura 4.11 - Módulo de elasticidade em relação à resistência à tração dos compósitos com 32% de teor de fibra de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 50°C e 75°C.....	91

Figura 4.12 - Módulo de elasticidade em relação à resistência à tração dos compósitos com 48% de teor de fibra de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 50°C e 75°C.....	92
Figura 4.13 - Módulo de elasticidade em relação à resistência à tração dos compósitos com 32% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 50°C.....	93
Figura 4.14 - Módulo de elasticidade em relação à resistência à tração dos compósitos com 48% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 50°C.....	93
Figura 4.15 - Módulo de elasticidade em relação à resistência à tração dos compósitos com 32% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 75°C.....	94
Figura 4.16 - Módulo de elasticidade em relação à resistência à tração dos compósitos com 48% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 75°C.....	95
Figura 4.17 - Resistência ao impacto dos compósitos com 32% de teor de fibra de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 50°C e 75°C.....	96
Figura 4.18 - Resistência ao impacto dos compósitos com 48% de teor de fibra de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 50°C e 75°C.....	97
Figura 4.19 - Resistência ao impacto dos compósitos com 32% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 50 °C.....	98
Figura 4.20 - Resistência ao impacto dos compósitos com 48% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 50 °C.....	99
Figura 4.21 - Resistência ao impacto dos compósitos com 32% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 75 °C.....	100
Figura 4.22-Resistência ao impacto dos compósitos com 48% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 75 °C.....	100
Figura 4.23 - Resistência à flexão dos compósitos com 32% de teor de fibra de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 50°C e 75°C.....	101
Figura 4.24 - Resistência à flexão dos compósitos com 48% de teor de fibra de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 50°C e 75°C.....	102
Figura 4.25 - Resistência à flexão dos compósitos com 32 % de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 50° C.....	103
Figura 4.26 - Resistência à flexão dos compósitos com 48% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 50° C.....	104

Figura 4.27 - Resistência à flexão dos compósitos com 32 % de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 75° C.....	105
Figura 4.28 - Resistência à flexão dos compósitos com 32 % de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 75° C.....	105
Figura 4.29 - Micrografias da seção do corte da superfície das fibras no compósito com tecido juta/algodão (a) corte a laser e (b) corte com arco de serra. Aumento de 300x.....	106
Figura 4.30- Micrografias da seção do corte da superfície da fratura do corpo de prova no compósito com tecido juta/algodão submetido ao ensaio de flexão (a)32% de teor de fibras e (b)48% de teor de fibras de tecido juta algodão. Aumento de 300x.....	106
Figura 4.31 - Micrografias da seção do corte da superfície da fratura do corpo de prova no compósito com tecido juta/algodão submetido ao ensaio de flexão (a)32% de teor de fibras e (b) 48 % de teor de fibras de tecido juta/algodão. Aumento de 300x.....	107

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xi
CAPÍTULO I.....	18
INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Justificativa.....	20
CAPÍTULO II.....	22
REVISÃO DE LITERATURA.....	22
2.1 Materiais compósitos.....	22
2.1.1 Fundamentos.....	22
2.1.2 Materiais compósitos poliméricos.....	29
2.1.3 Constituintes do compósito.....	30
2.1.3.1 Reforço.....	30
2.1.3.2 Matriz polimérica.....	31
2.1.3.2.1 Resina poliéster.....	33
2.2 Fibras vegetais.....	34
2.2.1 O uso das fibras vegetais em compósitos.....	35
2.2.2 Fibras de juta.....	39
2.2.3 Fibras de algodão.....	41
2.2.4 Influência da adesão e interface nas propriedades mecânicas dos compósitos.....	41
2.3 Materiais compósitos reforçados com fibras vegetais.....	43
2.3.1 Avaliação de propriedades mecânicas em materiais compósitos.....	45
2.3.2 Sorção de água de compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais.....	48

2.4 Materiais compósitos híbridos.....	54
2.4.1 Materiais compósitos híbridos constituídos por fibras vegetais.....	55
2.5 Degradação de polímeros e compósitos poliméricos.....	56
2.5.1 Degradação de polímeros.....	56
2.5.2 Degradação de materiais compósitos poliméricos.....	60
2.6 Envelhecimento.....	61
2.6.1 Características gerais.....	61
2.6.2 Tipos de envelhecimento.....	62
2.6.2.1 Envelhecimento químico.....	63
2.6.2.2 Envelhecimento físico.....	66
2.6.2.3 Aspectos Gerais sobre Envelhecimento Higrotérmico.....	67
CAPÍTULO III.....	69
MATERIAIS E MÉTODOS.....	69
3.1 Materiais.....	69
3.2 Métodos.....	70
3.2.1 Equipamento RTM.....	70
3.2.2 Confeção dos compósitos.....	71
3.2.3 Sorção de água.....	73
3.2.4 Ensaio mecânicos dos compósitos.....	76
3.2.4.1 Ensaio de tração.....	76
3.2.4.2 Ensaio de impacto.....	78
3.2.4.3 Ensaio de flexão em três pontos.....	78
3.3 Caracterizações morfológicas.....	80
CAPÍTULO IV.....	81
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	81
4.1 Efeito do envelhecimento higrotérmico - Sorção de água	81
4.2 Ensaio mecânicos	85

4.2.1 Resistência à tração.....	85
4.2.2 Módulo de elasticidade.....	91
4.2.3 Resistência ao impacto.....	95
4.2.4 Resistência à flexão.....	101
4.3 Caracterização das fibras do tecido juta/algodão por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	106
CAPÍTULO V.....	108
CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	108
5.1 Conclusão.....	108
5.2 Sugestões para trabalhos futuro.....	109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110

CAPITULO I

INTRODUÇÃO

O uso de materiais ecológicos, visando minimizar problemas ambientais, vem se tornando bastante corriqueiro nos últimos anos e é uma grande preocupação da comunidade científica. O novo paradigma do desenvolvimento econômico volta-se para propiciar a melhoria da qualidade de vida das futuras gerações, incorporando na sua concepção modos de produção menos poluentes. Utilizar as fibras vegetais como substitutas de diversos reforços sintéticos em compósitos poliméricos, tem apresentado um grande potencial de aplicação tecnológica. A busca por novos materiais vem levando pesquisadores a desenvolverem compósitos utilizando estes tipos de fibras como reforço (ISHIZAKI, 2006; D'ALMEIDA et al., 2006).

Material compósito é qualquer material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades (CALLISTER Jr., 2008). De acordo com esse princípio de ação combinada, as propriedades (resistência à tração, módulo de elasticidade, etc.) variam dependendo das combinações dos dois componentes principais do compósito, isto é, das características da matriz, tipo e forma do reforço, da concentração dos mesmos, e método de processamento, e entre outros.

Em compósitos poliméricos, matrizes termofixas e reforços fibrosos geram produtos mais resistentes.

Os compósitos são de grande utilização per capita para o desenvolvimento tecnológico no Brasil. De janeiro a março de 2014, foram produzidas, no país, 53,7 mil toneladas de

compósitos, volume 8% superior ao registrado no primeiro trimestre de 2013 (ABMACO, 2014).

Existem diferentes técnicas para a manufatura de materiais compósitos. Uma delas é a de processos de moldagem líquida para produção de compósitos em moldes fechados que têm papel importante na comunidade científica e industrial, pois são os processos com menor impacto ambiental, e possibilitam a produção em larga escala. Entre os grupos de processos de moldagem líquida de compósitos, destaca-se a moldagem por transferência de resina (RTM) que consiste em injetar uma resina termorrígida pré-catalisada num molde fechado contendo uma pré-forma fibrosa seca (GREVE e PICKETT, 2006). O processo RTM oferece benefício importante em relação a outros processos de moldagem aberta ou fechada. Além disso, sua aplicabilidade está inserida em diversas áreas, como: indústrias automobilística, náutica, aeroespacial, esportiva e biomédica (STEENKAMER, 1994).

Há uma grande variedade de materiais que podem ser utilizados como matriz ou reforço em compósitos. O desenvolvimento de pesquisas em materiais e da tecnologia de processos tem permitido o emprego de fibras vegetais em substituição aos materiais convencionais com vantagens econômicas além de permitir o desenvolvimento de novos produtos, com propriedades específicas para uma determinada aplicação (CAVALCANTI, 2006).

Ao se utilizar fibras vegetais como reforço em materiais compósitos, tem-se vantagens significativas, como: baixo custo e baixa densidade. Além disso, as fibras vegetais são biodegradáveis, não são tóxicas ou poluentes, originárias de fontes renováveis e estão disponíveis em todo o mundo, diminuindo assim problemas ambientais (NÓBREGA et al., 2005).

A ação reforçante das fibras no compósito não é apenas uma função da resistência à tração da fibra, do seu comprimento e da sua fração volumétrica, mas também depende da natureza química e da ligação física entre a fibra e a matriz polimérica. As interações fibra/matriz desempenham um papel fundamental na transferência de tensão da matriz para a fibra, sendo esta ligação criada durante a fase de produção dos materiais compósitos (XUE, 2007).

Apesar das vantagens acima citadas, os compósitos poliméricos com fibras vegetais apresentam algumas limitações, tais como: baixo módulo de elasticidade, baixa resistência à umidade e resistência mecânica reduzida.

1.1 Justificativa

A importância das fibras vegetais como reforço em compósitos de matriz polimérica vem aumentando significativamente nas últimas décadas devido a fatores como o alto preço das fibras sintéticas e a necessidade de produzir produtos mais sustentáveis ou menos agressivos ao meio ambiente. Por estes motivos as fibras vegetais estão sendo bastante estudadas para substituir parcialmente e até totalmente as fibras sintéticas em muitas aplicações (LI et al., 2007; SILVA, 2011).

As fibras de carbono, por exemplo, devido ao seu bom desempenho, são bastante utilizadas em aeronaves, contudo, para outros setores, tornam-se onerosos. Dessa forma, o estudo de outras fibras de resistência adequada e baixo custo torna-se imprescindível para atender necessidades tecnológicas menos exigentes. Nesse contexto surgem às fibras vegetais apresentando boas propriedades mecânicas, baixo custo e facilmente encontradas de forma abundante na natureza. Estas características permitem sua utilização como elemento de reforço em matrizes poliméricas numa variada gama de aplicações e de processos de conformação, incluindo a RTM (Moldagem por Transferência de Resina).

As fibras vegetais são incorporadas à matriz polimérica nas mais variadas formas: fibras longas ou curtas, mantas, tecidos, etc., porém, o uso de tecidos tem se tornado bastante atraente. Em especial os tecidos híbridos, aqueles formados por mais de um tipo de fibra, vêm sendo amplamente difundidos nas indústrias aeroespacial e automobilística e em estruturas complexas, devido à facilidade de manipulação e controle de muitas de suas propriedades, apenas pela modificação da trama e/ou do teor relativo de fibras. Além disso, esses tecidos possuem ainda custo de fabricação relativamente baixo e podem gerar compósitos com, resistência mecânica e propriedades superiores às de compósitos reforçados com um único tipo de fibra. No Brasil, há vários exemplos da utilização de fibras vegetais como reforço na indústria automotiva, tais como revestimentos internos, painéis, teto e portas reforçadas com fibras de algodão, juta, sisal, rami e coco (MORASSI, 1994; MATTOSO et al., 1996; JOSEPH et al., 1996).

Diante do exposto, a motivação principal deste trabalho é o fato das fibras de juta e do algodão apresentarem propriedades mecânicas que as indicam para aplicações em compósitos poliméricos. Essas fibras são utilizadas em diversas comunidades de artesãos na confecção de produtos de artesanato e na indústria têxtil. A proposta de serem utilizadas como reforço em materiais compósitos poliméricos, permite agregar valor, fornecer emprego e renda e gerar novas alternativas de impacto social para esses materiais (ALEXANDRE et al., 2004).

Utilizar fibras de juta e de algodão em tecidos híbridos como reforço de matriz polimérica tem uma importância significativa a nível tecnológico e socioeconômico, pois valoriza o produto além de garantir maior demanda para essas fibras. Essa valorização aumenta a produção da fibra beneficiando o produtor, além de proporcionar a ele, bom retorno financeiro e melhores condições de manter-se no campo, sobretudo na região Nordeste do Brasil.

Assim, este trabalho pretende dar contribuição na área de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras vegetais, utilizando o processo de fabricação RTM (Moldagem por Transferência de Resina), o qual fornecerá alternativas aos materiais desenvolvidos e que poderão ser empregados na indústria automobilística, aeronáutica, naval, entre outras. O objetivo é estudar compósitos formados por matriz poliéster insaturada e, como reforço, tecido híbrido de fibras vegetais (juta/algodão), utilizando o processo de fabricação RTM (Moldagem por Transferência de Resina).

Como objetivos específicos, pode-se citar:

- Moldar compósitos na forma de placas planas por RTM, utilizando diferentes frações volumétricas de fibras (juta-algodão) e avaliar o desempenho mecânico;
- Avaliar a absorção de água dos compósitos (experimental), observando o efeito da temperatura e do teor de fibra;
- Analisar as resistências mecânicas à tração, impacto e flexão em função da fração volumétrica de fibra e a sorção de água.
- Caracterizar via MEV, os compósitos produzidos após serem submetidos aos testes de resistência mecânica.

CAPÍTULO II

REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Materiais Compósitos

2.1.1 Fundamentos

Apesar do uso dos materiais compósitos terem apresentado um grande impulso na década de 50; os mesmos não são recentes. A partir de relatos históricos, pode-se afirmar que a utilização de materiais compósitos remonta à antiguidade, ao período Neolítico, quando os tijolos eram fabricados com barro e palha (2500 anos A.C.), os sarcófagos eram fabricados com madeira aglomerada (1500 anos A.C.) e os arcos (Figura 2.1) eram verdadeiras estruturas compostas laminadas, constituídas por madeira e outros materiais como pele, osso, chifre e tendões (800 anos A.C.). Em relação aos materiais compósitos recentes, a utilização de concreto reforçado por aço foi desenvolvida a partir de reforços de barras de ferro existentes na alvenaria do século XIX, época equivalente à produção dos primeiros barcos com aplicação de fibra de vidro e utilização de placas reforçadas na indústria aeronáutica.

Ao final dos anos 70, já era perceptível a utilização dos materiais compósitos para as indústrias automotiva e biomédica, expandindo-se ainda para as áreas de estruturas aeroespaciais, equipamentos esportivos e aos mais diversificados componentes (VILAR, 2009). Com relação aos reforços poliméricos, no final do século XX foi introduzida à utilização da resina fenólica, pedaços de amianto em forma fibrosa e de origem natural, assim, se classificando como antecessor das fibras atuais.



Figura 2.1: Arcos confeccionados de materiais compósitos em 800 AC. Fonte: Ventura (2009).

Há na literatura diversas definições para a classe de materiais compósitos. Uma delas (MARINUCCI (2011)), relata que o material compósito é caracterizado por ser formado por dois ou mais materiais distintos, admitindo-se que estes possuam fases constituintes com diferenças nas propriedades físicas e químicas, mostrando uma fase descontínua e uma fase contínua. A fase descontínua comumente são os reforços, sob forma de fibras, partículas esféricas ou plaquetas, embebidas na matriz, sendo que cada qual permanece com suas características individuais, enquanto que a fase contínua é denominada de matriz.

A norma ASTM D3878 (2015) define compósito como uma substância consistindo de dois ou mais materiais, insolúveis entre si, que são combinados para formar um material de engenharia útil, exibindo propriedades que não se encontram nos materiais isoladamente.

Algumas vezes, surge uma fase adicional (interfase) entre a fase dispersa (reforço) e a fase matriz, devido a interações químicas entre os materiais ou efeitos de outros processos (PANZERA, 2003). Independente do surgimento ou não dessa fase extra, a qualidade da interface exerce um papel fundamental no desempenho de um compósito. Isto porque a interface é a principal responsável pela eficiente transferência dos esforços da matriz para o reforço.

Além do exposto acima, para o material ser classificado como um compósito é necessário, ainda, satisfazer três critérios (DANIEL e ISHAI, 1994): a) ambos os constituintes devem estar presentes em proporções maiores que 5%; b) as fases constituintes devem ter propriedades diferentes, e c) as propriedades do compósito devem ser diferentes daquelas dos materiais constituintes atuando independente. Dessa forma, um compósito consiste em um material multifásico feito artificialmente cujas fases constituintes devem ser quimicamente diferentes e devem estar separadas por uma interface. Esses materiais exibem uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal modo que é obtida

uma melhor combinação das propriedades (CALLISTER Jr., 2008). A maioria das ligas metálicas, além de muitos materiais cerâmicos, não se enquadra nessa definição, pois suas múltiplas fases são formadas como consequência de fenômenos naturais (PANZERA, 2003).

Segundo LIMA Jr. (2007), não há ainda uma classificação universal, oficial, para os materiais compósitos. Estes materiais podem ser agrupados de acordo com a forma, processo, tipo de matriz e tipo de reforço, entre outros critérios. Classificações quanto à natureza da fase dispersa e da matriz, no entanto, são as mais encontradas na literatura.

Em relação ao reforço, os compósitos podem ser classificados em compósitos laminados (reforçados por fibras) e compósitos particulados (reforçados por partículas). As partículas podem ser materiais metálicos, poliméricos ou cerâmicos, podendo ser sintéticos ou naturais. Segundo LIMA Jr. (2007), uma partícula é naturalmente não fibrosa, podendo ser esférica, cúbica, tetragonal, escamada ou quaisquer outras formas regulares ou irregulares, sendo que a forma sempre será possível de se aproximar, por abstrações matemáticas a uma das quatro formas supracitadas. A fibra, por sua vez, é caracterizada pelo seu comprimento ser muito maior que a sua seção transversal, podendo ser de origem animal (lã, seda), vegetal (sisal, juta, bananeira, etc.) ou sintética (fibras de vidro, fibras de carbono, fibras de aramida, etc.).

A Figura 2.2 ilustra a classificação dos compósitos em relação ao tipo de reforço, em um organograma.

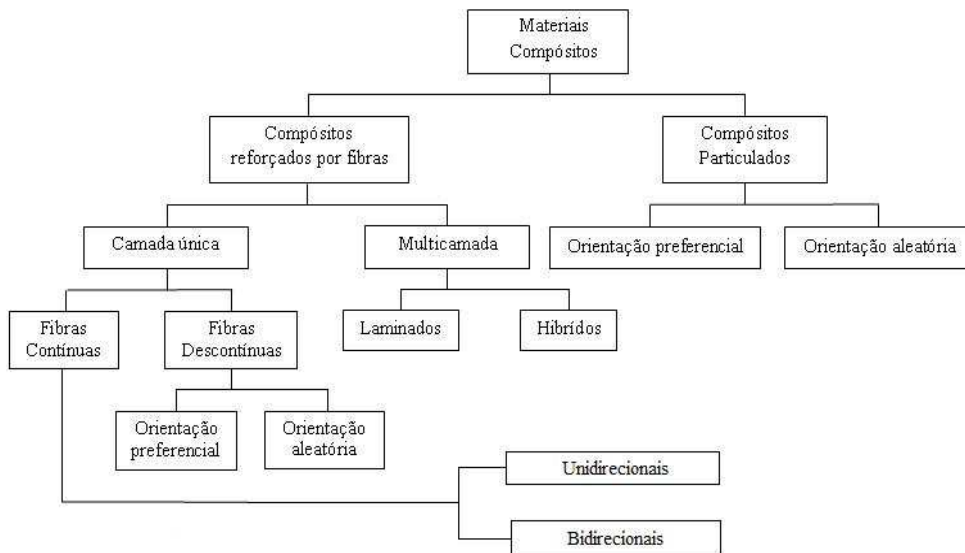


Figura 2.2: Classificação dos materiais compósitos quanto ao tipo de reforço (Autoria própria).

Nos compósitos fabricados com apenas uma camada de fibras, as fibras podem ser classificadas em contínuas ou descontínuas (também chamadas de fibras curtas ou Whiskers).

A Figura 2.3 ilustra a orientação do reforço em função da direção de aplicação da carga no material compósito.

Os compósitos fabricados com uma única camada de fibras contínuas são classificados como compósitos unidirecionais, cujas fibras são alinhadas em uma dada direção preferencial e podem também ser classificados como compósitos bidirecionais ou multidirecionais quando fabricados com tecidos de fibras. Os compósitos laminados são aqueles fabricados com camadas de fibras sobrepostas, sejam unidirecionais ou multidirecionais. Dependendo das exigências de projeto, a sequência de empilhamento das lâminas no compósito laminado pode ser realizada com as camadas em diferentes orientações (TITA, 1999).

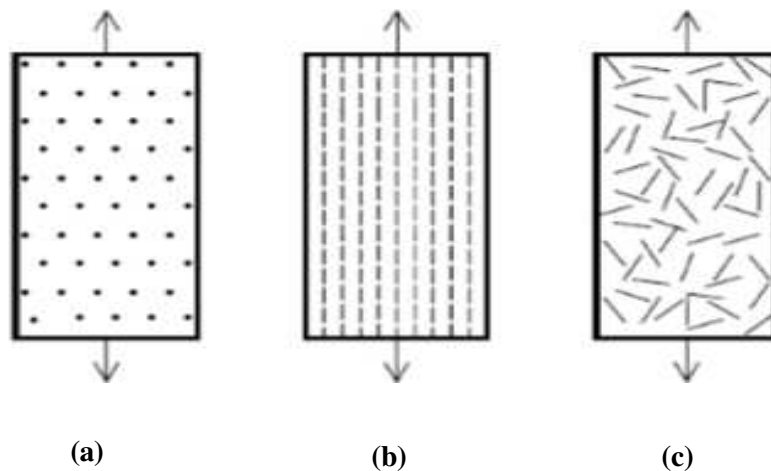


Figura 2.3: Orientações dos reforços no compósito: (a) compósito particulado; (b) compósitos reforçados por fibras curtas orientadas; (c) e fibras curtas aleatórias. Fonte: SILVA (2011).

Os compósitos conhecidos como híbridos são fabricados com mais de um tipo de reforço, como por exemplo, tecidos híbridos de fibras de vidro e kevlar. Além disso, os compósitos podem conter mais de um tipo de reforço, tais como: os compósitos laminados de fibras de vidro reforçados com micro partículas de minerais cerâmicos. A matriz pode ser um material metálico, cerâmico ou polimérico. Dessa forma, os materiais são denominados de compósitos de matriz metálica (CMM), compósitos de matriz cerâmica (CMC), e compósitos de matriz polimérica (CMP), respectivamente. Geralmente, devido à sua ductilidade e fácil moldagem, os metais e os polímeros são mais usados que os materiais cerâmicos como matriz para compósitos. De acordo com esse critério, compósitos poliméricos são, também, mais comuns que os metálicos (PANZERA, 2003).

Os processos de fabricação utilizados na obtenção de compósitos poliméricos podem ser classificados de várias formas, e estão divididos em dois grupos: processo de fabricação com molde aberto e processo de fabricação com molde fechado. Como o próprio nome diz, a característica principal do processo de fabricação com o molde aberto é possuir uma das faces do molde exposta ao ambiente, enquanto que no processo de fabricação com molde fechado, nenhuma das faces do molde fica exposta (CORREIA, 2008).

Dentro da categoria de processos de fabricação com molde aberto estão a moldagem manual (hand lay-up), a moldagem à pistola (spray-up), a moldagem por centrifugação e a moldagem por enrolamento filamental (filament winding). Já a moldagem por compressão BMC (Bulk Molding Compound) ou SMC (Sheet Molding Compound) consiste em processos que utilizam uma prensa hidráulica de duplo efeito e molde de aço aquecido para produção da peça. Na injeção, na RTM e na pultrusão o reforço é impregnado por resina por submersão em um banho anteriormente à entrada na matriz, estes são exemplos de processos de fabricação com molde fechado (CALLISTER Jr., 2008).

De maneira geral, o processo de fabricação de um compósito com molde fechado via RTM se dá em quatro estágios, conforme ilustra a Figura 2.4. Entre os fatores que afetam o processo, estão o projeto, a temperatura e o preenchimento do molde e a molhabilidade do reforço pela resina. Entre estes, o preenchimento do molde é um dos fatores de maior importância e está relacionado ao tipo de reforço e a posição do ponto de injeção, entre outros. Uma falha no projeto do molde pode levar à formação de pontos não-impregnados no reforço, que reduzem as propriedades mecânicas e a qualidade do acabamento superficial (BROCKS, 2011).

O processo de fabricação via RTM é um processo usado na fabricação de compósitos reforçados por fibras contínuas ou mantas (AMICO, 2010) Segundo Potter (1999), o processo de moldagem por transferência de resina foi originalmente desenvolvido por volta de 1940, com pouco sucesso, mas entre 1960 e 1970, o processo obteve industrialmente seu devido reconhecimento. Nos últimos anos, seu desenvolvimento proporcionou aos variados setores industriais um desempenho adequado aliado a um baixo custo, aumentando assim a utilização deste processo junto às indústrias de materiais compósitos.

Outro fator importante para reconhecimento do RTM decorre de fatores ambientais, uma vez que adotando essa perspectiva, já é visível no mercado exterior, que os processos manuais são empregados em pequena escala e estão condenados devido à alta emissão de voláteis.

Segundo Carvalho (2005), a vantagem ocorre devido aos processos de fabricação por molde fechado proporcionarem emissões de voláteis (estireno no caso das resinas poliéster insaturado) bem inferiores aos tradicionais métodos com processo de fabricação de molde aberto. O processo RTM, apresenta valores de emissões em torno de 30% menores que as dos processos tradicionais. Segundo Garay (2010), no processo RTM, por ser um processo hermeticamente fechado, o estireno não é emitido para atmosfera, o que contribui com o meio ambiente e com a saúde de quem o manuseia. Além disso, este processo apresenta ainda outras vantagens em relação aos outros processos de fabricação como: baixo custo de mão de obra, ferramental simples, podendo ser usado para fabricação de peças complexas e com qualidade.

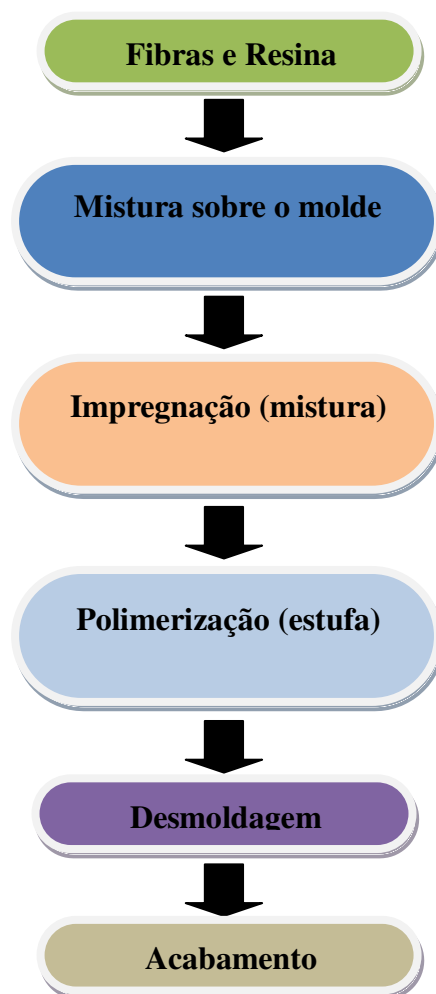


Figura 2.4: Etapas de fabricação dos compósitos (Autoria própria).

A técnica RTM permite a produção de grandes quantidades de peças com boa qualidade de acabamento e forma variada, a custos relativamente baixos. As etapas em que o processo pode ser dividido são vistas na Figura 2.5 e descritas a seguir:

- a) As fibras de reforço são cortadas nas dimensões desejadas e preparadas em mantas;
- b) A cavidade do molde, com a forma desejada para a peça, recebe uma camada de uma substância desmoldante e, em seguida, a preforma fibrosa. O molde é fechado de modo que as suas bordas permaneçam perfeitamente vedadas;
- c) A resina é injetada na cavidade do molde por meio de canais de entrada. Altas pressões podem ser aplicadas fazendo com que a resina avance pela preforma fibrosa empurrando o ar para fora do molde através de saídas localizadas estrategicamente. O bombeamento da resina cessa quando esta atinge as saídas de ar;
- d) Ao final da injeção, a resina é curada quimicamente, solidificando-se e tomando a forma desejada;
- e) O molde é aberto, a peça está finalizada e em seguida, é retirada.

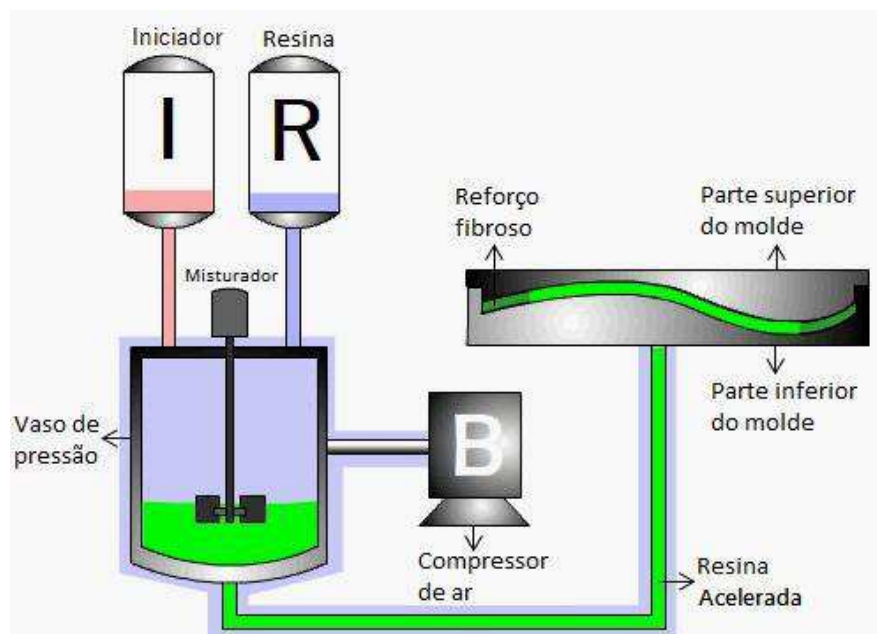


Figura 2.5: Esquema simplificado do processo de moldagem por RTM.

Fonte: Garay (2010).

Segundo Amorim (2007), o molde de RTM deve possuir pelo menos uma entrada, para injeção da resina e uma saída, para permitir, durante a injeção da resina, a saída do ar existente no interior do molde. Em peças maiores, é comum, a presença de vários canais de entrada e saída. Visto os diferentes tipos de processamento de materiais compósitos, a sua adequada escolha deve ocorrer a partir da possibilidade de processamento, e não apenas do desempenho desejado, onde, é de fundamental importância o total envolvimento da equipe de desenvolvimento do produto para o sucesso do projeto, analisando simultaneamente o desempenho e a processabilidade, buscando uma otimização desses parâmetros para proporcionar a produção de produtos com boa relação custo/benefício.

Segundo Garay (2010), é muito importante no estudo do RTM, a análise da permeabilidade do meio poroso. Segundo Han et al. (2000), esta é uma medida da resistência ao fluxo de fluido (resina) no reforço fibroso e pode ser mensurada por dois métodos de fluxo: o retilíneo e o radial. De acordo com Morren et al. (2008), a permeabilidade influencia diretamente o preenchimento do meio fibroso.

A infiltração retilínea é usada para medir, de uma maneira simples e prática, a permeabilidade na direção do fluxo unidirecional. Porém, a infiltração radial possui algumas vantagens sobre a retilínea no que diz respeito à medição da permeabilidade já que é possível determinar, simultaneamente, duas componentes da permeabilidade (K_x e K_y), bem como as principais direções de fluxo em reforços anisotrópicos (LUO et al., 2001).

2.1.2 Materiais compósitos poliméricos

Os materiais compósitos poliméricos estruturais são materiais formados por uma fase contínua polimérica (plástico) reforçada por uma fase descontínua (fibrosa) que se agregam físico-quimicamente após passar por um processo de polimerização (cura), e que também podem ser denominados de plásticos reforçados com fibras.

Em geral, a fase descontínua é formada por fibra de vidro, aramida ou de carbono, dependendo da aplicação final e a fase polimérica é constituída por uma resina termofixa ou termoplástica.

Várias matrizes termoplásticas e termofixas vêm sendo utilizadas como matrizes em compósitos. As resinas termofixas mais utilizadas em compósitos de alto desempenho são as

fenólicas, epóxis, bismaleimidas e poliamidas. Essas resinas exibem excelente resistência a solventes e a altas temperaturas. Estima-se que mais de três quartos de todas as matrizes de compósitos poliméricos sejam constituídas por polímeros termofixos (MATTEWS et al., 1994 apud PAIVA et al., 2006).

Na moldagem dos sistemas termofixos ocorre um “endurecimento” através de um processo de cura, ou reticulação da matriz que acopla as duas fases, proporcionando ao material final, propriedades especiais que definem sua moderna e ampla aplicabilidade. Propriedades como leveza, flexibilidade, durabilidade, resistência e adaptabilidade, tornam os compósitos poliméricos nos materiais do futuro.

Nos últimos anos a procura por materiais ecologicamente corretos levou ao desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais. Os baixos custos destas fibras, originárias de fontes renováveis e inesgotáveis, a baixa densidade, menor abrasão nas máquinas de processamento fazem que o uso destas fibras em compósitos estruturais cresça no setor industrial.

2.1.3 Constituintes do compósito

2.1.3.1 Reforço

Segundo Fonteles (2013) apud George e Thomas (1997), reforços são definidos como constituintes que aumentam determinadas propriedades do compósito em relação à matriz polimérica. Podem ser considerados reforços desde cargas minerais, muitas vezes incorporadas aos polímeros com o intuito de reduzir custos, até fibras de alta resistência. As cargas minerais proporcionam aumentos na rigidez, dureza e, em algumas vezes, na resistência e temperatura de distorção térmica.

Uma forma de classificar os compósitos é por meio do tipo de reforço utilizado, conforme ilustrado na Figura 2.7. Desta forma, os compósitos podem ser classificados em (FONTELES, 2013):

- Particulados (partículas grandes ou dispersas);
- Fibrosos (fibras curtas ou longas);
- Laminados (estruturais).

Compósitos Particulados: são compósitos onde o reforço consiste de partículas, podem ser de origem mineral ou orgânica, apresentarem grandes dimensões ou serem distribuídas de maneira dispersa.

Compósitos Fibrosos: são materiais reforçados por fibras (que, normalmente, apresentam elevada resistência e módulo) embebidas em uma matriz. Os compósitos fibrosos são divididos em duas grandes áreas: os reforçados por fibras curtas (≤ 50 mm de comprimento) e os reforçados com fibras longas (> 50 mm de comprimento). Normalmente as fibras curtas são mais utilizadas como reforço devido à facilidade de fabricação do compósito.

Compósitos Laminados: nos compósitos laminados, camadas individuais da resina e do reforço são colocadas umas sobre as outras e consolidadas com resina para formar um elemento ou uma placa, podendo-se ou não variar a arquitetura, empilhamento, e/ou a natureza do reforço.

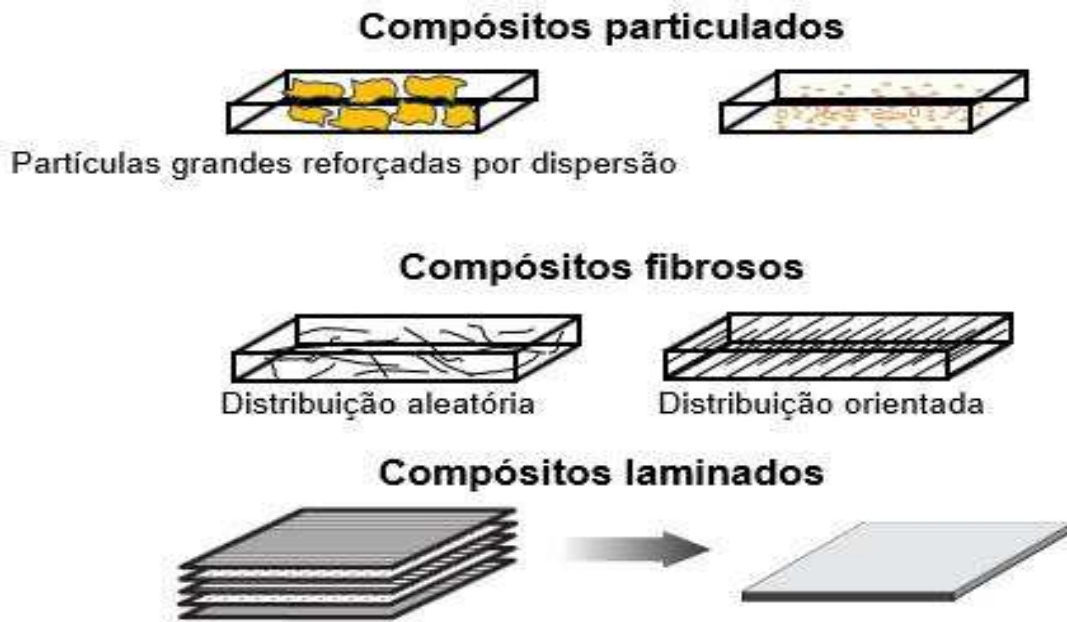


Figura 2.6: Esquema da classificação de reforços em compósitos. Fonte: FONTELES (2013).

2.1.3.2 Matriz polimérica

A matriz polimérica, além de ser responsável pelo aspecto externo do compósito e pela proteção do reforço contra ataques químicos e físicos, tem como principal função dispersar ou

aglutinar o reforço. Quando submetida a uma tensão deve ser capaz de distribuir e transferir as tensões para o componente do reforço. A escolha de uma matriz para uma aplicação estrutural deve ser limitada, inicialmente, ao nível de deformação que ela sofre em relação ao reforço, quando submetida a uma solicitação. A deformação da matriz deve ser compatível com a deformação máxima do reforço (CAVALCANTI, 2006).

Os polímeros são usados na mais ampla diversidade de aplicações dos compósitos uma vez que apresentam propriedades mecânicas adequadas à temperatura ambiente, baixa densidade, fácil processamento e custo reduzido. A principal vantagem dos compósitos de matriz polimérica é o processamento sob altas pressões e baixas temperaturas evitando problemas associados com a degradação do reforço. Por esta razão o desenvolvimento deste grupo de materiais cresceu rapidamente (ZAH, 2007).

As propriedades dos compósitos de matriz polimérica podem variar largamente dependendo dos tipos de matrizes e reforços utilizados e das várias combinações dos mesmos. As suas principais desvantagens residem na impossibilidade de sua utilização sob altas temperaturas, a instabilidade dimensional devido aos elevados coeficientes de expansão térmica, a sensibilidade à radiação e, em alguns casos, a absorção da umidade ambiente pela matriz (VENTURA, 2009).

As matrizes poliméricas podem ser termoplásticas, termofixas ou elastoméricas. Os termoplásticos apresentam a vantagem de amolecerem e fundirem durante o seu aquecimento, voltando a endurecer após o seu arrefecimento. Esta propriedade dos termoplásticos facilita aplicações em técnicas convencionais de compressão para moldar compósitos. A grande ênfase dos estudos atuais com relação às matrizes termoplásticas é desenvolver resinas termoplásticas com resistência térmica elevada (WOLLERDORFER e BADER, 1998). Os termofixos tornam-se permanentemente rígidos quando submetidos ao calor e não amolecem com um aquecimento subsequente. Geralmente são mais duros, mais resistentes e frágeis que os termoplásticos, e possuem melhor estabilidade dimensional. Os materiais termofixos mais utilizados para a matriz de compósitos são epóxi, poliéster e resinas fenólicas de poliamida. Já as matrizes elastoméricas são muito importantes na fabricação em sistemas compósitos resistentes ao impacto (HULL e CLYNE, 1988).

A reação de cura de matrizes poliméricas termofixas é um processo complexo, definido como uma mudança irreversível nas propriedades químicas e físicas de uma determinada formulação resina/iniciador/promotor causada por uma reação química (ITTNER e FELISBERTI, 2000). Em geral, o iniciador decompõe-se gerando radicais livres que ataca as cadeias da resina e do promotor ou agente de cura que reagem entre si formando uma rede tridimensional. No caso de resinas poliéster insaturado, há a formação de radicais livres a partir do iniciador que, por sua vez, atacam a resina poliéster e o monômero de estireno que age como agente de reticulação e então a resina poliéster ativada e o poliestireno em crescimento reagem entre si formando uma estrutura tridimensional, insolúvel e infusível. Essa reação é exotérmica e a viscosidade do sistema aumenta com o tempo de reação até a formação de um sólido. A caracterização do processo de cura é realizada a partir das seguintes etapas:

- a) Tempo de gel (gel time): tempo que decorre desde a adição do iniciador e do acelerador até à obtenção de uma viscosidade característica de um gel.
- b) Pico exotérmico: Temperatura máxima alcançada pelo material após atingido o tempo de gel;
- c) Tempo de desmoldagem: É o tempo necessário para permitir o desmolde do produto sem promover empenos ou distorções; possui relação direta com a sua dureza Barcol;
- d) Tempo de cura: É tempo necessário para que as ligações cruzadas se completem, dando ao material suas propriedades, como por exemplos, resistências mecânica e química. O tempo de cura é também função do teor de catalisador e quantidade de insaturações e concentração do agente de cura.

Assim, o processo de cura torna-se fator fundamental na escolha da matriz, visto que suas etapas tem considerável interferência no processo, como o tempo de processamento (tempo de gel) e pós-processamento (tempo de desmoldagem para viabilizar o preparo do sistema para uma nova injeção) e temperatura de trabalho (elevadas temperaturas podem acarretar em danos ao sistema). Quanto à seleção do ciclo de cura, a escolha dos parâmetros tempo e temperatura estão relacionadas à introdução mínima de tensões residuais no produto, de forma a garantir uma cura completa no menor tempo possível. Assim, a adequada seleção desta etapa também é essencial na qualidade final do produto, visto que a adoção de um ciclo longo com baixas temperaturas influenciariam o custo de produção, além de possivelmente

não possibilitarem a formação das ligações cruzadas de forma completa. A adoção de ciclos curtos com elevadas temperaturas, tendem a reduzir o custo de produção, porém, com uma maior probabilidade de acúmulo de tensões internas, que conseqüentemente fragilizariam o material, seja com o surgimento de trincas ou com a pré-solicitação do material durante o processo de cura.

2.1.3.2.1 Resina poliéster

Os poliésteres são resinas que possuem grupos éster como elementos fundamentais em suas cadeias moleculares. Resultam da reação de condensação de um diol com um diácido e dependendo do tipo do ácido empregado, o poliéster pode ser saturado (termoplástico) ou insaturado (termofixo) (BLASS, 1985).

Os poliésteres saturados são obtidos pela reação entre um diálcool e um diácido saturado, cuja cadeia molecular é composta apenas por simples ligação entre os átomos de carbono, o que caracteriza a flexibilidade dos produtos obtidos com o poliéster saturado. Pode ser utilizado com ou sem reforço, e sua utilização é bem diversificada: filmes, fibras sintéticas, plastificantes (poliméricos) e até produtos de engenharia como tampa de tanque de combustível, etc. Um exemplo é o poli (etileno tereftalato) PET, que é obtido pela reação do etileno glicol com o ácido tereftálico (CHERMISINOFF, 1998).

Os poliésteres insaturados são obtidos a partir de diácidos insaturados, um diácido saturado e um diol, resultando em um pré-polímero, cuja cadeia molecular é composta por ligações simples e duplas entre os átomos de carbono. O pré-polímero é diluído em monômero vinílico inibido para facilitar sua estocagem e posterior utilização. Inicialmente, o sistema encontra-se no estado líquido e após a adição de agente de cura as ligações duplas no pré-polímero são ativadas e o monômero vinílico polimeriza formando “pontes” entre as cadeias do pré-polímero que se solidificam formando uma estrutura termofixa, irreversível, reticulada e inflexível (CHERMISINOFF, 1998; GOODMAN, 1998).

As propriedades mais importantes dos poliésteres insaturados incluem facilidades de manipulação, cura rápida sem liberação de substâncias voláteis e tóxicas, cores claras, estabilidade dimensional e, geralmente, um bom balanço de propriedades mecânicas, elétricas e químicas. As principais aplicações de resinas poliéster reforçadas por fibras são: armações

de barcos (remos e objetos recreativos); meios de transportes (carcaças, partes para transporte de passageiros e cabines de caminhões); bens de consumo (diversos artigos de bagagens, vara de pesca, cadeiras, carcaças de eletrodomésticos etc.) e materiais de construção como tubos, calhas, entre outros (CARVALHO e BRETAS, 1988).

2.2 Fibras vegetais

O estudo sistemático de fibras com finalidade de reforço de matrizes começou na Inglaterra em 1940. Uma das principais forças motrizes do desenvolvimento de compósitos de resina e fibras como material estrutural foi a necessidade durante a II Guerra Mundial para radomes que protegem às antenas de radar das intempéries (GORDON et al.,1980). Inicialmente foram utilizados laminados sanduíche compostos de resina Bakelite reforçadas com camadas de fibra de algodão (CADY, 2004). Guimarães (1982) desenvolveu pesquisas orientadas às aplicações na construção civil, com 19 fibras relacionadas e potencialmente úteis para reforço de matrizes cimentícias. A partir de propriedades mecânicas (resistência à tração, módulo de elasticidade e alongamento na ruptura), características físicas, relação entre comprimento e diâmetro, possibilidade de cultivo no Brasil, custo e durabilidade, o autor selecionou algumas fibras como as mais adequadas e, entre essas fibras cita o sisal. As principais vantagens das fibras naturais vegetais, segundo Marinelli (2008), são:

- as fibras de vegetais são materiais renováveis e sua disponibilidade pode ser considerada ilimitada;
- as fibras vegetais são menos abrasivas que as fibras artificiais usualmente utilizadas como reforço, como, por exemplo, fibra de vidro, e assim geram um menor desgaste dos equipamentos envolvidos no seu processamento;
- são materiais biodegradáveis, característica crucial para componentes que após esgotar a sua vida útil devem ser descartados;
- as fibras vegetais representam uma nova fonte de renda para a população rural, podendo evitar o enorme fluxo do campo para a cidade, verificado principalmente nas regiões norte e nordeste do país;
- possuem baixa densidade e alta deformação quando comparadas com materiais similares neste campo de aplicação; e apresentam baixo custo, em relação aos reforços atualmente empregados.

Fibras como sisal, coco, juta, rami, folha de abacaxi, algodão, curauá e linho, entre outras, estão sendo estudadas como carga de reforço em compósitos, devido ao seu grande potencial.

A juta é uma fibra que continua a ser investigada como reforço por ser leve, atóxica, apresentar módulo relativamente elevado, alta resistência específica e um custo dez vezes menor que a fibra de vidro. Já a fibra de algodão tem propriedades físicas muito promissoras em compósitos polímero/fibra de algodão (geralmente processados por extrusão); porém, a maior parte dos estudos sobre esses materiais tem se centrado em compósitos matriz termoplástica /fibra de algodão.

As fibras naturais celulósicas são hidrofílicas e geralmente incompatíveis com matrizes poliméricas hidrofóbicas. Para melhorar as propriedades de compósitos é necessário tratar as fibras ou utilizar agentes compatibilizantes, que promovam ligações químicas entre a matriz e a carga de reforço, ou que alterem a tensão superficial da carga de reforço, para permitir um molhamento eficiente da matriz pela fibra, melhorando a adesão entre a carga de reforço e a matriz.

A interação da fibra no compósito não é apenas uma função da resistência à tração da fibra, do seu comprimento e da fração volumétrica desta no compósito, mas também depende da natureza química e da ligação física entre a fibra e a matriz polimérica. As interações fibra/matriz desempenham um papel fundamental na transferência de tensões da matriz para a fibra. A ligação entre a fibra e a matriz é criada durante a fase de produção dos materiais compósitos (PRACELLA, 2006). A presença de água livre e grupos OH, especialmente nas regiões amorfas, prejudica a aderência da fibra na matriz. A alta absorção de água e umidade na fibra de celulose provoca inchaço e efeito plastificante, o que resulta em instabilidade dimensional e baixas propriedades mecânicas (PITA, 1996). A incompatibilidade de componentes é responsável por uma baixa aderência na interface fibra/matriz que causa uma diminuição das propriedades mecânicas desses materiais (PRACELLA, 2006).

As análises de propriedades físicas e mecânicas de fibras vegetais tais como sisal, coco, algodão, folha da bananeira, folha do abacaxi, palmeira, entre outros, foram feitas por Satyanarayana (2000), que sugeriram modificações ou tratamentos superficiais para melhorar as propriedades de resistência mecânica, para a sua utilização em materiais compósitos, em substituição às fibras sintéticas.

Satyanarayana (2000) relacionou as propriedades mecânicas de várias fibras vegetais, descritas na Tabela 2.1 à seguir.

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas de várias fibras vegetais. Fonte: SATYANARAYANA (2000).

Fibras	Módulo Elástico (GN/m²)	Resistência á Tração (MN/m²)	Módulo em Flexão (MN/m²)	Alongamento na Ruptura (%)
Sisal	9-22	568-640	12,5-17,5	3-7
Abacaxi	34,5-82,5	413-1627	0,2-0,40	0,8-1
Coco	4-6	105-175	15-20	17-47
Banana	7-20	54-754	2,0-5,0	10-3,5
Juta	18	226	0,3-0,5	1,3
Rami	-	870	0,08-0,12	3-4
Algodão	1,1	200-400	0,03-0,10	6-7
Palmeira	4,4-6,1	180-215	-	7,0-15,0

2.2.1 O uso das fibras vegetais em compósitos

O uso de fibras vegetais para produção de compósitos, data provavelmente do princípio da civilização, quando se usava a palha ou capim ou capim para reforçar tijolos de barro crus, conhecidos como “adobe”. Com o advento do fogo, os tijolos de argila queimados passaram a substituir quase que completamente os tijolos de adobe.

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

Apesar do grande número de pesquisas que vêm sendo executadas visando ampliar o uso das fibras vegetais, ainda assim elas não se apresentam como uma escolha automática para reforço de matrizes poliméricas, pois há problemas relacionados à sua estrutura que dificultam a sua utilização. Problemas como: baixo módulo de elasticidade, alta absorção de água,

susceptibilidade ao ataque de fungos e insetos, baixa durabilidade das fibras em meio alcalino, variação das propriedades das fibras de mesmo tipo e a compatibilidade da interface fibra-matriz (SILVA, 1999 apud TOLEDO FILHO, 1993) são frequentes. A partir da Tabela 2.2, pode-se fazer uma breve comparação entre as propriedades das fibras vegetais e das fibras de vidro (AGOPYAN E SAVASTANO, 1997).

A rugosidade superficial é uma característica inerente às fibras vegetais que favorece a adesão em resinas poliméricas, porém, a sua difícil impregnação e a sua higroscopia impedem sua utilização em ambientes úmidos. O que leva estudiosos no Brasil a estudarem a sua utilização é a abundância das mesmas no país, seu baixo custo e suas boas características mecânicas (D'ARSIE, 1986 apud FONSECA, 1998).

Todas as fibras vegetais são higroscópicas, ou seja, absorvem menor ou maior quantidade de água da vizinhança sem ficarem encharcadas. A quantidade de água que uma determinada fibra vai absorver depende da sua composição química e da umidade presente na atmosfera em que a mesma se encontra; a taxa de absorção diminui à medida que se estabelece um equilíbrio entre as fibras e o ambiente externo (ARAÚJO e CASTRO, 1984). Quando essa absorção ocorre durante a confecção do compósito, as interações fibra-matriz são diminuídas e o compósito seco após sua confecção, há uma retração da fibra, o que prejudica ainda mais a interação interface fibra-matriz, e as propriedades mecânicas do material são afetadas negativamente.

Tabela 2.2 – Propriedades físicas e mecânicas de algumas fibras vegetais e de vidro. Fonte: adaptado de AGOPYAN E SAVASTANO, 1997.

Fibras	Massa específica (kg/m³)	Absorção máxima (%)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Coco	1177	93,8	95 a 118	2,8
Sisal	1370	110	347 a 378	15,2
Juta	1500	214	240 a 550	17,4 a 32
Vidro-E	2500	-	3500 a 4500	73 a 87

2.2.2 Fibras de juta

A juta, de nome científico *Corchorus capsularis*, é uma fibra têxtil vegetal que provém da família Tilioidae, cultivada em climas úmidos e tropicais na região norte do país, destaca-se entre as fibras naturais com potencial de aplicação em compósitos. É uma fibra de alta resistência que, quando misturada a polímeros, pode dar origem a produtos com menor densidade e boa resistência com potencial para diversas aplicações (NETO et al., 2007). Alcança um tamanho de 3 a 4 metros e o seu talo tem uma espessura de aproximadamente 20 mm. A fibra útil é contida entre a casca e o talo interno e a extração é feita pelo processo da maceração. A alta temperatura das regiões nas quais a juta é cultivada favorece a fermentação e, desta forma, consegue-se a maceração em 8 a 10 dias, o que permite a fácil retirada da casca da planta e separação da fibra da parte lenhosa do talo. O comprimento das células elementares da juta é em média de 0,80 mm, e o diâmetro varia de 0,01 a 0,03 mm, essa fibra também possui rigidez por ser lignificada. O tempo necessário para maceração depende de vários fatores, como: temperatura da água, estado mecânico da água e idade da planta na ocasião da colheita (ALVES, 2008).

A temperatura ótima para proliferação de bacilos úteis à maceração varia de 30 a 35 °C. O clima da Amazônia, sendo tropical, é muito favorável à maceração, de modo que o problema de temperatura baixa praticamente não existe. O estado mecânico também é importante. Estando à água em repouso, a maceração é mais rápida porque a massa líquida se aquece mais facilmente e o volume de bacilos aumenta à medida que eles se reproduzem, visto não haver o arraste dos mesmos, o que não acontece na água em movimento onde não só a temperatura como a concentração de bacilos, deve ser menor, fazendo com que a maceração seja mais lenta. (NETO et al., 2007).

A fibra de juta tem boa afinidade para corantes diretos e para corantes básicos e tem como seus principais componentes a celulose, hemicelulose e lignina. Essa fibra é bastante higroscópica, regulando a umidade em 12%, o que a torna a matéria prima ideal para a sacaria, evitando tanto o ressecamento quanto a fermentação do produto acondicionado. É uma cultura fácil, acompanhada de uma maceração trabalhosa e de pouco rendimento, sem a utilização de agrotóxicos ou fertilizantes. Introduzida no Brasil por Ryota Oyama, a cultura foi feita inicialmente por japoneses, tornando-se a seguir uma das principais atividades

econômicas das populações ribeirinhas da região amazônica, sendo um fator fundamental da fixação de mais de 50 mil famílias ao campo (ALVES, 2008).

A imigração japonesa na Amazônia promoveu uma singular experiência de desenvolvimento agrícola com a introdução das lavouras de juta nas várzeas do rio Amazonas e de pimenta-do-reino nas áreas de terra firme, ambas trazidas de possessões britânicas, como antítese da transferência da seringueira, levada pelos ingleses para as suas colônias na Ásia (HOMMA, 2005).

A lavoura de juta, figura 2.8 (a), atingiu seu auge na década de 1960, com mais de 50 mil agricultores envolvidos no seu plantio e representou mais de um terço do PIB (Produto Interno Bruto) do Estado do Amazonas, levando o Brasil a autossuficiência de fibra de juta em 1952. No entanto, torna novamente importador em 1970 e tem o seu gradativo desaparecimento na década de 1990 (HOMMA, 2005).

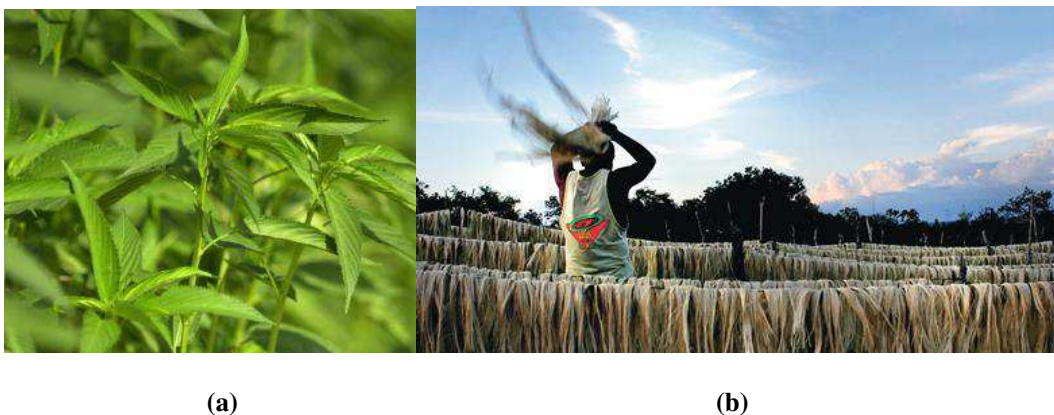


Figura 2.7: a) Planta de juta e b) extração da fibra de juta (HOMMA, 2005).

A fibra de juta possui baixo custo, abundância, maleabilidade e, por apresentar, isoladamente, um bom conjunto de propriedades como, por exemplo, elevado módulo e resistência específica, tem características para ser usada como reforço em polímeros. Compósitos reforçados por essa fibra podem ser usados em telhados de casas populares, painéis e partes de carros, placas para indústria eletrônica, mesas e divisórias para escritório, orelhões, bancadas para laboratórios, tanques de armazenamento, e outros (MELLO et al., 1995).

2.2.3 Fibras de algodão

O algodão é usado como fibra têxtil há mais de 7.000 anos. Pode-se dizer que está ligado à origem mais remota do vestuário e à evolução da produção de artigos têxteis. Por séculos, acreditou-se que o algodão era um produto do Velho Mundo e que foi introduzido pelos exploradores. Hoje, os cientistas têm obtido dados que indicam que os indígenas das Américas do Norte e do Sul, bem como os da Ásia e da África, já usavam as fibras de algodão para a confecção de fios e tecidos (SILVA e CARVALHO, 1999).

O algodão constitui uma das principais fibras têxteis produzidas, com comercialização e uso em larga escala mundial. No Brasil, é a principal fibra têxtil, tendo suas fontes de produção localizada nas regiões Nordeste, Sul e Centro-Oeste do país. As principais características para a produção de fios de algodão de boa qualidade são: o comprimento e a resistência da fibra (SILVA, 2006).

O algodão é uma das fibras naturais que não apresentam lignina em sua composição, ou seja, são apenas, celulósicas, e por isso não são tão rígidas como as lignocelulósicas (tais como o sisal) que combinam elevada resistência à tração e à flexão (SILVA, 2006).

Uma das principais vantagens da utilização das fibras de algodão, na preparação de compósitos, é que estas são processadas industrialmente e em grande escala para a indústria têxtil, facilitando assim a obtenção de fibra com propriedades reprodutíveis. Ainda, como é produzida em larga escala, sua disponibilidade é garantida (SILVA, 2006). Uma vantagem na utilização de fibras de algodão na produção de tecidos híbridos é que os teares industriais estão adaptados a esse tipo de fibra de modo que se pode simplesmente introduzir outro tipo de fibra (sisal, juta, rami ou vidro, por exemplo) na trama, sem ter que adaptar o tear ou desfazer o urdume.

2.2.4 Influência da adesão e interface fibra/matriz nas propriedades mecânicas dos compósitos

A interface fibra/matriz comporta-se como um importante elo entre os materiais constituintes da estrutura dos compósitos poliméricos, pois transmite os esforços do carregamento para as fibras e pode ser definida como a região que está próxima a superfície das fibras e junto à matriz que as envolve. A Figura 2.9 ilustra a relação entre a tensão e a

deformação dos materiais compósitos em relação às suas fases. Em geral as fibras apresentam maior resistência e módulo, e menor alongação na ruptura do que a matriz. Portanto, a deformação sofrida pelo compósito é limitada pela deformação máxima da fibra; seu módulo, via de regra, é intermediário ao de seus componentes individuais e dependente da concentração relativa de ambos. A resistência do compósito também depende da identidade e concentração de seus componentes individuais, mas é fortemente afetada pela interação fibra-matriz. Quanto mais forte essa interação, mais próxima será a resistência medida experimentalmente da prevista teoricamente.

Os materiais compósitos são submetidos a testes de torção e arrancamento (pull out) para medir a resistência ao cisalhamento e à tração da interface fibra-matriz (SHIINO, 2011).

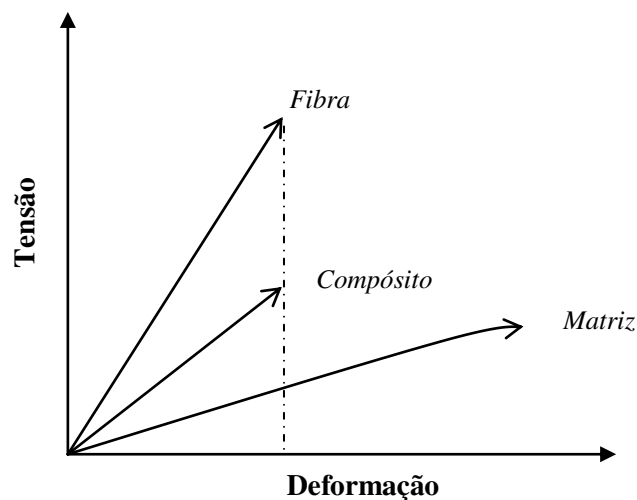


Figura 2.8: Diagrama esquemático da Tensão x Deformação dos materiais compósitos em relação às suas fases. Fonte: NASCIMENTO (2009).

Um dos fatores que favorece a interação interfacial é o fenômeno de contração que a matriz polimérica sofre durante a sua cura ou a sua solidificação. Para que ocorra uma melhor distribuição de tensões sobre a superfície do reforço, durante a cura, é necessário que ocorra um molhamento perfeito do reforço pela resina (CAVALCANTI, 2006).

O comportamento de diversos sistemas multicomponentes tais como materiais compósitos, em massa ou em camadas, e blendas poliméricas depende não somente da composição, morfologia e das propriedades dos constituintes, mas também da natureza da região interfacial (MITCHELL, 2004). A interfase entre o reforço e a matriz é muito importante, sendo considerado o terceiro componente de um compósito. Para que haja efetiva

transferência de tensão, a interfase (fase de estrutura diferenciada na interface) deve ser pouco espessa. A boa transferência das tensões de cisalhamento é favorecida pela adequada adesão fibra-matriz polimérica e tem influência na rigidez, tenacidade e comportamento de falha do compósito, principalmente sob determinadas condições ambientais (REZENDE, 2002).

A adesão inadequada entre as fases envolvidas poderá provocar o início de falhas interfaciais, comprometendo o desempenho do compósito (MITCHELL, 2004).

2.3 Materiais compósitos reforçados com fibras vegetais

Compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais possuem vantagens como, baixo custo, boas propriedades de isolamento térmico e acústico, disponibilidade e desgaste reduzido da ferramenta de usinagem em operações de desbaste.

Como alternativa para melhorar as propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras vegetais, tais como a impregnação, pode-se utilizar a incorporação de monômeros como solvente e agente de reticulação nas matrizes, o que facilita o preenchimento dos vazios dos lignocelulósicos, melhorando a resistência à compressão e a resistência à abrasão (dureza) dos sistemas. Além disso, impõem-se restrições à livre movimentação de água para o interior da matriz, limitando as condições para a biodeterioração. Esses polímeros também podem ser quimicamente modificados com a introdução de substâncias ou grupos tóxicos e com isso pode-se obter um material resistente ao apodrecimento (MEYER, 1981).

Compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais também podem ser moldados e produzidos nas mais diversas formas, utilizando-se da tecnologia, modificações das fibras e dos agentes de reticulação ou de acoplamento. Para solucionar problemas relativos à densidade, durabilidade em condições ambientais adversas, alta resistência mecânica, instabilidade dimensional, biodegradabilidade, flamabilidade e a sua degradação causada por raios ultravioleta, ácidos e bases, fibras lignocelulósicas podem ser combinadas com outros materiais. Como exemplo, pode ser citado, as fibras de vidro, plásticos, inorgânicos e embalagens multifoliadas, e também para produzir novos materiais que atendem a exigências específicas dos produtos finais (ROWELL, 1994).

Dentre os vários tipos de fibras estudadas, a juta apresentou a maior tendências ao inchamento (12-15%) em chapas produzidas pela Siempelkamp Company (KOZLOWSKI et

al., 1993), mostrando que há necessidades de se estabilizar essas fibras, através de modificação químicas, ou com tratamento superficiais.

Uma das maiores limitações dos compósitos reforçados com fibras vegetais é sua baixa resistência ao impacto, que pode ser melhorada através de modificações da matriz ou dos reforços. Por exemplo, no caso da modificação da matriz através de copolimerização ou incorporação de um material flexível, a tensão aplicada é transferida para essa fase mais dúctil e dissipada, ao invés de se acumular em regiões indesejáveis que poderiam acarretar o colapso do material (ENGLISH et al., 1996).

Fibras naturais como o sisal, a juta e o coco têm atraído a atenção de cientistas, em função da sua disponibilidade, por serem recursos renováveis, terem preços acessíveis e por melhorarem as propriedades mecânicas dos compósitos em que são usados como agentes de reforço (MITRA et al., 1998).

A alta resistência das fibras vegetais não tem sido explorada intensivamente em compósitos, com reforços fibrosos, por serem higroscópicas e por terem pouca molhabilidade com as resinas de matrizes poliméricas. Para o seu uso, se faz necessário um amplo estudo de modificadores químicos e físicos a fim de viabilizar a sua aplicação industrial. Essas características são decorrentes da presença de grupos hidroxila e grupos polares em vários constituintes da fibra, principalmente celulose e lignina (RANA et al, 1998).

Esses compósitos resultam em uma combinação única de materiais com várias propriedades tais como: elevado módulo e resistência específica e alta resistência à fadiga e ao impacto. Produtos fabricados com materiais similares, como compósitos de matriz polimérica com fibras sintéticas, têm sua utilização bastante restrita devido ao preço, o que justifica o uso desses materiais para aplicações específicas, como nas indústrias de aeronaves e automóveis (MITRA et al.,1998). Há uma grande quantidade de compósitos preparados a partir de uma matriz polimérica com fibras vegetais (BLEDZKI e GASSAN, 1999).

Esse tipo de compósito é ambientalmente atraente, além de ser uma alternativa aos materiais compósitos de polímeros reforçados com fibras de vidro ou de carbono (KALIA et al., 2011). A utilização de fibras naturais, em especial, irá diminuir os problemas de descarte de produtos reduzindo a poluição ambiental (KALIA et al., 2011).

Os compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais são materiais extremamente valiosos. Nestes compósitos, fibras vegetais, como cânhamo, sisal, juta, kenaf, etc. podem ser utilizados como reforço para matrizes poliméricas. Novas regulamentações ambientais e

conceitos de sustentabilidade, o crescimento da consciência ecológica, social e econômica, bem como o alto custo dos recursos petrolíferos tem aumentado o uso de recursos naturais (FARUK et al., 2012).

Scopel e Gregolin (2012) realizaram uma análise de patentes associadas ao sisal entre 1960-2009, e verificaram a importância crescente dessa fibra vegetal como reforço de compósitos plásticos, e evidenciaram o grande interesse dos países desenvolvidos, sendo a Alemanha e os Estados Unidos os maiores depositantes na área. Relataram ainda que o Brasil detém apenas a 9ª posição no patenteamento e, apesar de ser o maior produtor mundial dessa fibra, nenhuma empresa ou instituição de origem brasileira se encontra entre os 10 principais titulares mundiais.

A escolha correta de um compósito para uma dada aplicação depende, entre outros fatores, das características da fibra e da matriz utilizadas e do método de fabricação.

Para uma correta seleção do compósito de fibras vegetais, devem ser analisadas as seguintes características:

- Propriedades da fibra vegetal: Propriedades mecânicas, biológicas, térmicas, físicas, químicas, além da disponibilidade, qualidade e custo da fibra.
- Propriedades da matriz: Propriedades térmicas, química, mecânica, física, ambiental, além da toxicidade e o custo do polímero;
- Características do compósito: Requisitos estruturais, mecânicos, físicos, térmicos, custo geral;
- Desempenho geral do compósito: Resistência mecânica, resistência ao tempo e as condições ambientais, absorção de água e durabilidade;
- Desempenho específico do compósito: Requisitos específicos com base na função desejada ou aplicação devem ser considerados, por exemplo, no caso da indústria automotiva características como peso, propriedades de isolamento térmico e acústico, impacto social, segurança, etc., devem ser analisados.

2.3.1 Avaliação de propriedades mecânicas em materiais compósitos

Uma lâmina é tida como a unidade básica que constitui um material compósito. Esta é uma fina camada de fibras envolvidas pela matriz, na qual o material de reforço pode estar orientado em uma mesma direção, entrelaçado formando um tecido ou disperso

aleatoriamente. Para a fabricação do compósito, múltiplas lâminas são sobrepostas seguindo arranjos diversos, de acordo com as propriedades desejadas para o material.

A configuração de um material compósito é fator determinante de suas propriedades mecânicas e é definida pelo número de lâminas (camadas) sobrepostas, bem como pelo ângulo de orientação das fibras. Com o crescente uso de materiais compósitos pela indústria se faz necessária a adoção de um padrão para identificação da configuração do material. Materiais compósitos com fibras unidirecionais, são identificados como: $[0^\circ]$. Quando o número de camadas (n) utilizado no processo é conhecido, e a orientação de todas as camadas é a mesma, a configuração do material pode ser identificada como: $[0^\circ]_n$ (ADAMS et al., 2003) (Figura 2.11).

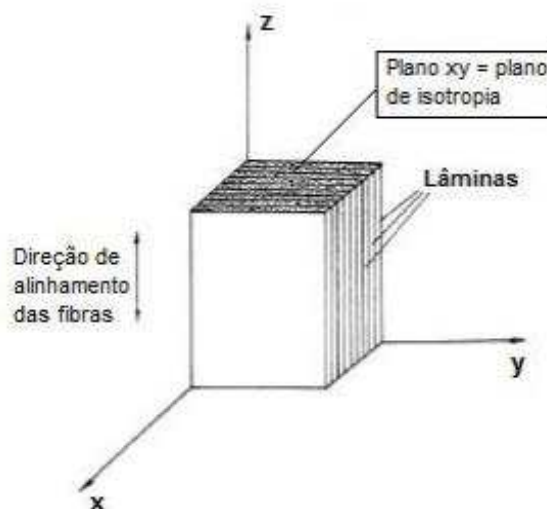


Figura 2.9: Materiais transversalmente isotrópicos (ADAMS et al., 2003).

A fibra reforça o material de maneira mais eficiente na direção longitudinal ao seu eixo, também chamada de direção de alinhamento das fibras. Portanto, na direção longitudinal as propriedades mecânicas do material compósito são mais elevadas. As propriedades analisadas neste trabalho foram medidas na direção longitudinal das fibras de juta (que exibem propriedades mecânicas mais elevadas do que as das fibras de algodão). Vale ressaltar que, para compósitos com fibras de carbono alinhadas, a diferença de desempenho do material quando submetido à esforços na direção de alinhamento da fibra e na direção transversal é muito significativa pois as fibras são anisotrópicas, o que significa dizer que suas propriedades variam segundo a direção do esforço. Ao compararmos as fibras vegetais com as de carbono

verifica-se que a razão entre a tensão longitudinal e a tensão transversal das fibras é muito maior para a fibra de carbono, o que implica em dizer que razão entre as propriedades longitudinais e transversais de compósitos polimérico reforçado por fibras de carbono é significativamente maior do que se ele fosse reforçado por fibras vegetais com o mesmo teor volumétrico de fibras .

Elzubair e Suarez (2012) verificaram que os compósitos de polietileno reciclado/fibra de piaçava apresentam uma mudança gradual nas propriedades mecânicas e nos mecanismos de fratura com o aumento do teor de fibras. Compósitos com 15 % e 20 % de fibras de piaçava exibiram o melhor desempenho mecânico. Uma vez que as fibras de celulose de origem vegetal são, em geral, polares e hidrofílicas, enquanto os termoplásticos são em sua grande maioria apolares e hidrofóbicos, essa falta de compatibilidade leva a má adesão e a um material compósito com propriedades mecânicas insatisfatórias. A adesão da fibra-matriz pode ser melhorada pela modificação da superfície das fibras para torná-las mais compatíveis com a matriz, ou através da introdução de um agente de acoplamento que adira bem em ambas, tanto nas fibras quanto a matriz. Substâncias como lignina, pectina e hemicelulose presentes na parede celular das fibras lignocelulósicas são responsáveis pela união das microfibrilas de celulose em conjunto, bem como por unir fibras adjacentes para formar feixes de fibras.

As propriedades mecânicas de um material compósito dependem, entre outros fatores, da adesão fibra-matriz e podem ser avaliadas sob dois pontos de vista distintos: micro e macromecânica. A micromecânica é uma análise da interação entre constituintes em um nível microscópico, através da qual a partir das propriedades dos constituintes estima-se as propriedades de uma lâmina. Já a macromecânica analisa um material compósito em escala macroscópica, inserindo a configuração do arranjo de lâminas na determinação do comportamento mecânico do material. Uma visão resumida de cada abordagem será dada a seguir, objetivando identificar os principais fatores que caracterizam mecanicamente o material. O esquema apresentado na Figura 2.12 ilustra as duas abordagens.

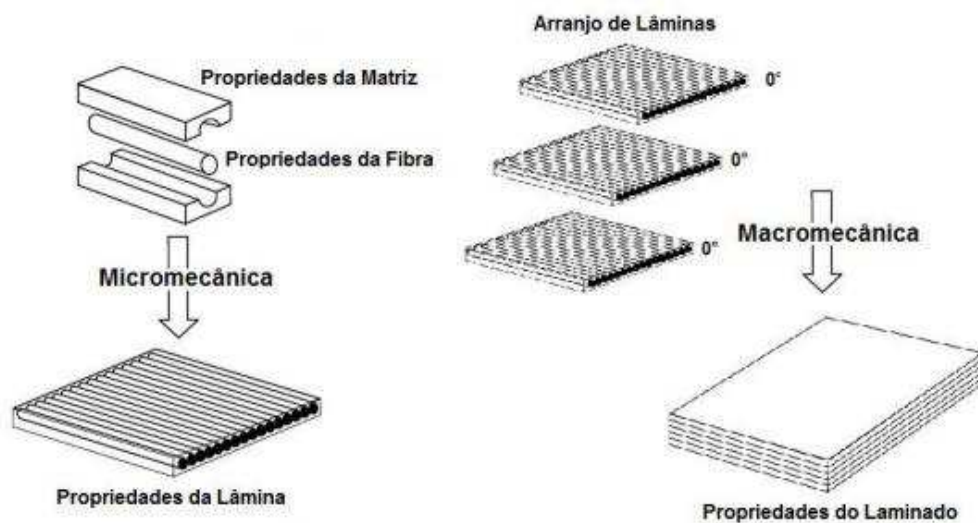


Figura 2.10: Esquema representativo das abordagens micromecânica e macromecânica (ADAMS et al., 2003).

2.3.2 Sorção de água de compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais

Desde a década de 1970, pesquisas têm sido realizadas para o entendimento do mecanismo de absorção de umidade em polímeros e compósitos bem como para melhorar sua resistência à umidade.

Vários materiais possuem a capacidade de absorver umidade em sua estrutura; isso ocorre devido aos vazios presentes em sua composição que tendem a acumular umidade. De uma forma geral, para os casos de aplicação estrutural, não é interessante a presença de vazios nos compósitos; quanto maior for a capacidade do material de absorver umidade, mais distante de suas características originais esse material irá se encontrar.

A absorção de água do compósito é dependente do teor de vazios, afinidade química da matriz, polaridade e formação de pontes de hidrogênio, da natureza da fibra, da fração volumétrica de fibras, e da geometria do tecido.

Rao et al. (1981) pesquisaram a absorção de água em compósitos de matriz poliéster e epóxi com fibras de juta unidirecionais não tratadas, com umidade constante e temperatura ambiente. Visto que, a resina poliéster é um sistema completamente diferente da resina de epóxi, a vantagem da resina de poliéster é que seu custo é de 2 a 3 vezes mais baixo que a de

epóxi, consegue-se mais facilidade no controle e produção em escala por conta da sua a secagem que é controlada pelo catalizador P_{MEK}. A desvantagem é a sua permeabilidade, pois na secagem dos solventes torna a resina porosa, absorve água lentamente com o uso Já a resina epóxi é um material mais nobre, não possui solventes e sua cura só ocorre quando os dois componentes (Resina Epóxi e Endurecedor) cada na sua proporção são misturados, a desvantagem além de custo maior é a necessidade de controlar a temperatura e umidade no processo de produção e necessidade de pós cura em estufa. Dessa forma, para esta pesquisa os compósitos foram curados à temperatura ambiente por 24 horas sob pressão de 40 psi e pós-curados à 100°C no tempo de uma 1 hora. Foi observado que a cinética de absorção aumentou com o aumento do teor de fibras, e o tempo necessário para atingir o equilíbrio de absorção diminuiu com o teor de fibras, isto nestas condições é atribuído ao aumento do coeficiente de difusão, Muñoz e García-Manrique (2015), dos compósitos.

Sensarzadeh e Amiri (1985) estudaram compósitos poliéster reforçado com tecido de juta e os efeitos do pré-tratamento da juta com tetrahydrofurano, poli (acetato de vinila) e ácido acrílico, nas suas propriedades de resistência à tração e ao impacto, absorção de água e reações químicas ocorridas nestes sistemas. Os compósitos com juta tratada com tetrahydrofurano mostraram uma queda na resistência ao impacto e elevada absorção de água, enquanto que os compósitos com juta tratada poliacetato de vinila (PVAc) tiveram melhora limitada nas propriedades mecânicas e na absorção de água. Já compósitos de juta tratadas com ácido acrílico apresentaram elevadas propriedades mecânicas e baixa absorção de água.

Segundo Mohanty e Misra (1995), as fibras lignocelulósicas têm baixa molhabilidade e adesão com a resina poliéster; o que é atribuído à sua natureza hidrofílica. As fibras lignocelulósicas, possuem grande número de grupos OH livres que absorvem umidade, enquanto a matriz utilizada, apesar de possuir alguns grupos OH e COOH terminais, é essencialmente hidrofóbica. A umidade das fibras vegetais afeta negativamente as propriedades dos compósitos, conforme reportado em muitos trabalhos que tratam das propriedades mecânicas de compósitos poliméricos. Compósitos reforçados por fibras com alto teor de umidade podem apresentar vazios ou porosidades na interface, empobrecendo a adesão na interface fibra/matriz e causando a deterioração das suas propriedades.

Estudos mostram que a absorção de água em compósitos depende de vários fatores, tais como temperatura, orientação do reforço, fração volumétrica da fibra, natureza da fibra

(permeável ou não), área de superfície exposta, difusão e proteção superficial (MARCOVICH et al., 1999).

A difusão de umidade em um compósito, em geral, depende de fatores como teor de fibras, quantidade de vazios, umidade e temperatura. Este fenômeno pode ser explicado, considerando as características de absorção de água pelas fibras vegetais. Quando expostas à ação da umidade, as fibras vegetais incham e, como resultado do inchaço das fibras, há acúmulo de tensões e a ocorrência de micro fissurações na resina. O elevado teor de celulose nas fibras vegetais favorece ainda mais a penetração de água na interface e a formação de microfissuras induzidas pelo inchaço das fibras levando à redução de propriedades mecânicas e até mesmo a falha do compósito (BISMARCK et al., 2002). Com a formação de fissuras no compósito causadas pelo aumento nas dimensões das fibras, o transporte de umidade aumenta no interior do sólido. As moléculas de água agem na interface, provocando o descolamento da fibra e da matriz; temperaturas mais elevadas aceleram a absorção de umidade. Quando a temperatura de imersão é aumentada, o tempo de saturação de umidade é grandemente reduzido.

É importante estudar o comportamento do material em um ambiente higrotérmico porque a eficiência da interface é crítica nas propriedades mecânicas em curto prazo, e na durabilidade em longo prazo. A resistência da adesão interfacial depende de diversos parâmetros, entre eles, a natureza química da matriz e a rugosidade da fibra (SCIDA et al., 2013).

Com relação à absorção de umidade em função do teor de fibras, NAIR et al., (2003) observaram que a absorção de água aumenta com o teor de fibras, conforme ilustrado na Figura 2.11.

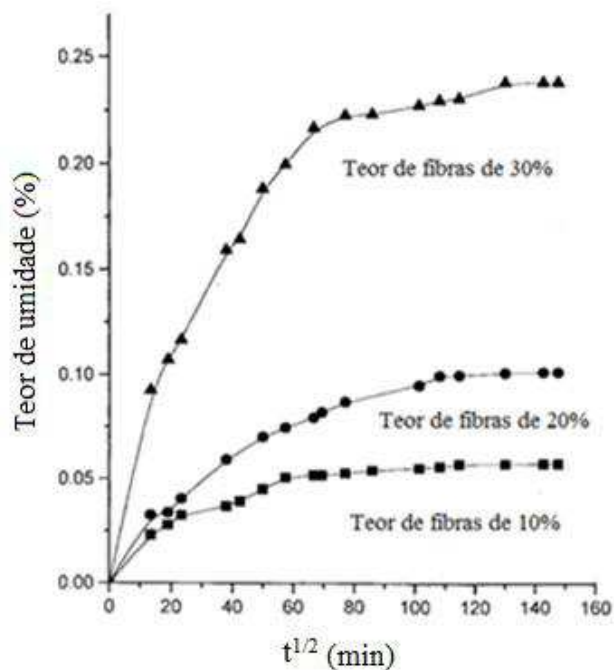


Figura 2.11: Curva de sorção de água de compósitos de poliestireno reforçados com fibras de sisal em função do tempo e do teor de fibra. Fonte: NAIR et al. (2003).

Mishra et al. (2003) estudaram o desempenho de compósitos híbridos de poliéster reforçados com biofibras e fibra de vidro. Os autores verificaram que a adição de pequenas quantidades de fibra de vidro na matriz poliéster elevou as propriedades dos compósitos reforçados com biofibras. Também foi verificado que a modificação da superfície das fibras de sisal elevou ainda mais as propriedades mecânicas dos compósitos híbridos. A absorção de água dos compósitos híbridos foi menor do que a dos compósitos poliéster/sisal.

Moraes et al. (2004) estudaram os efeitos da absorção de água nos compósitos de resina poliéster insaturada ortoftálica pré-acelerada reforçados com tecidos híbridos em trama simples de juta/algodão e sisal/algodão. Neste estudo ficou evidenciado que: a) a secagem prévia dos tecidos e o aumento do teor de fibras tornaram o material mais rígido; b) compósitos manufacturados com tecidos previamente secos e com maiores teor de reforço tiveram maiores módulo de Young e menores alongamentos na ruptura foram mais acentuados em. Estudos desta natureza são importantes para aplicações deste tipo de compósitos a longo prazo e em ambientes úmidos..

Silva (2003) estudou a absorção de água em função do tempo de imersão, para o poliuretano e compósitos com fibras curtas de coco, não tratadas e tratadas em solução de NaOH (10%). Foi observado um aumento no teor de absorção de água dos compósitos, com o aumento da fração volumétrica de fibras. Os compósitos com fibras de coco absorveram mais água do que os compósitos de fibras de sisal. O máximo percentual de absorção foi de 17% para os compósitos com 20% fibras de coco não tratadas e 16% para o compósito com 35% de fibras de sisal não tratadas. O tratamento alcalino reduziu os níveis de absorção de água dos compósitos. A absorção de água é favorecida em compósitos de fibras mais curtas devido ao grande número de extremidades de fibras; a água é absorvida através dos lumens, região do centro da fibra, por efeito de capilaridade. O teor de absorção depende basicamente da fração volumétrica e do tratamento empregado na fibra.

As fibras vegetais são hidrofílicas, devido à presença de grupos-OH em sua superfície. Esta hidrofiliabilidade também influi nas propriedades mecânicas dos compósitos, quando as fibras naturais são usadas como reforço em várias matrizes poliméricas (POTHAN e THOMAS, 2004). A baixa resistência das fibras à absorção de água pode levar a efeitos indesejáveis nas propriedades mecânicas e na estabilidade dimensional dos compósitos (ESPERT et al., 2004).

Espert et al., (2004) verificaram que a absorção de umidade é influenciada pelo teor de fibra, tipo de matriz e principalmente pela temperatura. A difusão de água no compósito é rápida nas primeiras 50 horas de processo, reduzindo sua velocidade em tempos maiores, Figura 2.12. Concluíram ainda que, altas temperaturas de imersão em água aceleram a absorção de umidade, favorecendo o decréscimo na resistência mecânica e no módulo de Young e tendendo a aumentar o alongamento na ruptura dos compósitos, ou seja, as propriedades mecânicas dos sistemas são fortemente afetadas pela sorção de água. A absorção de água contribui para a perda de afinidade entre a matriz e as fibras, o que resulta na descolamento e enfraquecimento da adesão interfacial.

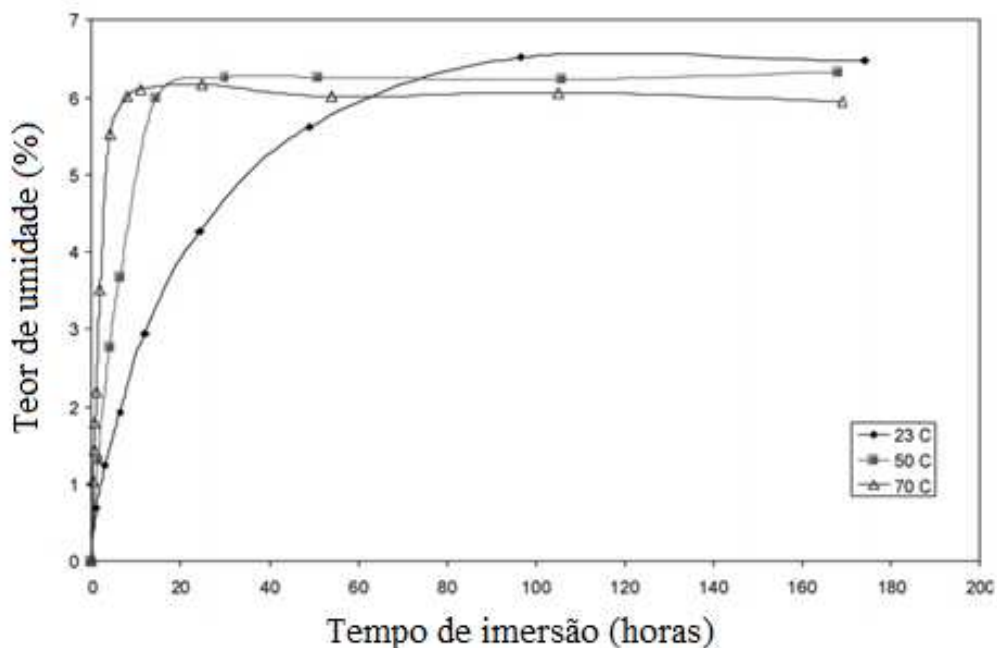


Figura 2.12: Curva de absorção de água para compósitos de polipropileno reforçados com 30% de fibras de sisal em diferentes temperaturas. Fonte: ESPERT et al. (2004)

Ancelotti et al. (2010) avaliaram as propriedades mecânicas de compósitos de matriz termoplástica reciclada reforçados com fibra de cana de açúcar. O compósito foi moldado por injeção nas proporções de 0, 5 e 10% de reforço e caracterizados através de ensaios em tração, resistência ao impacto, ensaio de vibração, análises termogravimétricas (TG) e absorção de água. As análises térmicas das fibras de cana de açúcar, mostraram que a temperatura máxima para aplicação isolada é de 200 °C. Os resultados de ensaios de tração indicaram aumento de acordo com o aumento do teor de reforço. A absorção de água tendeu a crescer, com o aumento percentual de reforço.

Cavalcanti et al., (2010) realizaram estudo numérico e experimental de sorção de água em compósitos poliméricos reforçados com tecidos de juta e juta/vidro. Foram estudados compósitos de poliéster insaturado moldados por compressão e reforçados com: a) 9% juta /11% vidro/80% poliéster insaturado; b) 17% juta/21% vidro/62% poliéster insaturado; c) 22% juta/28% vidro/50% poliéster insaturado; d) 26% juta/32% vidro/42% poliéster insaturado; e) 14% juta/86% poliéster insaturado; f) 26% juta/74% poliéster insaturado; g) 40% juta/60% poliéster insaturado; e h) 50% juta /50% poliéster insaturado. Os resultados da distribuição do teor de umidade dentro destes compósitos e a cinética de absorção de umidade

foram analisados. O conhecimento da distribuição de umidade permite verificar áreas mais favoráveis a problemas de delaminação devido à pobreza da interface fibra-matriz e, por conseguinte redução nas propriedades mecânicas. Concluiu-se que o coeficiente de difusão de água é alto nas primeiras 50 horas de sorção, diminuindo para tempos mais longos de imersão, e também este parâmetro mostrou ser dependente do teor de umidade dos compósitos estudados. O processo de absorção de umidade do compósito reforçado somente por fibra de juta foi mais rápido que o dos compósitos reforçados por tecidos híbridos. Este comportamento foi atribuído ao aumento na relação área/volume do reforço fibroso bem como à maior afinidade da água pela fibra vegetal. Isto indica que a hibridização de fibras vegetais com sintéticas como, por exemplo, fibra de vidro, é uma maneira eficiente para aumentar a resistência à absorção de água de compósitos poliméricos.

2.4 Materiais compósitos híbridos

Um compósito híbrido consiste na combinação de dois ou mais tipos de reforços em uma única matriz. A principal justificativa para a hibridização é a capacidade de combinar mais de um tipo de reforço para satisfazer necessidades específicas das diferentes aplicações. Entre as empresas que utilizam compósitos poliméricos existem duas classes: as que buscam desempenho mecânico em primeiro lugar, como exemplo, indústrias aeronáutica e petrolífera, e as que procuram materiais compósitos com o intuito de unir boas propriedades a um custo reduzido, é o caso das indústrias de construção civil e automotiva. De modo geral, o mercado para compósitos híbridos reforçados com fibras sintética/vegetal ou vegetal/vegetal encontra-se nesta última classe (ANGRIZANI, 2011).

Os materiais compósitos híbridos fibrosos vêm se tornando comuns e são geralmente confeccionados na forma de placas com várias camadas (laminados), com vários tipos de fibras misturadas (intralaminados) ou não (interlaminados). As fibras podem estar misturadas em uma única placa ou separadas em camada por camada. Estes compósitos são projetados para se beneficiar das diferentes propriedades das fibras empregadas. Alguns materiais compósitos híbridos são reforçados com uma mistura de materiais fibrosos e particulados (MATTHEWS, 1994).

Estudos em compósitos poliméricos híbridos têm sido desenvolvidos envolvendo variados tipos de reforços sob diversos tipos de envelhecimento e muitas vezes incluindo

condições ambientais adversas (AQUINO et al., 2007; MOE et al., 2001). Alguns trabalhos de investigação apresentam um estudo comparativo de resistência, rigidez e mecanismo de dano de dois compósitos híbridos de matriz poliéster ortoftálica reforçada com fibras naturais (tais como, por exemplo, juta e curauá) e fibras de vidro (AQUINO e OLIVEIRA, 2004). Essa investigação experimental incluiu testes de tração uniaxial e de flexão em três pontos para determinação das constantes elásticas e análise de mecanismo de dano envolvido. Os compósitos híbridos são de fabricação industrial e foram desenvolvidos na forma de laminados tipo sanduíche, projetados para atender várias aplicações estruturais. Os resultados obtidos evidenciam nos compósitos híbridos a influência da absorção de umidade causando diminuição nas propriedades mecânicas nos ensaios de resistência à tração e flexão.

2.4.1 Materiais compósitos híbridos constituídos por fibras vegetais

Os materiais compósitos baseados em reforços compostos por dois ou mais tipos de fibras, denominados compósitos híbridos, podem apresentar uma grande diversidade de propriedades e, de modo geral, ainda permanecem em um estágio preliminar de desenvolvimento (MISHRA et al., 2003). Apresentam na sua estrutura, combinações de vários tipos de reforços, como fibras e partículas no mesmo material ou ainda como mais de um tipo de fibra ou de partículas no mesmo material (OLIVEIRA, 2005). Pesquisas revelam que o comportamento dos compósitos híbridos aparenta ser a simples média ponderada das propriedades dos componentes individuais, podendo, porém apresentar um balanço mais favorável entre as vantagens e desvantagens inerentes a todos os materiais compósitos.

Os materiais compósitos híbridos podem ser confeccionados pela combinação de duas fibras vegetais (às vezes denominadas de biofibras) ou fibras sintéticas e vegetais em uma matriz. São geralmente constituídos de várias camadas (estrutura do tipo de laminado), com vários tipos de fibras misturados ou não. As fibras podem estar misturadas em uma única camada, no caso de tecido híbrido (usando diferentes tipos de fibras), ou camada por camada (tecidos com um único tipo de fibras a cada camada), (AQUINO et al., 2007). Estes compósitos são projetados para beneficiar as diferentes propriedades das fibras empregadas (MATTEWS e RAWLINGS, 1994).

As propriedades dos compósitos híbridos são controladas por fatores como a natureza da matriz, o comprimento e a composição relativa dos reforços, a orientação, a interface fibra-

matriz, o grau de entrelaçamento entre fibras, o design da hibridização, entre outros. Foi avaliado experimentalmente o potencial de reforço com fibras vegetais (abacaxi e sisal) formando compósitos híbridos em matriz poliéster, onde se mostrou que a superfície das fibras de sisal passando por diferentes tratamentos químicos melhorou as propriedades mecânicas dos compósitos híbridos, como também houve uma menor absorção de umidade (MISHRA et al., 2003).

2.5 Degradação de polímeros e compósitos poliméricos

2.5.1 Degradação de polímeros

O termo degradação pode ser definido como qualquer reação química destrutiva dos polímeros, que pode ser ocasionado pelos agentes físicos e/ ou químicos. A degradação causa uma modificação irreversível nas propriedades dos materiais poliméricos, sendo evidenciada pela deteriorização progressiva destas propriedades incluindo o aspecto visual do polímero (FANN et al., 1996; ROMÃO et al., 2009). A consequência do reprocessamento do polímero é a aceleração cada vez maior da degradação, devido à degradação térmica que gera aumento da concentração de grupos químicos e radicais livres capazes de acelerar as reações de decomposição das cadeias do polímero, levando à perda das propriedades mecânicas (NAIT-ALI et al., 2011).

Existe uma necessidade de se avaliar a extensão e a origem da degradação durante o processamento que resultam na deterioração das propriedades físicas do produto acabado. Os polímeros termoplásticos, quando processados, são submetidos a temperaturas elevadas e a altas tensões de cisalhamento que, por sua vez, levam à sua degradação térmica, mecânica e termo-oxidativa (PACI e LA MANTIA, 1999).

Segundo BADÍA et al. (2009), os polímeros estão sujeitos à influência de agentes de degradação, tais como, oxigênio, luz, tensão mecânica, temperatura e água, os quais, isoladamente ou em conjunto durante o seu ciclo de vida, geram modificações químicas e físicas que alteram a estabilidade e as propriedades de longo prazo. A degradação polimérica pode ocorrer durante o processamento, armazenamento ou uso do produto (VIVAS, 2013).

Dentre as degradações classificadas como sendo baseadas no tipo de reação química, pode-se citar:

- Reticulação: Formação de ligações cruzadas, com origem em duas cadeias que se unem por meio de uma ligação covalente. Estas duas cadeias podem ser: polímero – polímero ou polímero – fluido, como é o caso da segunda reticulação da resina epóxi, quando a mesma está em um ambiente higrotérmico (ZHOU e LUCAS, 1999). Como resultado desta reticulação pode-se ter aumento da massa molecular do polímero e da resistência à tração, bem como a diminuição da solubilidade e do alongamento na ruptura do polímero (VIVAS, 2013).

- Despolimerização: Este processo de degradação gera como produto principal o monômero que deu origem ao polímero específico que está se degradando. Poucos são os polímeros que permitem a regeneração do monômero desta forma. Neste processo há a formação de produtos de baixa massa molar que se difundem para o ambiente e se volatilizam (DE PAOLI, 2009).

- Cisão: O rompimento de uma ligação química ocorrerá quando a energia localizada nesta determinada ligação for superior à energia da ligação (PAOLI, 2009). O rompimento da ligação resulta em uma redução da massa molar do polímero, o que dá origem à variação nas propriedades mecânicas. O processo de cisão de cadeias resulta em sólidos mais dúcteis e, em geral, menos resistentes e em líquidos com um índice de fluidez maior (VIVAS, 2013).

- Oxidação: A oxidação é causada pela presença de oxigênio na atmosfera, geralmente em combinação com altas temperaturas. O processo de oxidação começa com a criação de um radical livre na cadeia principal do polímero. Posteriormente, este radical livre reage com o oxigênio para formar os radicais oxigenados, que por sua vez, atacam a cadeia principal do polímero para formar um hidroperóxido. Enquanto a cadeia é atacada, um novo radical passa pelo mesmo processo. O processo de oxidação é acelerado pela presença de íons metálicos e é interrompido pela recombinação de vários grupos radicais com produtos inativos. Este fenômeno é fortemente dependente da estrutura do polímero: ocorre em polímeros com ligações insaturadas na cadeia principal, extensas ramificações ou baixa cristalinidade. Esta reação gera produtos carbonilados, que têm coloração amarelada, e são os responsáveis pela alteração da cor do produto (VIVAS, 2013).

As degradações originadas podem ser classificadas como:

- **Térmica:** A degradação térmica de polímeros é o resultado da deterioração por superaquecimento, que pode ocorrer durante o processamento ou por uso em temperaturas elevadas. Em altas temperaturas as ligações da cadeia polimérica principal começam a se romper (cisão molecular) e reagem com outras cadeias, o que gera modificação nas propriedades do polímero. Inicialmente as propriedades específicas alteradas são as propriedades físicas e ópticas. No entanto, este tipo de degradação também pode resultar na modificação da ductilidade tornando o polímero mais frágil, na mudança de cor e formação de trincas no material. Além disso, pode resultar na mudança da massa molar e na distribuição de massa molar (SHAH et al., 2008).

A temperatura de degradação térmica dependerá da energia das ligações químicas que constituem os polímeros. Esta energia de ligação é influenciada pelos substituintes ao longo da cadeia, pelo número de ramificações da cadeia polimérica e pela presença ou não de comônômeros (DE PAOLI, 2009).

Sob termo-oxidação, alguns sistemas poliméricos podem apresentar um crescimento e outros uma diminuição do módulo de elasticidade com o tempo de exposição. O aumento do módulo elástico é possível em sistemas termofixos não-totalmente curados ou que permitam reações subsequentes entre frações degradadas que causam rearranjo de segmentos moleculares. O módulo de elasticidade sofre relativamente pouca variação sob exposição prolongada, já que se trata de uma propriedade medida sob baixa amplitude de deformação (NAVARRO, 2009).

- **Mecânica:** A degradação mecânica ocorre pela aplicação de uma força física, podendo envolver fratura do material e quebra de cadeias poliméricas, ou aumento na distância interatômica (VIVAS, 2013).

- **Termomecânica:** A degradação termomecânica é a combinação da degradação térmica com a degradação mecânica. Este tipo é muito comum durante o processamento. Tal como na degradação térmica, ocorrerá à cisão de cadeia, porém de forma muito mais intensa, devido ao esforço cisalhante nas cadeias poliméricas (CANEVAROLO, 2006).

- **Química:** A degradação química ocorre devido a agentes químicos corrosivos ou a certos gases que podem atacar o polímero, causando ruptura de cadeia e oxidação. Esta degradação é classificada de duas maneiras: agentes externos de ataque químico (por exemplo, ataque químico por óleos lubrificantes ou contato de polímeros com óxidos

metálicos) e agentes químicos internos ao polímero (por exemplo, resíduos de catalisador ou aditivos) (DE PAOLI, 2009).

- **Fotodegradação:** A fotodegradação é a capacidade do polímero em absorver a parte nociva da radiação solar troposférica. Isto inclui a radiação terrestre UV-B (~ 295-315 nm) e radiação UV-A (~ 315-400 nm) responsáveis pela fotodegradação direta (fotólise). A parte visível de luz solar (400-760nm) acelera a degradação polimérica por aquecimento. Já a radiação infravermelha (760-2500 nm) acelera a oxidação térmica. Os principais fatores que determinam a fotodegradação são a absorção de luz do polímero e a interação da luz absorvida com a cadeia polimérica quanto à energia de suas ligações químicas (VIVAS, 2013).

- **Biológica:** Também denominada por biodegradação, é o resultado do ataque enzimático ao polímero realizado por micro-organismos, como bactérias e fungos, com objetivo de romper ligações de substâncias orgânicas. A biodegradação ocorre preferencialmente na superfície. Esta pode ser aeróbica (produz dióxido de carbono e água) ou anaeróbica (produz dióxido de carbono, água e metano). A biodegradação é governada por diferentes fatores, estes incluem, características do polímero, tipo de organismo, e natureza do pré-tratamento. As características dos polímeros, tais como, a sua mobilidade, cristalinidade, peso molecular, e tipo de grupos funcionais e substituintes presentes na sua estrutura, plastificantes ou aditivos adicionados ao polímero, desempenham um papel importante na sua degradação (SHAH et al., 2008).

- **Hidrolítica:** A degradação hidrolítica ocorre em polímeros que contém grupos funcionais sensíveis à presença de água ou alta umidade.

- **Stress Cracking:** O fenômeno de stress cracking tem sido reportado na literatura como responsável pela maioria dos casos de falha prematura em produtos plásticos, ocorrendo desde fissuras superficiais à fratura frágil do produto, mesmo em polímeros considerados dúcteis. Este fenômeno consiste em uma falha de natureza frágil iniciada na superfície de um polímero sujeito a tensões poliaxiais e em contato com um meio (fluido agressivo), e que estando ausente este meio, a falha não ocorreria sob as mesmas condições de tensão (TEÓFILO et al., 2014). No stress cracking, o efeito do fluido não é causar um ataque químico ao polímero. O fluido é preferencialmente adsorvido pelo polímero sob alta tensão, tais como: sítios com tensão residual resultante do processamento, fissuras ou extremidade de uma fratura. Após ser adsorvido, este fluido diminui as interações entre as cadeias poliméricas

causando um efeito localizado de plastificação ou de desentrelaçamento das cadeias. Nesta microrregião plastificada ocorre uma concentração da tensão, provocando uma propagação da fissura. A propagação, com o aumento da fissura, favorece a adsorção de mais fluido nesta região e o efeito é lento e gradualmente intensificado até se originar uma fratura ou falha (DE PAOLI, 2009).

2.5.2 Degradação de materiais compósitos poliméricos

O envelhecimento químico ou ambiental é resultado de diferentes agentes como umidade relativa, condições de carregamento, radiação ultravioleta, entre outras, que leva a alterações irreversíveis na estrutura molecular do material.

As matrizes poliméricas possuem comportamento viscoelástico influenciado pelas condições ambientais (umidade, temperatura e radiação ultravioleta). A ação conjunta de todos esses fatores no comportamento e durabilidade dos compósitos é um fenômeno bastante complexo que ocorre a nível molecular. O estudo desse fenômeno e a modelagem do comportamento dele resultante são tarefas cruciais para determinação da vida útil e segurança das estruturas feitas em material compósito (OLIVEIRA, 2004).

Com o crescente desenvolvimento de produtos estruturais utilizando compósitos como matéria-prima, em alguns casos em situações adversas, como intempéries ou ambientes agressivos, em períodos de até 50 anos, torna-se necessário o estudo de fatores que atuam no decréscimo das propriedades mecânicas da estrutura projetada (MARTIN, 2008). A fim de avaliar a degradação de compósitos em condições de serviço, o mesmo é submetido a ensaios de envelhecimento acelerado ou natural. O envelhecimento pode dar origem a degradações físicas e/ou químicas.

Nos ensaios de envelhecimento natural, o compósito é exposto às condições ambientais próximas da real condição de uso do material. Geralmente, utiliza-se expor os corpos-de-prova em bancadas com inclinação voltada para o norte magnético (RODRIGUES, 2007). A grande vantagem deste ensaio é justamente a proximidade com a real condição de uso do material. Entretanto, o ensaio é lento e exige longo tempo de exposição para que os fatores da degradação possam agir no material (RODRIGUES, 2007).

Os ensaios de envelhecimento acelerado possuem a vantagem da rapidez, fornecendo dados sobre o provável desempenho do material ao longo da sua vida útil. Nestes ensaios, são simuladas as condições de exposição do material, porém com intensidades elevadas, de modo a acelerar o processo de degradação (RODRIGUES, 2007).

A degradação de compósitos pode ser medida pela análise dinâmico mecânica, na qual é possível observar mudanças em relação às curvas de amortecimento de vibração no compósito (BOTELHO et al., 2005), ou testes de cisalhamento, porque a falha em cisalhamento é dominada pelas propriedades da matriz (BOTELHO et al., 2005).

2.6 Envelhecimento

2.6.1 Características gerais

O envelhecimento de um material é um processo causado pela interação com o meio que está ao seu redor, pois essa interação pode causar alterações microscópicas na estrutura do material. Geralmente é associado à degradação das propriedades desse material, embora haja casos em que o envelhecimento seja usado como tratamento para melhorar alguma propriedade. Em materiais formados com aços, por exemplo, o envelhecimento é utilizado para diminuir tensões residuais decorrentes de processos de fabricação ou de tratamentos térmicos a que o material tenha sido submetido. Nesse caso, o processo também é conhecido como recozimento térmico, e consiste em levar o material a uma temperatura alta, porém ainda muito abaixo da temperatura de fusão, e manter nessa condição por um longo período. Esse procedimento permite que haja maior mobilidade dos átomos e, conseqüentemente, ocorrer uma reorganização cristalina de maneira acelerada (CALLISTER Jr, 2008) resultando em propriedades melhores. Em geral, o resultado do envelhecimento em compósitos poliméricos é o empobrecimento das propriedades dos sistemas.

Fatores como temperatura, presença de certas substâncias (água, óleos e solventes) e radiação estão diretamente ligados ao processo de envelhecimento.

O processo de envelhecimento altera características ao nível molecular do material, como a composição ou sua estrutura molecular, e isso tem como consequência mudanças nas propriedades físicas do material, sejam elas mecânicas, elétricas, térmicas ou químicas.

Portanto, estudar o envelhecimento se faz necessário para que se possa prever eventuais alterações nas propriedades dos materiais e, com isso, conseguir estimar o tempo de vida de equipamentos sujeitos a envelhecimento, ou até mesmo prevenir que o envelhecimento ocorra.

Alterações irreversíveis das propriedades dos compósitos de matriz polimérica podem ser geradas por uma grande variedade de fatores, atuando de maneira isolada ou combinada. A combinação de dois ou mais agentes de degradação em geral funciona como acelerador da degradação (umidade e temperatura). Nesse caso, altas temperaturas aumentam a taxa de absorção de água e o material se degrada de maneira mais intensa que se estivesse exposto aos mesmos agentes separadamente.

A complexidade dos mecanismos de degradação e a forma irregular de alteração das propriedades dos compósitos submetidos à degradação hidrotérmica revelam que nesse tipo de degradação mecanismos outros que não apenas a simples difusão, podem ocorrer dentro do material (NAVARRO, 2009). Exemplos desses mecanismos são:

- Hidrólise das cadeias macromoleculares que conduz à formação e migração das cadeias de baixa massa molar;
- Hidrofilização que tende a aumentar o consumo de água no equilíbrio mediante o desenvolvimento de inchamento local ou global e plastificação da matriz;
- Deslocamento interfacial que induz a deterioração mecânica do compósito.

2.6.2 Tipos de envelhecimento

Há dois meios de ação para um processador envelhecedor. O primeiro age quimicamente sobre o material afetando a estrutura molecular e é chamado de envelhecimento químico. O segundo não afeta a estrutura das moléculas no material apesar de agir também ao nível molecular, esse é chamado envelhecimento físico.

2.6.2.1 Envelhecimento químico

São eles:

- Oxidação – Modernamente, o termo oxidação significa perder elétrons, ou ainda aumento da reatividade, não necessariamente em presença de oxigênio. No entanto, a oxidação por meio da reação do material com o ar, que possui grande quantidade de oxigênio, é a mais comum. Em geral ocorre devido a algum centro reativo previamente existente na molécula, porém, a reação pode ocorrer mesmo sem a presença desse ponto reativo, dependendo de outras condições como temperatura e composição do material. Normalmente em polímeros, o ponto reativo surge da quebra da ligação de um átomo da cadeia principal com outro radical, devido à temperatura. O processo de oxidação tem a característica importante de ser auto catalítico.

- Degradação hidrolítica – Entre os processos de degradação que atacam à superfície dos materiais compósitos, a absorção de água é o que resulta em maiores anomalias. A absorção de umidade altera as propriedades mecânicas, pode gerar a formação de manchas originadas da proliferação de fungos e bactérias no material bem como o escoamento de sais solúveis que aceleram a degradação do compósito (MENEZES et al.,2015).

A degradação de compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro expostos à umidade é lenta já que a fibra de vidro não é pouco higroscópica. A absorção de umidade age como plastificante e como agente promotor de hidrólise decrescendo a integridade mecânica da matriz a um grau que é dependente da temperatura a qual o material está exposto. Em se tratando de compósitos, a polaridade da matriz tem grande influência na absorção de água. Quanto maior a polaridade da matriz maior será a sua capacidade de absorção de água. As matrizes epóxi, por exemplo, que curam por meio de grupos hidroxilas ou amínicos, possuem em sua estrutura tridimensional poucos grupos fortemente polares (OH) que podem facilmente se ligar à moléculas de água por meio de ligações de hidrogênio. Por esse motivo, resinas epóxi são relativamente resistentes à umidade (CUNHA et al., 2006).

De acordo com Cunha et al. (2006), diferentes configurações geométricas espaciais podem resultar em uma estrutura mais aberta, o que favorece a absorção de umidade pela cadeia polimérica, pois a água pode se alojar nos interstícios da estrutura da molécula. Conseqüentemente, polímeros com um arranjo cristalino bem empacotado são mais resistentes

à umidade que aqueles com menor grau de empacotamento. Com base neste conceito, alguns pesquisadores estão tentando correlacionar a absorção de umidade dos materiais com o volume livre existente dentro das moléculas dos polímeros. Por meio da absorção de água, ocorre um inchamento da matriz provocando então um aumento das tensões internas, o que contribui para o aumento das tensões de cisalhamento interlaminares (FELIPE, 2012). De acordo com Botelho et al. (2005) a absorção de água em um compósito polimérico, entre outros fatores, depende da orientação do reforço.

Existem fenômenos reversíveis e irreversíveis de degradação hidrolítica. A plastificação é um fenômeno reversível, o qual desaparece após secagem, podendo resultar no decréscimo das propriedades termomecânicas do compósito (por exemplo, Tg), indução da deformação plástica (Ray, 2006), decréscimo do módulo elástico (RAY e RATHORE, 2014) e resistência ao cisalhamento (Botelho et al., 2006). A plastificação está relacionada ao aumento no volume livre do polímero e à destruição de pontes de hidrogênio intra-moleculares (SURATHI e KARBHARI, 2006).

Por outro lado, também pode ocorrer a degradação química que é irreversível (dissolução, hidrólise, micro-trincas ou mudança na massa molecular (Botelho et al., 2006) (Apicella et al., 1983), e quanto maior a quantidade de água absorvida maior será a probabilidade de hidrólise (a qual resulta no aumento da quantidade de ligações na interface fibra/matriz (Ray e Rathore, 2014) ou tensões de molhamento. A hidrólise consiste na reação de uma molécula de água com um determinado grupo químico, com quebra da ligação e adição de oxigênio e de hidroxila a cada um dos grupos remanescentes, sendo esta acelerada em meio ácido ou básico (DE PAOLI, 2009).

As micro-trincas resultam em uma maior migração de umidade para dentro do compósito, o que reduz o brilho. Outro ponto bastante relevante, esta relacionado à penetração de água no compósito fazendo com que ocorra a separação do reforço e da resina, ficando as fibras com aspecto esbranquiçado (FELIPE, 2012).

Outro efeito irreversível é a criação de uma segunda rede de reticulação na resina devido a um tipo específico de ligação de hidrogênio que se forme entre a resina e a molécula de água (MOUZAKIS et al., 2008). Esta depende da estrutura química da resina, da temperatura e do período total de exposição do material na água.

A quantidade de umidade absorvida pela matriz é diferente da absorvida pelo reforço, sendo a difusão da umidade um fenômeno dominado pela matriz. Isto resulta em uma incompatibilidade significativa na expansão volumétrica induzida pela absorção de umidade entre a matriz e as fibras, promovendo campos de deformação e tensões localizadas em compósitos fibrosos, o que reduz seu desempenho mecânico (RAY, 2006). A falha em muitos casos ocorre na região interfacial devido às reações químicas e/ou plastificação quando impurezas (geralmente água) penetram na interface (APICELLA et al., 1983).

- Degradação térmica – Em temperaturas amenas, o polímero reage lentamente com o oxigênio, de modo que a oxidação somente torna-se aparente após um longo período. Porém, quando materiais compósitos poliméricos são aquecidos em temperaturas acima da faixa da temperatura de transição vítrea ou temperatura de fusão, efeitos termomecânicos devido ao amolecimento e/ou decomposição do polímero podem ocorrer. A degradação é mais crítica quando o material é aquecido em um ambiente oxidante que no vácuo ou em atmosfera inerte.

Para que ocorra a degradação térmica é necessário que seja fornecido ao polímero, uma energia igual ou superior a energia das ligações químicas que o constituem. As interações inter e intramoleculares irão afetar severamente a temperatura de início de decomposição térmica do polímero. Se o polímero tiver uma alta condutividade térmica será favorecido o efeito da degradação térmica, caso contrário será favorecido o efeito da degradação superficial (DE PAOLI, 2009).

A degradação está associada à perda de massa de diferentes superfícies em diferentes taxas. Além disso, após esta exposição térmica, podem ocorrer microtrincas na matriz causadas por tensões térmicas (WOLFRUM et al., 2009). Tensões térmicas geram tensões mecânicas na superfície e no interior da matriz (AWAJA et al., 2009).

A oxidação da superfície em alta temperatura resulta em um aumento da densidade da superfície, como um resultado da saída dos voláteis e encolhimento, que irá favorecer a geração de trincas (AWAJA et al., 2009). Pode também haver leve redução em resistência e módulo em tração do compósito, mas existe um efeito mais drástico nas propriedades mecânicas dominadas pela matriz do compósito, tal como compressão, cisalhamento interlaminar e flexão (PAILLOUS e PAILLER, 1994).

2.6.2.2 Envelhecimento físico

O processo do envelhecimento físico ocorre quando um polímero é resfriado rapidamente, ou seja, saindo do seu estágio mais favorável de energia para temperaturas inferiores à sua Tg, impedindo que o material não alcance o equilíbrio termodinâmico instantaneamente. A característica principal deste acontecimento é devido à mudança no volume livre, entalpia e entropia do polímero que evoluem ao longo do tempo para valores de equilíbrio hipotéticos, que resultarão em mudanças significativas nas propriedades mecânicas (BRINSON e GATES, 1995). Quando o polímero é resfriado abaixo da Tg, o volume está inicialmente em um estado de não equilíbrio e evolui lentamente em direção ao equilíbrio do volume com o tempo.

O envelhecimento físico atinge todas as propriedades que dependem da temperatura e que usam abruptamente e drasticamente na Tg. Geralmente, durante o envelhecimento físico, o material torna-se mais rígido visto que, em um determinado período, a flexibilidade é reduzida em relação a um material viscoelástico sem envelhecimento. Este fenômeno que pode ser justificado pela teoria do volume livre, a qual indica que a mobilidade dos segmentos de cadeia é dificultada conforme o volume livre diminui em direção ao estado de equilíbrio, , originando um material mais rígido (BRINSON e GATES, 1995).

O polímero que sofreu o envelhecimento físico tem sua capacidade de amortecimento mecânico bem como suas taxas de relaxação da tensão e fluência reduzidas. A relaxação de tensão da estrutura é consequência do estado de não equilíbrio do estado vítreo, e a velocidade de ocorrência deste processo depende da temperatura, da pressão e da história do material vítreo (RIEGEL et al., 1999).

O envelhecimento físico é termo-reversível para todos os polímeros amorfos pelo aquecimento do polímero acima da sua Tg. Neste caso, o principal efeito da degradação é relatado pela mudança na temperatura de transição vítrea da matriz. Conforme a umidade é absorvida, a Tg decresce, portanto as resistências em elevadas temperaturas decrescem com o aumento da umidade (MIRACLE e DONALDSON, 2001).

2.6.2.3. Aspectos Gerais sobre Envelhecimento Higrotérmico

As propriedades mecânicas de compósitos poliméricos podem mudar de acordo com variações nas condições ambientais às quais se encontram expostos durante sua utilização. Temperatura e a umidade sofrem variações devido a mudanças ambientais em que os materiais estão frequentemente sujeitos quando em serviço.

O envelhecimento higrotérmico é o processo de deterioração da integridade química e física de materiais compósitos, provocando principalmente queda no desempenho mecânico pelo efeito combinado da ação de calor e umidade (MOE THWEA e KIN LIAU, 2003).

O desempenho de compósitos poliméricos após a exposição à altas temperaturas e ambientes com elevada umidade é de interesse para que se possa utilizar todo o potencial destes materiais. Dessa forma, tem-se procurado entender o efeito do envelhecimento higrotérmico no desempenho térmico e mecânico de compósitos poliméricos. Ao penetrar no sistema, a água pode provocar falha de ligações secundárias que asseguram a integridade da interface fibra/matriz sobre a qual, muitas propriedades do compósito dependem.

Para entender os efeitos negativos da água nas propriedades mecânicas do compósito, é necessário estudar seu efeito nos constituintes nele, como: matriz, fibra e a região da interface fibra/matriz (MOE e LIAO, 2003).

É possível encontrar na literatura os fundamentos teóricos envolvidos no processo de envelhecimento higrotérmico em compósitos poliméricos (RUSSEL, 2001).

Sabe-se que a água penetra tanto na matriz polimérica como na região interface fibra-matriz por uma variedade de rotas, onde as mais comuns são por difusão através da matriz, por penetração através dos defeitos superficiais nos compósitos e por condução ao longo, de fibras expostas na superfícies do compósito. Além disso, tem-se que as mudanças que ocorrem nas propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos devido ao envelhecimento higrotérmico podem ser reversíveis, irreversíveis, ou mesmo uma combinação dos dois, dependendo do tempo de exposição e da temperatura.

O modo no qual um material absorve água depende de muitos parâmetros, tais como: taxa de absorção de água, temperatura, teor de fibra, natureza da fibra, porosidade, geometria do reforço e tipo de matriz. Além disso, a água pode penetrar dentro do reforço no caso de fibras vegetais. Isto também é particularmente possível para o compósito reforçado com fios de fibras torcidos. O transporte da água pode ser facilitado pela difusão dentro da resina, pela

presença de defeitos dentro da matriz, formado durante o processo de moldagem (microvazios, poros ou trincas) ou pela capilaridade ao longo da interface na presença de alguns defeitos entre as fibras e a resina (SCIDA et al., 2013).

CAPITULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Nesta pesquisa foram utilizados os seguintes materiais:

- Tecido híbrido unidirecional de fibra juta/algodão adquirido da Indústria Têxtil Castanhal (gramatura de 350g/m², sendo 85% de juta na trama e 15% de algodão no urdume), conforme Figura 3.1.
- Resina poliéster insaturada ortoftálica pré-acelerada: Fornecida pela empresa Elekeiroz localizada em São Paulo, sob o código UCEFLEX UC 5518;
- Catalisador: Peróxido de metil etil cetona – PMEK (1,5% em relação à resina);
- Desmoldante: Chemlease 2185 adquirido no comercial Fiberglass;

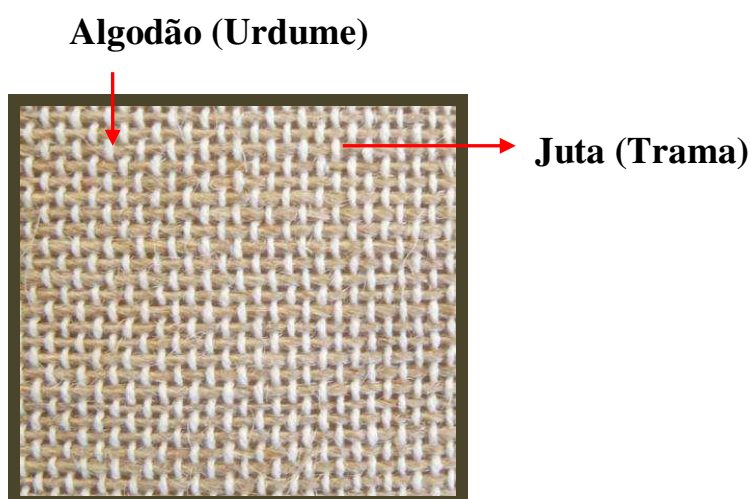


Figura 3.1: Tecido tramado com fibras de juta e algodão.

3.2 Métodos

3.2.1. Equipamento RTM

O processo utilizado para fabricação do compósito foi moldagem por transferência de resina (RTM). A instrumentação e o ferramental utilizados na moldagem estão descritos na Figura 3.2. Além dos aparatos apresentados na Figura 3.2, antes do filtro existe um compressor que libera ar comprimido com o intuito de forçar a impregnação da resina, que está dentro do vaso de pressão, no reforço fibroso.



Figura 3.2: Aparatos do sistema RTM: controlador e regulador de pressão (a), molde (b), vaso de pressão (c) e filtro regulador de pressão de ar (d).

A Figura 3.2 apresenta uma ilustração das cavidades do molde. A cavidade superior é vidro temperado de 10 mm de espessura e a cavidade inferior é fabricada em um material metálico. Conforme a Figura 3.3, a resina é injetada no centro da placa inferior do molde e extraída em quatro saídas posicionadas nas extremidades do molde.

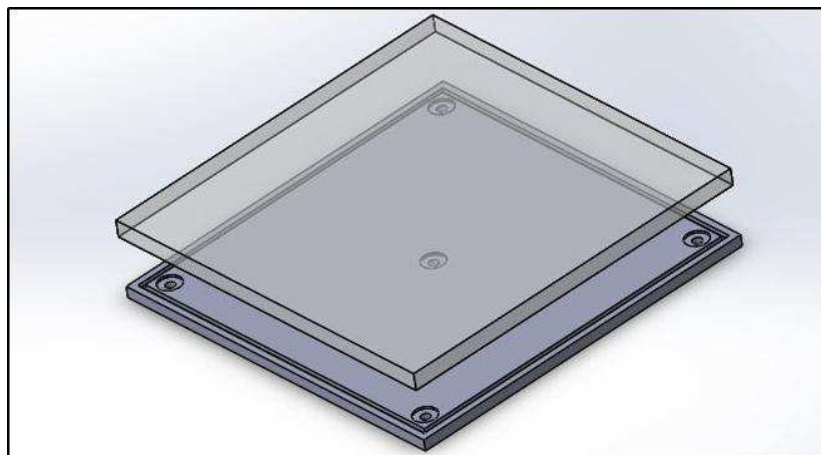


Figura 3.3: Molde RTM com orifício central (entrada) e quatro furos passantes (saídas). Fonte: ANGRIZANI (2017).

3.2.2 Confeção dos compósitos

Para a confecção dos compósitos os tecidos foram cortados nas dimensões de 30 × 30 cm. Os compósitos foram confeccionados com quatro e seis camadas de tecido, que, após a impregnação da resina geraram compósitos com 32 e 48% de fração volumétrica de fibras, e espessuras aproximadas de 3,3 mm e 4,8 mm, respectivamente.

Os tecidos foram secos em uma estufa com circulação de ar durante 30 minutos a 90°C antes de serem inseridos no interior do molde o qual foi fechado com um torque de 10N/m. Enquanto as fibras secavam, era preparada a mistura da resina com o endurecedor. Primeiramente a resina poliéster foi colocada num recipiente e degaseificada, posteriormente foi adicionado o catalisador e o sistema misturado com auxílio de um agitador mecânico (60 rpm/min por 3 min).

A resina assim preparada foi injetada, através de um orifício central, para dentro do molde (Figura 3.4) fechado contendo o reforço. A pressão de injeção variou de 0,1 a 0,8 bar, e o tempo necessário para o completo preenchimento do molde, nessas condições, foi de aproximadamente 9 minutos com um tempo de pós cura da resina de 3h a 60°C. Como pode ser observado na Figura 3.5, o escoamento da resina poliéster ocorre no sentido radial às fibras no tecido.

Após o preenchimento do molde pela resina, deixou-se o compósito curando no interior do molde durante 24 h à temperatura ambiente. Decorrido esse tempo, o mesmo foi levado à uma estufa com circulação de ar a 60 °C/3 h para realizar a pós-cura.



Figura 3.4: Camadas de tecidos juta/algodão inseridos no molde RTM com orifício central. Fonte: Autoria própria.

↔ **Fibras Alinhadas em 0° (na direção da juta)**

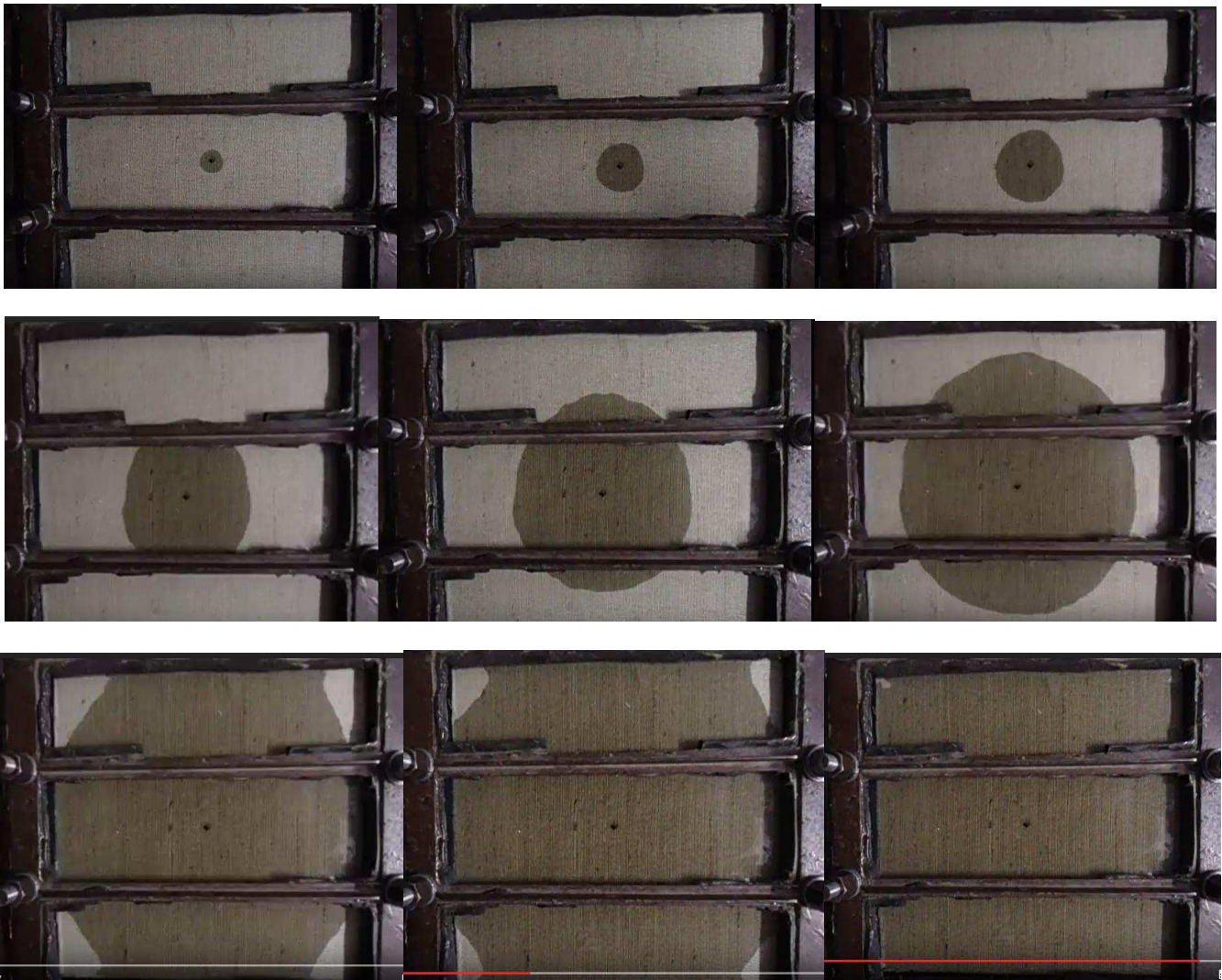


Figura 3.5: Imagens da infiltração radial da resina poliéster no tecido juta/algodão unidirecional durante a moldagem por RTM. Fonte: Autoria própria.

Corpos de prova dos compósitos, conforme citado na Tabela 3.1, foram cortados (na orientação de 0° em relação à fibra de juta) em equipamento de corte a laser da marca Automatisa modelo Mira 3007 e selados com resina poliéster, a fim de evitar, entrada de água por capilaridade. Os desenhos para o corte a laser foram elaborados no software AutoCAD® versão 2015, e exportados como arquivos de extensão dxf (Drawing Exchange Format e elaborados conforme as dimensões e formatos para os corpos de prova estabelecidos nas normas dos ensaios).

Tabela 3.1: Recomendações para a geometria dos corpos-de-prova segundo as Normas da ASTM

Ensaio mecânico	Dimensionamento (Norma ASTM)	Corpos de Prova	Temperaturas (Estudo de Sorção)
Tração	25 x 250mm ASTM D3039	5 Amostras	25 ⁰ C, 50 ⁰ C e 75 ⁰ C para (0,48, 96, 168, 288, 504 horas)
Flexão	127 x 12,7 mm ASTM D790	5 Amostras	25 ⁰ C, 50 ⁰ C e 75 ⁰ C para (0,48, 96, 168, 288, 504 horas)
Impacto	63,5 x 12,7 mm ASTM D256	5 Amostras	25 ⁰ C, 50 ⁰ C e 75 ⁰ C para (0,48, 96, 168, 288, 504 horas)

3.2.3 Sorção de água

O procedimento do ensaio higrotérmico (ASTM D570) envolve imergir amostras dos compósitos em água destilada. O equipamento da Figura 3.6, conhecido como banho-maria com circulação de água, marca Nova técnica, foi utilizado nos ensaios com a temperatura de 75°C e outro equipamento conhecido como placa aquecedora com temperatura controlada (Figura 3.7), foi utilizado nos ensaios com a temperatura de 50°C.



Figura 3.6: Equipamento conhecido como banho Maria utilizado para ensaio higrotérmico. Fonte: Autoria própria.

Para isso, corpos de prova medindo 20,0 x 20,0 mm foram confeccionados na máquina à laser a partir das placas moldadas pelo processo RTM e preparados para o ensaio de sorção, onde as arestas das amostras foram seladas, isto é, recobertas pela resina poliéster para evitar o contato direto da água com as fibras e, portanto, sorção por capilaridade.

Todos os experimentos de sorção de água higrotérmico foram realizados no Laboratório Experimental de Térmica e Fluidos da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica da UFCG em equipamento de banho maria com temperatura controlada obedecendo ao seguinte procedimento: Foram preparados três banhos, com as respectivas temperaturas de 25°C, 50°C e 75°C. Antes de serem imersas no banho, as amostras foram secas em estufa a 100 °C, até obter massa constante. Logo em seguida as amostras foram pesadas e colocadas na água e, retiradas em intervalos pré-determinados, secas com papel absorvente, pesadas em balança analítica e, em seguida, novamente imersas na água para serem pesadas em diferentes tempos. Este procedimento foi repetido até o tempo de 504 horas ser alcançado.

O teor de água absorvido (em base seca) conforme a equação (3.1) foi calculado comparando o peso inicial e após a exposição à água. Nesta equação, P_u é a massa do material úmido e P_s é a massa do material seco.

$$M(\%) = \left(\frac{P_u - P_s}{P_s} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

Para cada temperatura, foram analisadas cinco (5) amostras com o objetivo de medir o ganho de massa devido à umidade em função do tempo. Valores médios relativos a cinco amostras foram reportados.

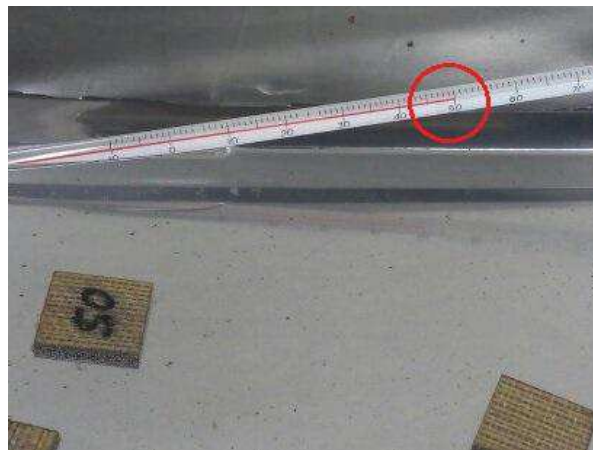


Figura 3.7: Amostras no interior do banho térmico sob placa aquecedora com temperatura de 50°C durante a sorção de água. Fonte: Autoria própria.

3.2.4 Ensaios mecânicos dos compósitos

Os corpos de prova foram cortados nas dimensões padronizadas pelas normas ASTM D3039 (ensaio de tração) (Figura 3.8), ASTM D256 (ensaio de impacto) (Figura 3.9) e ASTM D 790 (ensaio de flexão) (Figura 3.12).

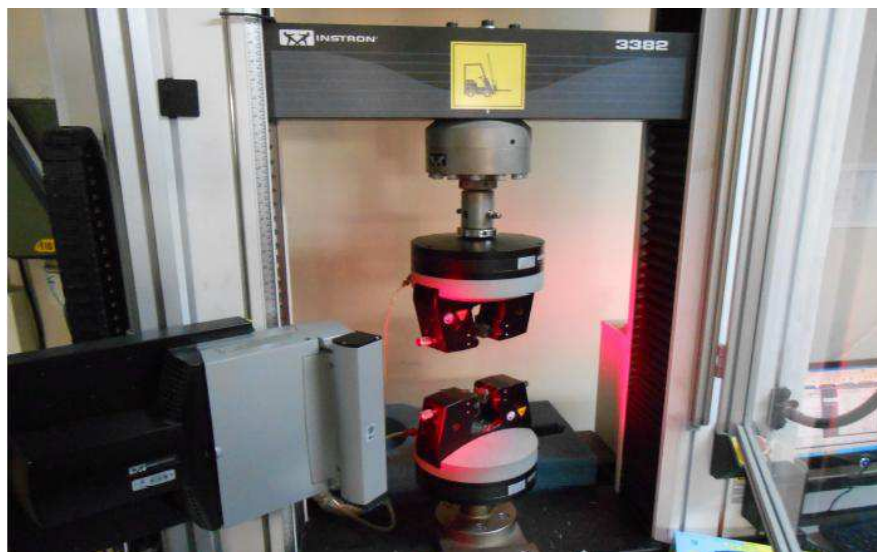
3.2.4.1 Ensaio em tração

O desempenho mecânico de um material é determinado pela força necessária para causar quantidade de deformação ou distorção que pode ser permitida. Seguindo a norma ASTM D 3039 para ensaio de tração, os corpos de prova foram cortados em forma de barras retangulares, com dimensões de 25 X 250 mm² (Figura 3.8).



Figura 3.8: Corpos de prova de tração. Fonte: Autoria própria.

O ensaio de tração foi realizado na máquina INSTRON 3382 com uma célula de carga de 100KN com extensômetro (Figura 3.9) e velocidade de deslocamento de travessa de 1 mm/min, conforme orientação da norma ASTM D3039.



(a)



(b)

Figura 3.9: a) Máquina universal de ensaios INSTRON 3382 com uma célula de carga de 100KN com vídeo extensômetro. b) Ensaio de tração. Fonte: Autoria própria.

3.2.4.2 Ensaio de impacto

Para o ensaio de impacto ASTM D256, utilizou-se uma máquina CEAST IMPACTOR II (Figura 3.10) operando com martelo de 2,75 J. Os resultados reportados referem-se à média de cinco corpos de prova. Os testes foram realizados no Laboratório de Materiais Poliméricos – LaPol da UFRGS. A Figura 3.11 apresenta o corpo de prova, com dimensões de 63,5 x 12,7 mm² com profundidade do entalhe de 2,54 mm, utilizado no teste mencionado.



Figura 3.10: Máquina de ensaios de impacto CEAST IMPACTOR II. Fonte: Autoria própria.



Figura 3.11: Corpo de prova de impacto. Fonte: Autoria própria.

3.2.3.3 Ensaio de flexão em três pontos

Seguindo a norma ASTM D 790, para ensaio de flexão, os corpos de prova (Figura 3.12) foram cortados em forma de barras retangulares, com dimensões de 12,7 x 127 mm².

Para o ensaio de flexão em três pontos, as extremidades dos corpos de prova foram apoiadas nos suportes fixos da máquina de ensaios estática da marca Shimadzu, modelo Autograph AG – X com célula de carga de 50 KN (Figura 3.13). No seu centro, através do suporte móvel, uma força foi aplicada até a ruptura do corpo de prova, com taxa de deslocamento de travessa 1 mm/min.



Figura 3.12: Corpos de prova de flexão. Fonte: Autoria própria.



Figura 3.13: Ensaio de flexão em três pontos. Fonte: Autoria própria.

3.3 Caracterização morfológica

As imagens da superfície do tecido juta/algodão e da superfície dos compósitos fraturados após terem sido submetidos ao ensaio de flexão e impacto foram obtidas em um microscópio eletrônico de varredura MEV, modelo HITACHI TM 3000 pertencente ao Núcleo de Materiais Sustentáveis – NUMATS, Coppe, UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro) (Figura 3.14).

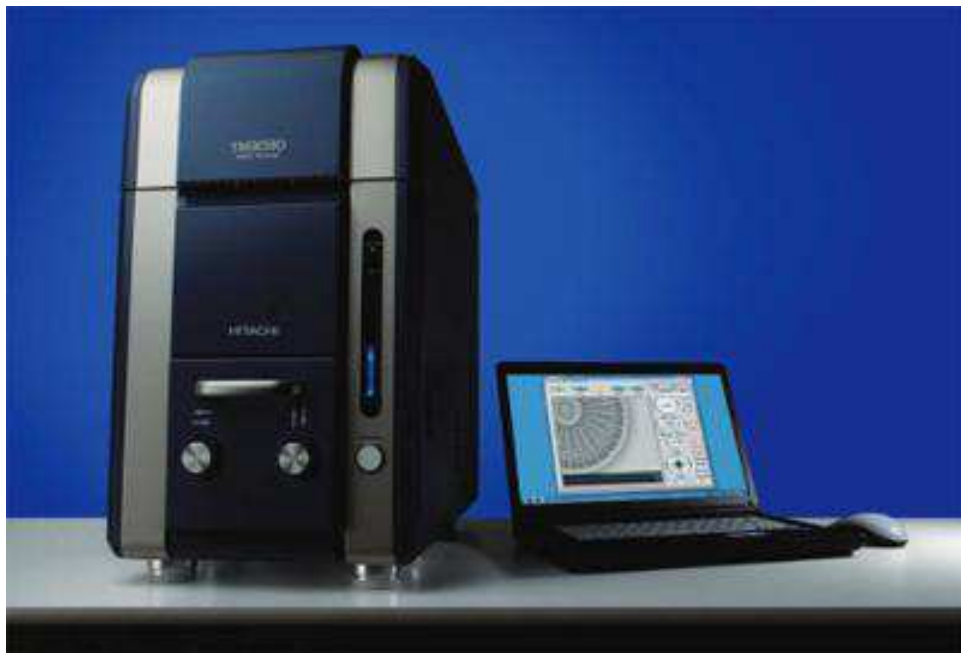


Figura 3.14: Microscópio eletrônico de varredura.

A preparação das amostras para MEV foi feita fixando o material após fratura com fita de carbono em suportes específicos. Em seguida as amostras foram metalizadas com ouro.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Efeito do envelhecimento higrotérmico – Sorção de água

Nas Figuras 4.1 e 4.3 estão representadas as curvas médias de sorção de água em função do tempo de 5 corpos-de-prova de compósitos, de matriz poliéster insaturado reforçados com tecido juta/algodão. Verifica-se, após análise das figuras, que a sorção de água é rápida nos estágios iniciais, diminuindo e tendendo ao equilíbrio em tempos mais longos de exposição tanto para 32 quanto para 48% de teor de fibras de tecido juta/algodão, conforme Figura 4.1 e Figura 4.3, respectivamente. Observa-se que, para compósitos onde a temperatura e a taxa de absorção da água são maiores, a velocidade de migração da água para o interior do compósito também será maior.

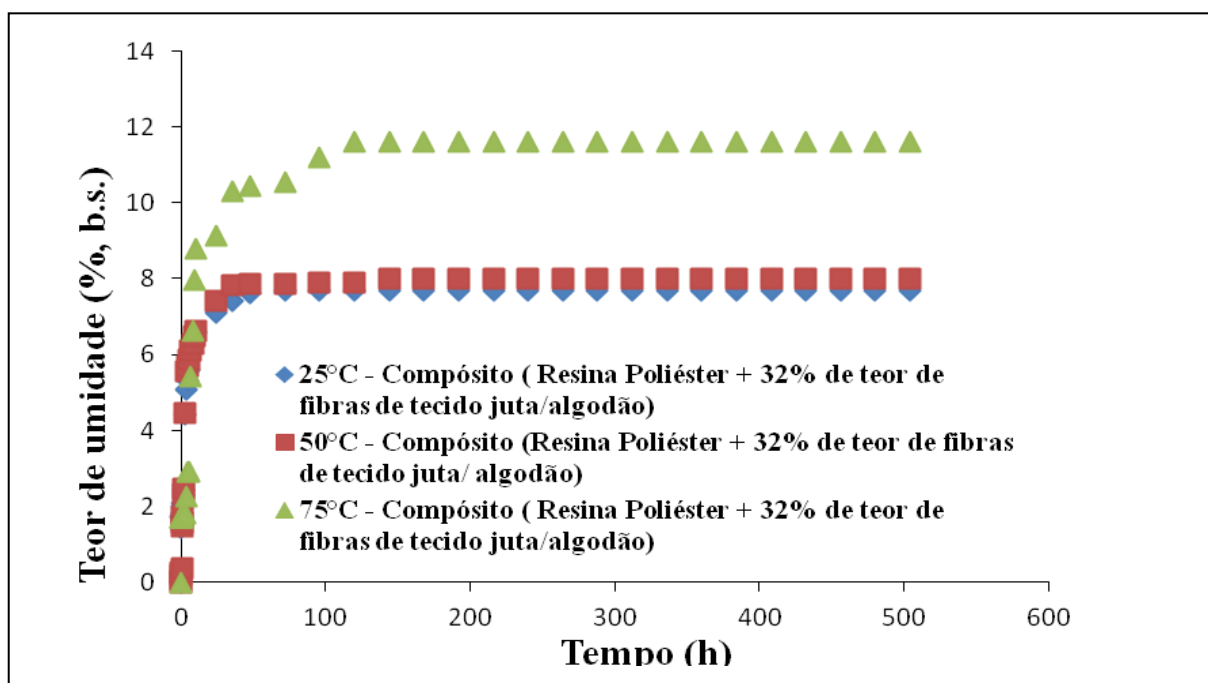


Figura 4.1: Gráfico da absorção de água em função do tempo, até 504h, obtidas para compósitos reforçados com 32% de teor de fibra de tecido juta/algodão nas temperaturas de 25,50 e 75°C.

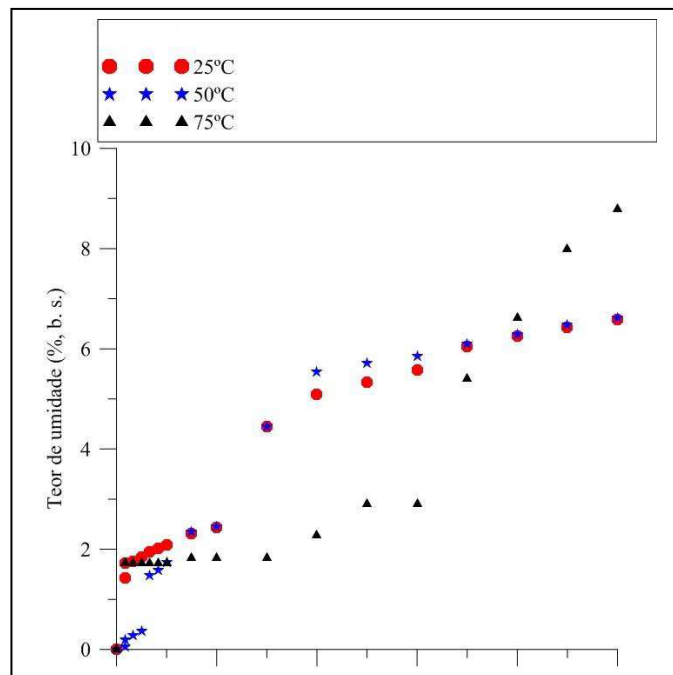


Figura 4.2: Gráfico da absorção de água em função do tempo, até 10h para os primeiros estágios iniciais de imersão em água, obtido para compósitos reforçados com 32% de teor de fibra de tecido juta/algodão nas temperaturas de 25,50 e 75 °C.

Os resultados de absorção de água apresentados na Figura 4.1 indicam que os compósitos com 32% de fibras imersas em água na temperatura de 75 °C, apresentaram umidade máxima em equilíbrio mais elevada (12%).

Nóbrega (2007) realizou ensaio de sorção de água nas temperaturas de 25, 50 e 70 °C em compósitos reforçados com mantas de fibra de caroá (fração volumétrica 30%) moldados por compressão. Comparando a taxa de absorção de água a 70°C reportada por Nóbrega (2007) para sistemas poliéster/caroá com a obtida nesse estudo (75° C) para sistemas poliéster/juta-algodão, verifica-se que o teor de água absorvido pelo sistema reportado por Nóbrega (2007) é maior (16%) do que o reportado neste estudo. A diferença entre os valores reportados está associada ao maior teor de vazios do compósito moldado pelo processo de compressão comparado ao RTM (GIOVEDI et al., 2014), e também ao fato da pré-forma utilizada por Nóbrega (2007) ser uma manta (MARINUCCI, 2011).

Os compósitos reforçados com 32% de teor de fibra de tecido juta/algodão na temperatura de 50° C absorveram em média 8%, o que é considerado um bom resultado quando comparado aos resultados de NÓBREGA (2007) em que compósitos reforçados por

32% de teor de fibra de mantas de caroá com matriz poliéster que absorveram 15 % de umidade na temperatura de 50° C visto que o processo de fabricação do compósito foi o de laminação manual.

Nos compósitos reforçados com 32% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos na temperatura de 25° C houve apenas 6% de absorção de água, o que significa um resultado satisfatório, pois NÓBREGA (2007) obteve resultados superiores, 14% de água absorvida.

Santos (2017) moldou por compressão, compósitos com manta de sisal/poliéster e fez análise de sorção de água nas temperaturas de 25, 50 e 70° C, comparando a sorção dos compósitos com o poliéster e verificou que a resina pura absorve somente 0,82% de umidade, o que é atribuído ao caráter hidrofóbico da matriz, que torna a sua absorção praticamente nula.

A Figura 4.3 apresenta o aumento na absorção de água com o tempo de imersão para todos os compósitos com 48% de teor de fibra de tecido juta/algodão nas temperaturas 25, 50 e 75° C. Comparando as Figuras 4.1 e 4.3 para uma mesma temperatura observa-se que, como esperado, o aumento do percentual volumétrico de fibras resultou em uma absorção maior de água, o que é explicado pela natureza hidrofílica das fibras vegetais (VÄISÄNEN et al., 2016) Carvalho et al. (1999), Cavalcanti et al. (2001) e Sreekala et al. (2002). Alguns estudos têm sido publicados sobre a eficácia da hibridização no comportamento de absorção de água em compósitos (Thwe e Liao, 2002).

Nas Figuras 4.3 e 4.4 verifica-se que a absorção dos compósitos é maior na temperatura de 75° C resultando em 19% de água absorvida. Na temperatura de 25° C, os compósitos absorvem 14% de água, menos água do que na temperatura de 50° C, que absorveu 16%.

De acordo com Scida (2013), quanto maior a absorção de água mais degradado estará o compósito, o que impacta nas propriedades mecânicas e nos mecanismos de dano no compósito.

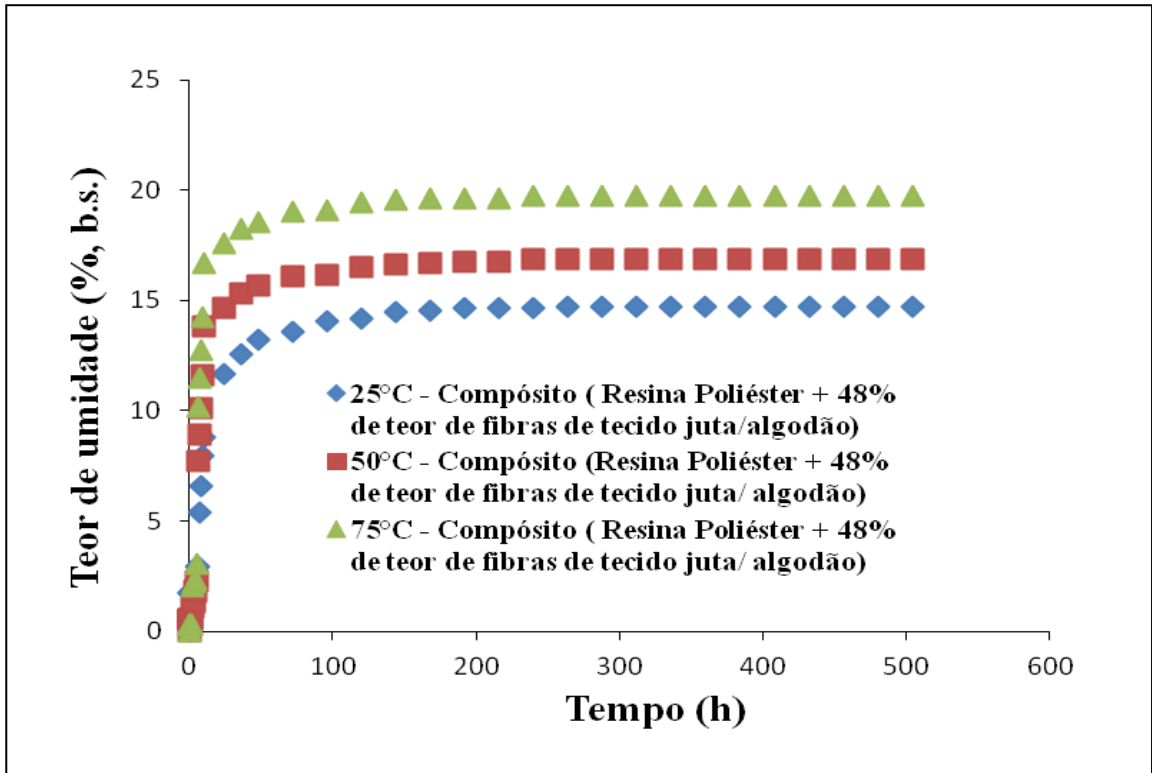


Figura 4.3: Gráfico da absorção de água em função do tempo obtidas para compósitos de 48% de teor de fibras de tecido juta/algodão nas temperaturas de 25,50 e 75°C.

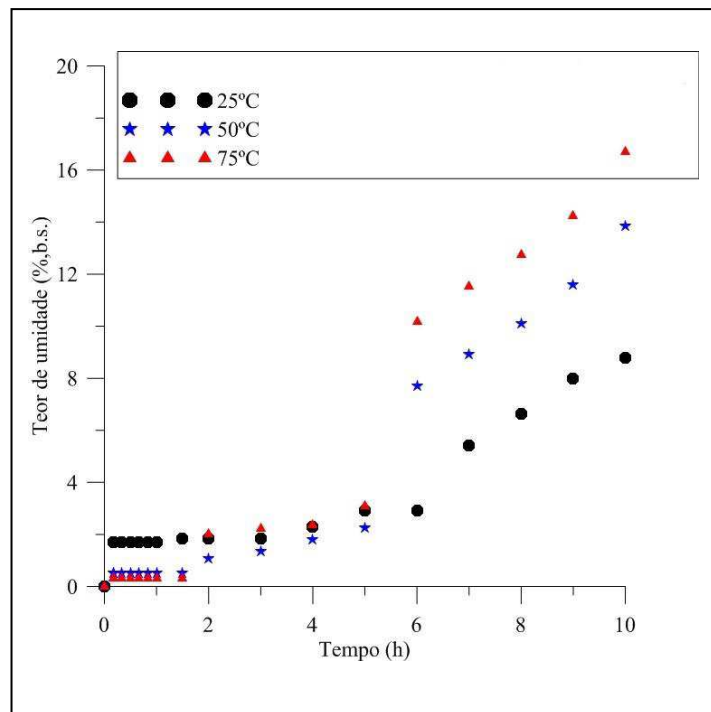


Figura 4.4: Gráfico da absorção de água em função do tempo, até 10h para os primeiros estágios iniciais de imersão em água, obtido para compósitos reforçados com 48% de teor de fibras de tecido juta/algodão nas temperaturas de 25,50 e 75°C.

4.2 Ensaios mecânicos

4.2.1 Resistência à tração

Os valores de resistência à tração dos compósitos com 32% de teor de fibra na condição seca e saturados de água nas temperaturas de 50 e 75 °C estão apresentados na Figura 4.5. É evidente a perda de resistência à tração dos compósitos quando estes absorvem água. ESPERT et al., (2004) atribuem este efeito à diminuição da adesão interfacial entre a fibra e a matriz, provocada pela absorção de água.

Os resultados na Figura 4.5 indicam que a resistência à tração dos compósitos reforçados com tecido juta/algodão, para os casos de tempo inicial (0h) e final (504h), ocorreu um decréscimo de aproximadamente 16%, respectivamente, o que era esperado. Segundo Scida (2013) as fibras, ao absorverem água, reduzem a adesão interfacial fibra/matriz. Esta absorção excessiva de água pela matriz e o inchaço das fibras, conduz à fissuração da matriz e ao deslocamento das fibras no final.

Como a água age como plastificante na matriz, as microfibrilas podem mover-se mais livremente porque as ligações internas são enfraquecidas (ou rompidas em alguns casos). Com aplicação da carga em tração, as microfibrilas e os eixos da fibra mudam de tal modo que as microfibrilas se alinham na direção da fibra. Conseqüentemente, este fenômeno tem um efeito no compósito, até mesmo se o reforço é feito de fios torcidos e a matriz termofixa não permite que os fios sejam distorcidos. Na verdade, as ligações entre as fibras e a resina termofixa, são mais fortes do que as ligações naturais dentro dos feixes e dentro das fibras individuais (SCIDA, 2013).

Silva et al. (2015) afirmaram que, para compósitos reforçados com fibras vegetais, ao ocorrer à absorção de água pelo mesmo, há inchamento da fibra tornando-a mais porosa e diminuindo a sua rigidez. O inchamento da mesma pode promover descolamento interfacial, devido à instabilidade dimensional e, conseqüentemente, mais água é absorvida através dos vazios formados na interface. Com longos períodos de exposição, a fibra entra em estado de decomposição com perda progressiva da resistência mecânica em tração.

Ao se comparar na Figura 4.5 as amostras que estavam imersas a temperatura de 50 °C com as que foram imersas a 75° C, fica evidente que existe uma perda de resistência à tração dos compósitos ao longo do tempo de imersão, mas a mesma é semelhante em um mesmo período de amostragem. Por exemplo, após 504 horas de imersão a 50 e 75° C, amostras com

o mesmo teor de fibras, perderam, respectivamente, 16 e 19% da sua resistência inicial. O aumento da temperatura acelerou a sorção de água no compósito, o que é intensificado pela afinidade da água por grupos funcionais específicos de matrizes poliméricas de natureza polar, no entanto não prejudicou tanto a resistência à tração devido a menor quantidade de fibra vegetal que é um material hidrofílico. CÂNDIDO (2001) relata que em geral a sorção de água provoca reduções na adesão reforço/matriz polimérica, devido à deterioração das interações físico-químicas existentes entre a resina e a fibra.

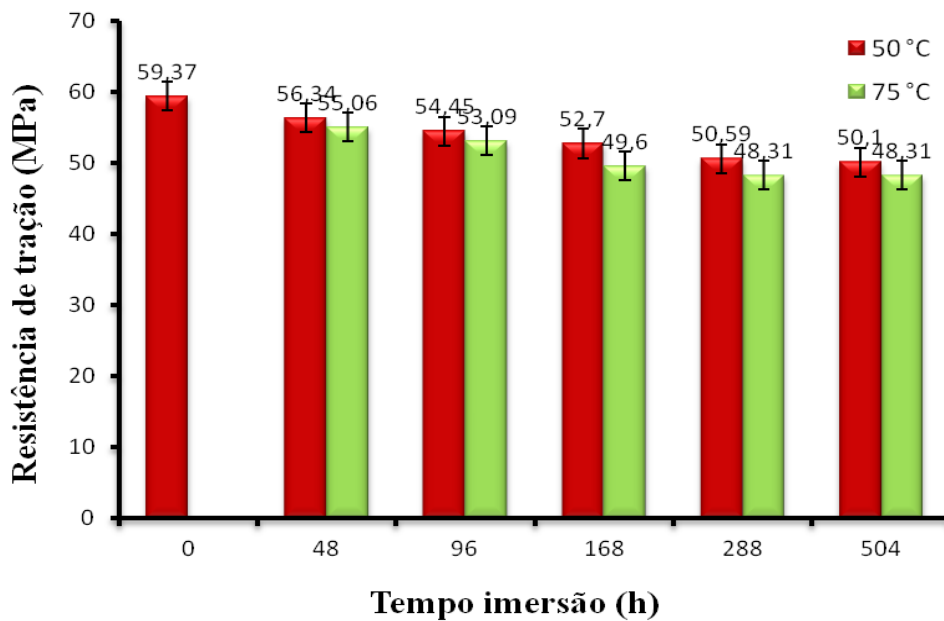


Figura 4.5: Resistência à tração dos compósitos com 32% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 50 e 75°C.

Na Figura 4.6 observa-se o efeito do tempo de imersão em água a 50 e 75°C na resistência à tração de compósitos contendo 48% de teor de fibra de tecido juta/algodão. Comparando a Figura 4.5 (32% volume fibras) com a Figura 4.6 (48% volume fibras), verifica-se que nesta última, para o tempo de 504 horas a resistência apresentou valores bem menores e mais distintos para cada temperatura, ou seja, após 504h de imersão em água a 50 e 75°C, a resistência dos compósitos com 48% de fibras diminuiu 0,4 e 12,7%, respectivamente, ao invés dos 16 e 19% observados para os compósitos com 32% de fibras. Isto evidencia a maior sensibilidade à umidade dos sistemas contendo maior concentração de fibras vegetais e indicam serem estas as responsáveis pela durabilidade dos compósitos em condições úmidas

ou seja, quanto maior o teor de fibras vegetais, maior o teor de água absorvido e maior e mais rápida a deterioração das propriedades do compósito.

Observa-se ainda na Figura 4.6 que os compósitos secos atingiram uma resistência de quase 72 MPa indicando uma propriedade elevada e adequada a várias aplicações. Porém, quando imersos em água, suas propriedades diminuíram mais significativamente a partir das 48 h de imersão devido ao aumento da absorção da água que, como dito anteriormente, é bastante sensível ao teor de fibras vegetais no compósito. Os dados também indicam que esses compósitos não devem ser utilizados em condições de imersão prolongada em água, mas podem ser utilizados em ambientes úmidos por tempos curtos.

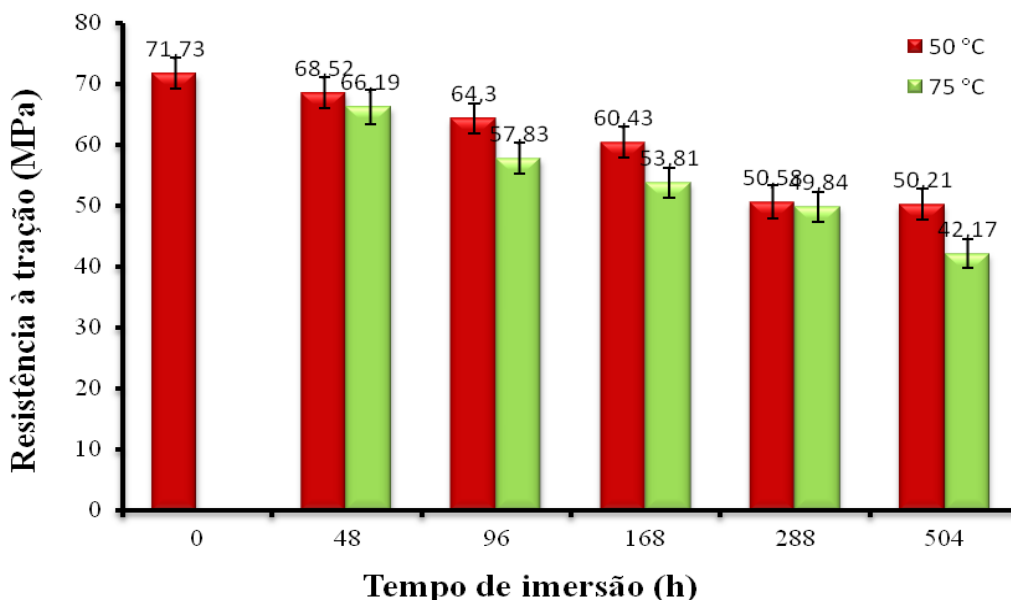


Figura 4.6: Resistência à tração dos compósitos com 48% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 50 e 75°C.

As Figuras 4.7 e 4.8 mostram o efeito do teor de fibras no compósito na resistência mecânica à tração na temperatura de 50°C. Os resultados indicam que os compósitos reforçados por 48% de teor de fibras juta-algodão (Figura 4.8), em ambas as condições, seco e imerso em água destilada à 50°C, quando comparados com os reforçados com 32% de teor de fibra (Figura 4.7), apresentaram um aumento nesta propriedade mecânica de 20,8% no estado seco (0 h). Os dados obtidos estão de acordo com os reportados na literatura para sistemas afins (Andrade e Nóbrega, 2009), onde acredita-se que o desempenho superior dos compósitos reforçados com teores de fibras acima de 30% em relação à matriz esteja associado tanto ao menor diâmetro médio das fibras, que promovem o aumento nas áreas de contato fibra/matriz,

quanto às propriedades mecânicas individuais das fibras. Já para os compósitos na mesma temperatura de 50°C reforçados com 32 e 48%, ambos imersos em água destilada, no tempo de imersão final de 504 h, observa-se que, com 48% de fibras de juta-algodão houve um aumento na propriedade mecânica de 0,22%. Fonteles (2013) apud Santafé et al. (2010) relata que, para os compósitos com mais de 40% de reforço, a quantidade de fibras vegetais atua como uma barreira eficaz para combater a propagação de trincas, melhorando o desempenho na resistência à tração dos compósitos, porém, quanto mais fibras maior a probabilidade de absorver água, mesmo que por um longo período de tempo. Fonteles (2013) apud Andrade e Nóbrega (2009), avaliou o efeito da fibra de babaçu nas propriedades mecânicas de compósitos de poliéster. Os autores relataram aumentos nas propriedades de resistência à tração, para teores acima de 38% de fibras, e resistência ao impacto, módulo de elasticidade, e tenacidade dos compósitos reforçados com fibras de babaçu, o que foi associado à boa adesão fibra-matriz. Os resultados obtidos corroboram com a literatura em relação à existência de um volume crítico de fibras que atuam como reforço no compósito.

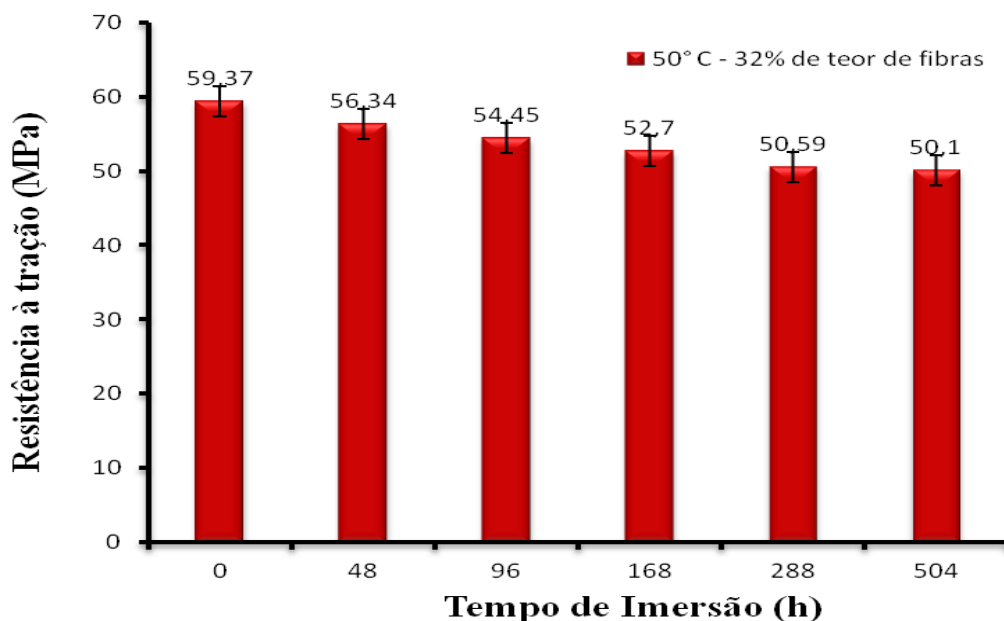


Figura 4.7: Resistência à tração dos compósitos com 32% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada na temperatura de 50°C.

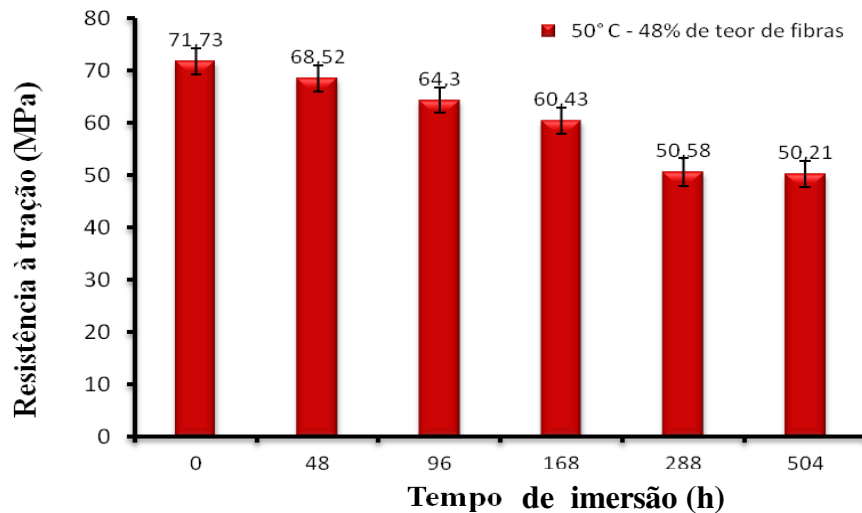


Figura 4.8: Resistência à tração dos compósitos com 48% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada na temperatura de 50°C.

Scida et al. (2013) relatam que a saturação dos compósitos híbridos imersos em água por longo tempo está relacionada à estrutura das fibras que possuem várias camadas, com diferentes espessuras e características, dispostas ao redor de um núcleo oco chamado de lúmen. A absorção se dá camada por camada e também através do lúmen, principalmente quando são utilizadas fibras longas. Obviamente existem outros fatores influenciando no processo de absorção dos compósitos híbridos, como a qualidade da interface fibra/matriz, a presença de vazios, a hibridização e a configuração do laminado.

As Figuras 4.9 e 4.10 ilustram o efeito do teor de fibra na resistência à tração do compósito na temperatura de 75°C.

Comparando as Figuras 4.9 e 4.10, pode ser observado que as amostras do compósito seco (0 h) com teor de fibras de 48%, apresentaram melhor desempenho mecânico, em torno de 20,8% mesmo estando numa temperatura elevada de 75°C, porém, no tempo de imersão de 504h, percebe-se uma diminuição de 12,71% na resistência mecânica à tração, com o aumento do teor de fibra de 32% para 48%, relacionado ao aumento do teor de umidade do compósito.

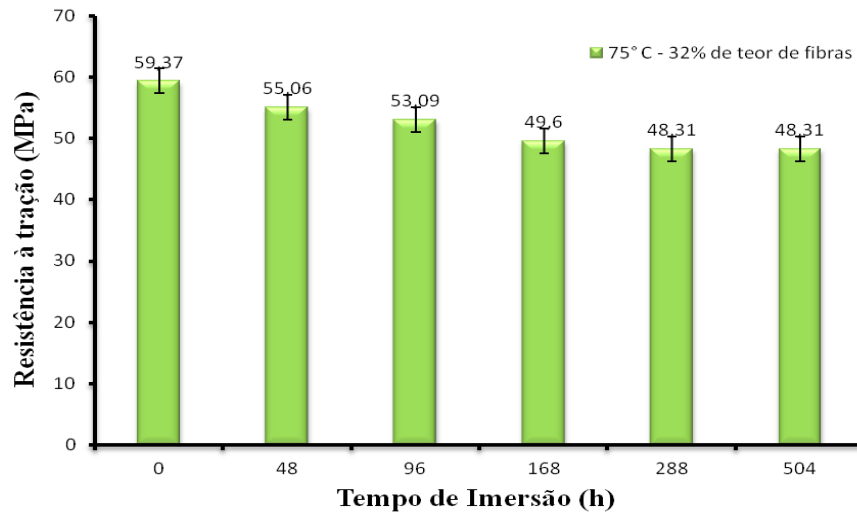


Figura 4.9: Resistência à tração dos compósitos com 32% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada na temperatura de 75°C.

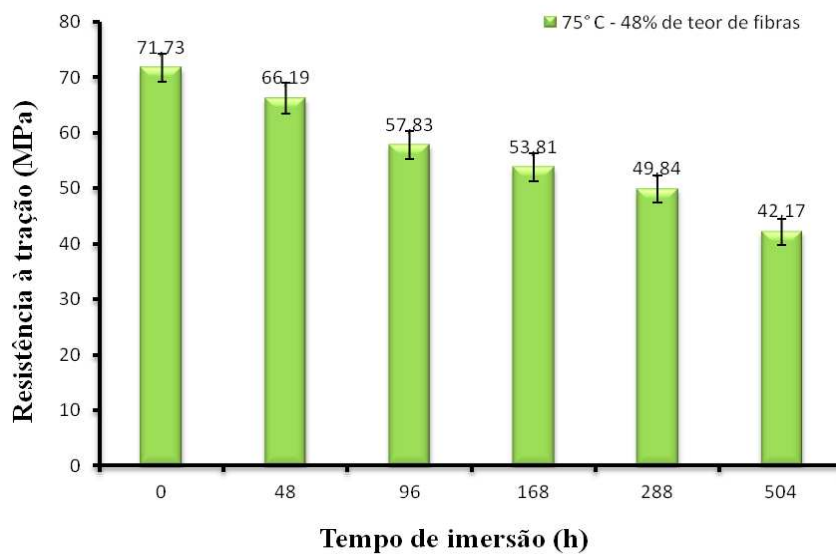


Figura 4.10: Resistência à tração dos compósitos com 48% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada na temperatura de 75°C.

Observa-se que o aumento do volume de fibras resulta no aumento da absorção de umidade, devido à relação entre o volume de fibras e a área ocupada, conforme é relatado por vários pesquisadores (Cavalcanti, 2006; Nóbrega, 2007).

4.2.2 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade sob tração ou módulo de Young para os compósitos com 32% de teor de fibra estão apresentados na Figura 4.11 e indicam, como esperado, que o módulo elástico dos compósitos reforçados com tecido juta/algodão é mais elevado para os compósitos seco do que para os compósitos imersos em água.

Fica evidenciado que o módulo elástico dos compósitos com 32% de fibras é muito mais afetado pela sorção de água do que a resistência à tração. Nas primeiras 48h e imersão em água a 50 e 75°C, houve reduções no módulo elástico de 63 e 82%, respectivamente, foram observadas. Essa propriedade diminuiu ainda mais e muito lentamente em tempos longos de exposição. Esse comportamento é associado ao efeito plastificante da água e reflete a rápida absorção de água pelas fibras vegetais seguido de uma sorção lenta em tempos longos.

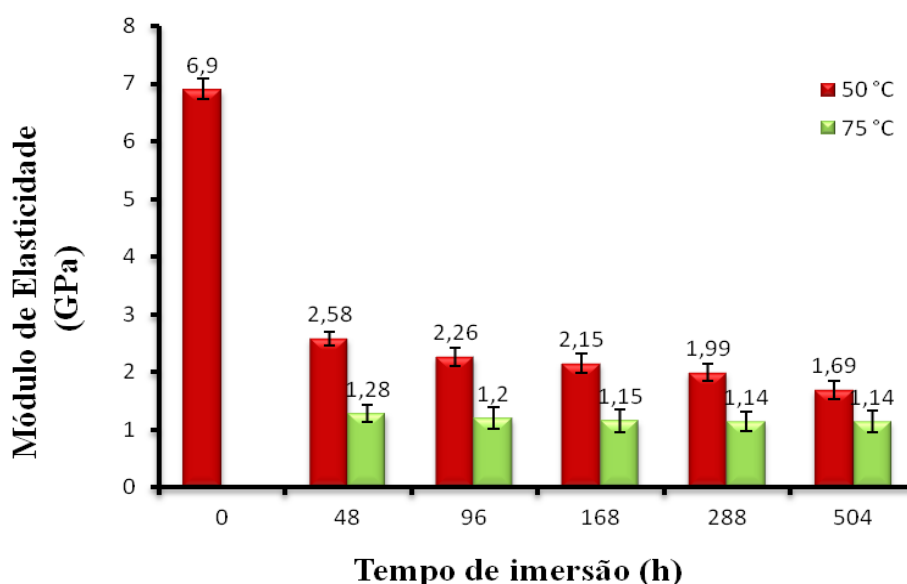


Figura 4.11: Módulo de elasticidade em relação à resistência à tração dos compósitos com 32% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 50 e 75°C.

A grande diferença de rigidez entre os compósitos secos e após a absorção de água evidenciam a melhor interação fibra-matriz para os compósitos secos (LUIZ, 2012).

De acordo com Scida (2013) o aumento da temperatura acelera a cinética de difusão da água, o que está associado à combinação da dilatação da matriz e difusividade da água. A mudança nas propriedades mecânicas dos compósitos com a sorção de água não pode ser

somente explicada pelo enfraquecimento na interface e pela distorção dos fios de fibra, visto que o decréscimo na máxima resistência com a sorção de água é moderado (Figura 4.11 e Figura 4.12).

Na Figura 4.12 são apresentados os resultados dos módulos de elasticidade dos compósitos com 48% de teor de fibra de tecido juta/algodão ensaiados nas temperaturas de 50°C e 75°C. Verifica-se o mesmo comportamento observado para compósitos reforçados com 32% de teor de fibra, ou seja, forte decréscimo nessa propriedade nas primeiras 48h de imersão e uma pouca dependência nessa propriedade em tempos mais longos de exposição. A redução no módulo elástico dos sistemas contendo maior teor de fibras foi equivalente às dos sistemas contendo 32% de fibras, ou seja, 62% e 83%, respectivamente nas temperaturas de imersão de 50 e 75°C, respectivamente. Isso foi atribuído ao fato da sorção de umidade ter provocado queda tão significativa no módulo elástico dos sistemas que o efeito do aumento no teor de fibras não foi apresentado. Chow et al. (2007) estudaram compósitos de poliéster reforçados com fibras vegetais e avaliaram os efeitos da imersão em água nas propriedades em tração e impacto. O módulo de elasticidade e a resistência à tração dos compósitos de poliéster reforçados com fibras vegetais diminuíram continuamente com o aumento da temperatura de imersão em água, causando em algumas vezes uma plastificação no compósito.

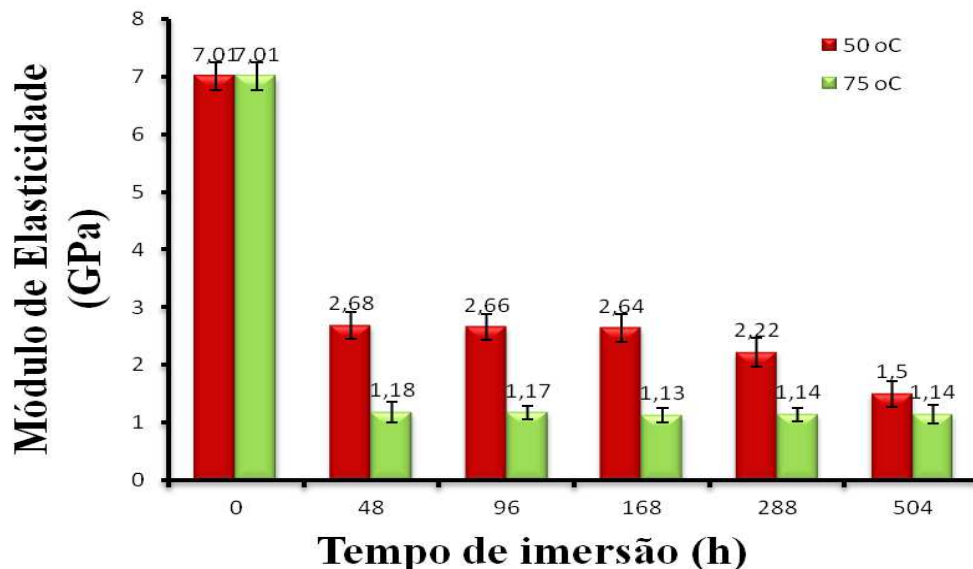


Figura 4.12: Módulo de elasticidade em relação à resistência à tração dos compósitos com 48% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 50 e 75°C.

As Figuras 4.13 e 4.14 indicam que os compósitos com maior módulo de elasticidade foram aqueles fabricados com 48% de fração volumétrica de fibras juta-algodão na condição seca, o que pode ser atribuído à melhor condição de molhamento das fibras pela matriz, resultando em melhor transferência de esforços e menor volume de bolhas aprisionadas na matriz polimérica. Na condição de imersão em água destilada, os compósitos tanto com 32% como com 48% de teor da fibra, a umidade diminuiu o módulo de elasticidade como também a sua rigidez, o que foi atribuído a elevada absorção de água, mostrando-se maior para aqueles fabricados com 48% de fração volumétrica de fibras, mesmo estando em mesma temperatura de imersão à 50°C. Um aumento de 1,6% foi verificado no módulo de elasticidade, na condição seca (t=0h).

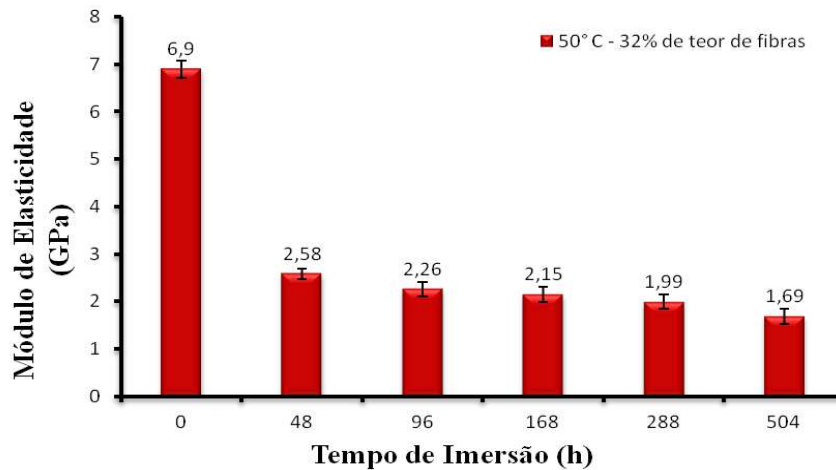


Figura 4.13: Módulo de elasticidade em relação à resistência à tração dos compósitos com 32% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada na temperatura de 50°C.

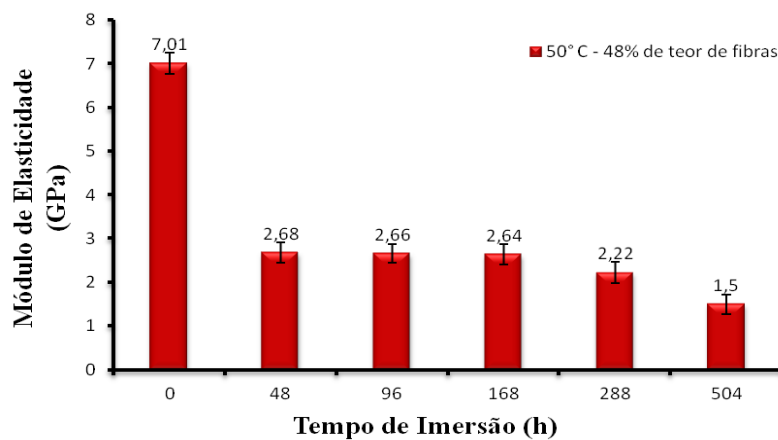


Figura 4.14: Módulo de elasticidade em relação à resistência à tração dos compósitos com 48% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada na temperatura de 50°C.

Nas Figuras 4.15 e 4.16, observa-se que os valores no módulo de elasticidade para os compósitos fabricados com 32% e 48% de fração volumétrica de fibras juta-algodão na condição de imersão em água a 75°C, praticamente permaneceram constante, com uma leve redução neste parâmetro nos compósitos com teor de fibra de 48%. Isto acontece pelo fato de que, com o aumento do teor de fibras, há uma maior facilidade de movimentação das cadeias poliméricas, resultando em menor módulo de elasticidade.

A pequena redução do módulo elástico está associada a um efeito plastificante da água no compósito. A temperatura também tem influência nessa propriedade. Temperaturas mais elevadas faz com que a matriz polimérica torne-se mais dilatada, diminuindo a sua rigidez, e conseqüentemente o módulo de elasticidade. A água aquecida presente e difundida na interface possibilita um maior alongamento das fibras e diminuição das forças de cisalhamento interfaciais (MORAES et al., 2004). Observa-se um decréscimo abrupto deste parâmetro nas primeiras 48h de processo.

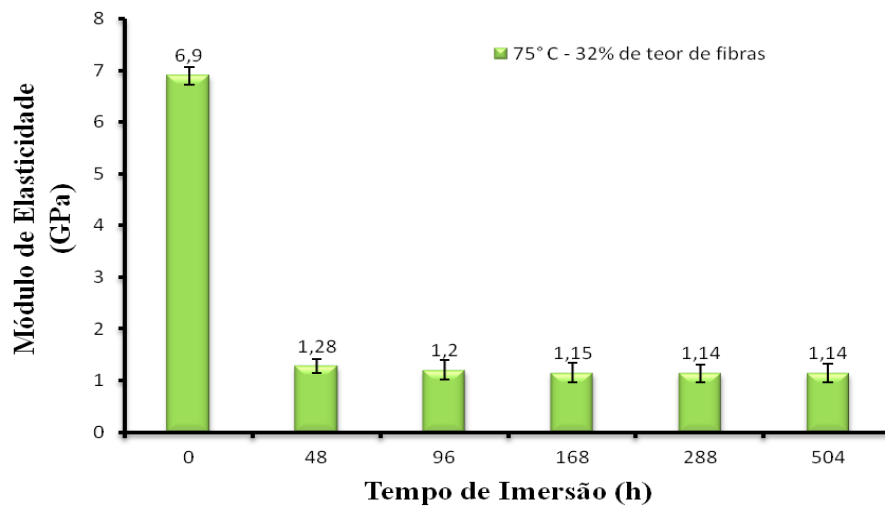


Figura 4.15: Módulo de elasticidade em relação à resistência à tração dos compósitos com 32% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada na temperatura de 75°C.

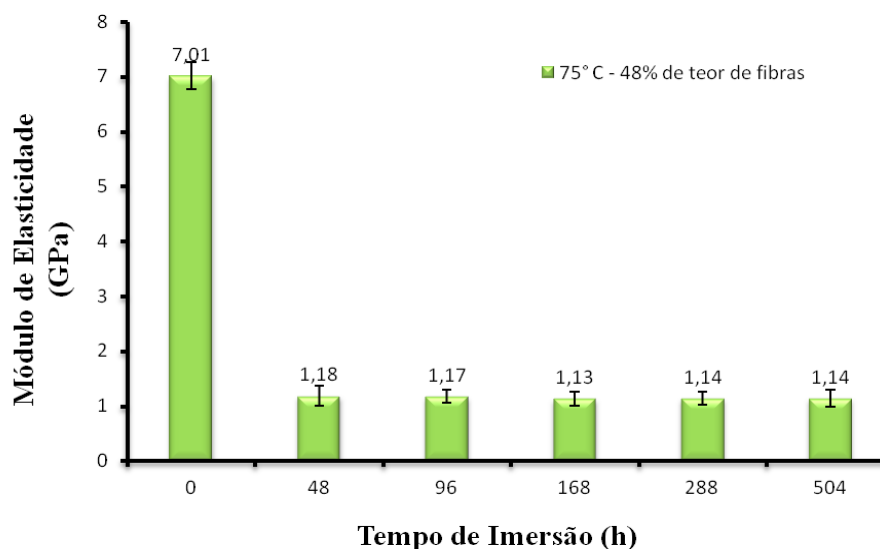


Figura 4.16: Módulo de elasticidade em relação à resistência à tração dos compósitos com 48% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada na temperatura de 75°C.

4.2.3 Resistência ao Impacto

As Figuras 4.17 e 4.18 ilustram, a resistência ao impacto dos compósitos reforçados com 4 (32% v/v de fibra) e 6 (48% v/v de fibra) camadas de tecido juta/algodão em diferentes tempos de imersão em água destilada nas temperaturas de 50 e 75°C, respectivamente.

Tal como observado para a resistência à tração, a resistência ao impacto de ambos os sistemas diminui com o aumento no tempo e temperatura de imersão em água. Reduções de cerca de 15,60 % (T = 50°C) e de 22,9% (T = 75°C) nessa propriedade foram observados para os compósitos com $V_f = 32\%$, e de 21,84% (T = 50°C) e de 23,36% (T = 75°C) nos compósitos com $V_f = 48\%$ após 504h de imersão.

Mejri et al. (2018) afirmaram que em curtos períodos de sorção de água, ou baixa absorção de água, a absorção de água aumenta a mobilidade da cadeia polimérica que resulta em um aumento na resistência ao impacto e que, para longos períodos de sorção de água, ou alta absorção de água, este fenômeno desaparece fazendo com que a resistência ao impacto seja reduzida.

As propriedades de impacto dependem de uma complexa combinação entre rigidez, resistência e flexibilidade dos sistemas. Em geral, sistemas fortes e flexíveis exibem maior

resistência ao impacto do que sistemas fortes e rígidos, no entanto, sistemas fracos e muito flexíveis (como as borrachas) apresentam elevadas resistências ao impacto.

Ao se comparar a resistência ao impacto dos compósitos secos com aqueles imersos por 504h, verificou-se que o compósito contendo 6 camadas de tecido (48% de fibras) foi 1,03% menor do que a obtida em compósitos de 4 camadas (32% de fibras), na temperatura de 50°C é maior 6,23% do que na temperatura de 75°C. A maior resistência ao impacto dos sistemas com elevado teor de fibra (mais fortes e menos deformáveis) são atribuídas ao fato das fibras dificultarem a propagação da trinca. Segundo LIMA (2009), quanto maior for à quantidade de tecido de juta adicionado à matriz de poliéster, maior será a energia de impacto absorvida pelo compósito.

Os resultados encontrados no ensaio de impacto para corpos de prova com 4 camadas (32% de fibras) de tecido após imersão em água a 50°C, apresentaram resistência ao impacto até 48h similar ao compósito seco. Isso acontece, segundo Albuquerque et al. (2000), porque nas primeiras horas da absorção de água, devido às fibras serem hidrofílicas, os compósitos de matriz polimérica reforçado com fibras vegetais apresentam um ligeiro aumento nas suas propriedades mecânicas, se comparadas com o sem envelhecimento.

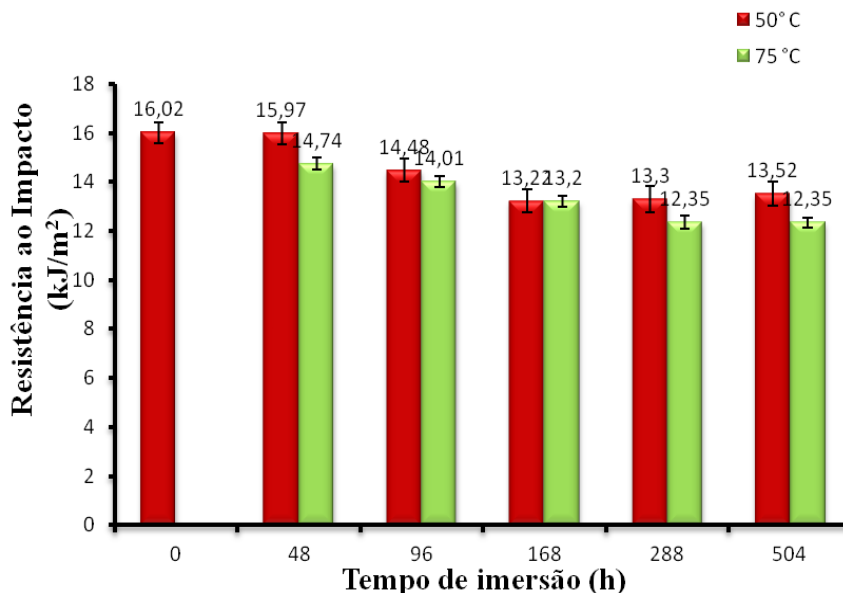


Figura 4.17: Resistência ao impacto dos compósitos com 32% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 50 e 75°C.

Ao comparar a Figura 4.17 com a Figura 4.18 observa-se que esta última teve um suave decréscimo da resistência ao impacto com o passar do tempo. Segundo Zivkovic

(2017), isto é justificado porque na propriedade de impacto quem governa o desempenho do compósito é a adesão interfacial fibra/matriz com uma participação secundária da matriz. E, no caso dos compósitos com 6 camadas (48% de fibras), houve maior absorção de água e ao mesmo tempo tem-se uma maior zona interfacial devido a maior quantidade de fibras vegetais.

Quando a fibra absorve uma pequena quantidade de água, as fibras tendem a inchar ligeiramente, isto resulta no desenvolvimento de um forte intertravamento mecânico entre a fibra e a matriz. Assim, com uma absorção de água muito baixa, os compósitos de polímero reforçados com fibras naturais apresentam um ligeiro aumento nas suas propriedades mecânicas (ALBUQUERQUE et al., 2000). De acordo com Canevarolo apud Seena (2002), o comportamento demonstrado pelos corpos de prova quando sujeitos a diferentes temperaturas varia bastante podendo, inclusive, passar de comportamento frágil para dúctil.

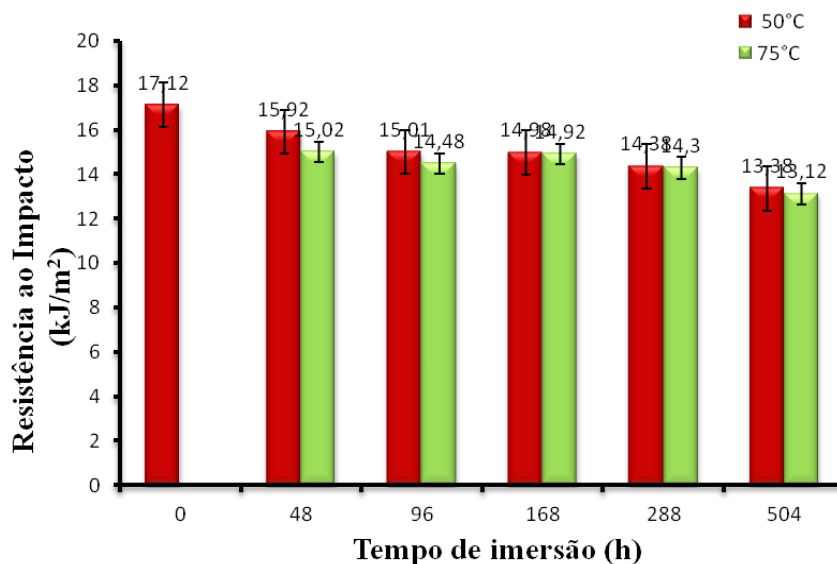


Figura 4.18: Resistência ao impacto dos compósitos com 48% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 50 e 75° C.

As Figuras 4.19 e 4.20 apresentam o comportamento da resistência ao impacto dos compósitos em função do teor de fibras 32% e 48% na temperatura de 50° C. Fica evidenciado o aumento da resistência ao impacto ao se usar 48% de teor de fibra se comparado ao de 32%. Fonteles (2013) apud Andrade e Nóbrega (2009), avaliou o efeito da fibra de babaçu nas propriedades mecânicas de compósitos de poliéster. Os autores relataram aumentos nas propriedades de resistência mecânica dos compósitos para teores acima de 38% de fibras. As propriedades em impacto dos compósitos reforçados com fibras de babaçu

aumentaram com o teor de fibras empregadas, o que foi associado à boa adesão fibra-matriz elevando a energia do compósito. Os resultados obtidos corroboram com a literatura em relação à existência de um volume crítico de fibras que atuam como reforço no compósito.

Na condição seca houve um aumento de 6,86% nessa propriedade para o compósito com 48% de teor de fibra, indicando uma melhor propriedade para esta condição. Segundo Andrade e Nóbrega (2009), isto indica boa adesão das fibras pela matriz no estado seco (0 h), provocando um aumento da eficiência de transferência de energia para as fibras durante o impacto, conseqüentemente elevando a resistência do compósito. Já para os compósitos na condição de imersão em água, em 48 h de processo, houve um leve decréscimo de 0,31% para o compósito fabricado com 48% de teor de fibra quando comparado ao compósito com 32%, fixado a temperatura do banho em 50°C. Em 504 h, o compósito absorveu mais a água com 48% de teor de fibras. Nesta condição, o compósito já se apresenta no estado de equilíbrio. Já BADIA et al. (2014) ao estudarem o desempenho de biocompósitos reforçados com fibras de sisal, submetidos a testes hidrotérmicos nas temperaturas de 26, 36 e 46°C, verificaram que a quantidade de água absorvida foi influenciada apenas pelo teor das fibras e que a temperatura do banho claramente afetou a taxa de difusão de água, mas não o teor de água absorvido no equilíbrio. Obviamente esta afirmação é coerente para baixas temperaturas, o que não foi verificado nesta pesquisa, principalmente para a temperatura de 75°C.

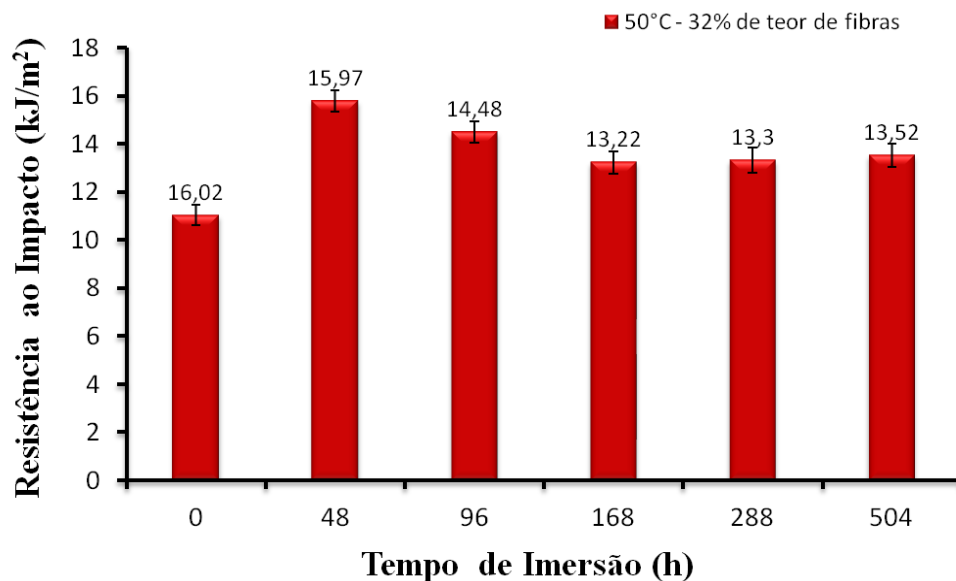


Figura 4.19: Resistência ao impacto dos compósitos com 32% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada na temperatura de 50 °C.

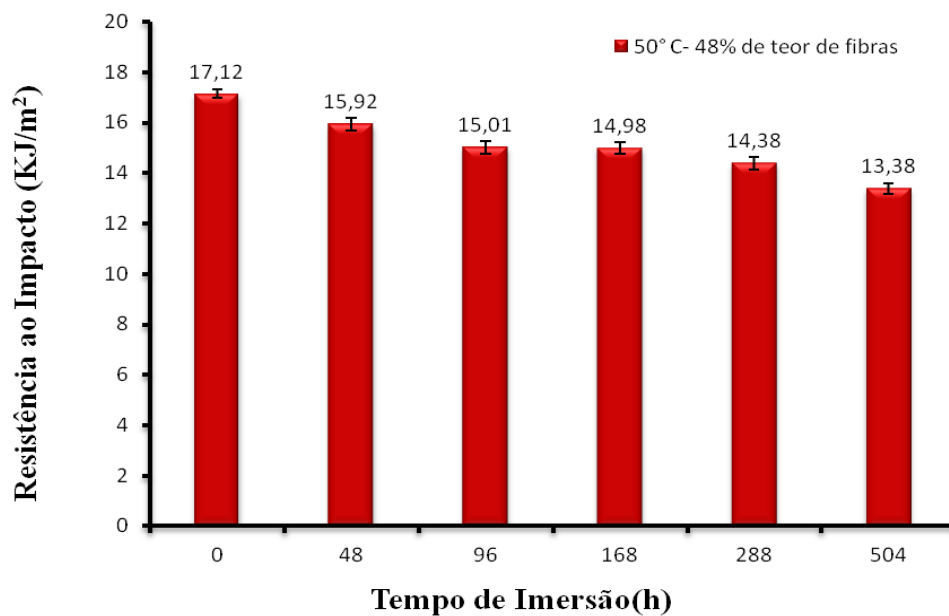


Figura 4.20: Resistência ao impacto dos compósitos com 48% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada na temperatura de 50 °C.

As Figuras 4.21 e 4.22 apresentam o comportamento da resistência ao impacto dos compósitos seco e imersos em água na temperatura de 75°C em função do teor de fibras juta-algodão de 32% e 48%, respectivamente. Fica evidente o aumento da resistência ao impacto dos compósitos para o teor de fibras de 48% na condição seco, com um aumento da resistência de 6,86%. O resultado nesta condição é maior quando comparado aos compósitos imersos em água. Pode-se observar, na resistência ao impacto para os compósitos com teor de fibras de 48% em 48 h de imersão, um aumento de 1,89% em relação aos compósitos com 32% de teor de fibras, na temperatura de 75° C. Nóbrega (2007) atribui esse comportamento a boa adesão fibra-matriz, capaz de aumentar a energia ao impacto do sistema com o teor de fibra. Já para os compósitos imersos a 504h houve um aumento de 6,23% para 48% de teor de fibras se comparado ao de 32%, quando estes absorvem água. No entanto, avaliando-se individualmente, para os compósitos com 32% de teor de fibras, verificou-se uma redução de 22,91% e para a condição 48% de teor de fibras uma redução de 23,36%, mesma propriedade. Espert et al. (2004) atribuem este efeito a diminuição da adesão interfacial da fibra e matriz, provocada pela absorção de água pelo compósito.

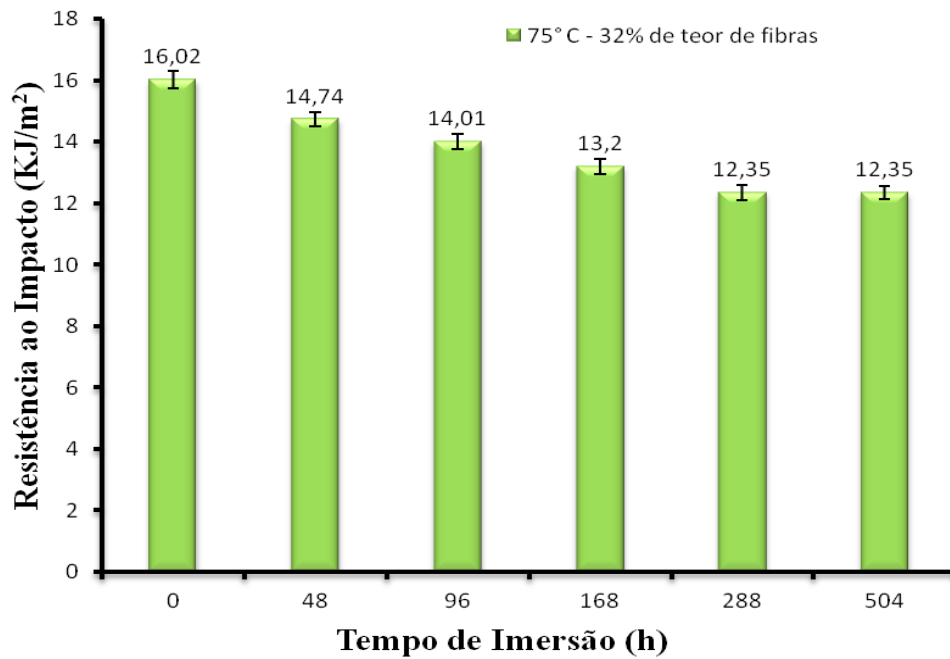


Figura 4.21: Resistência ao impacto dos compósitos com 32% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 75 °C.

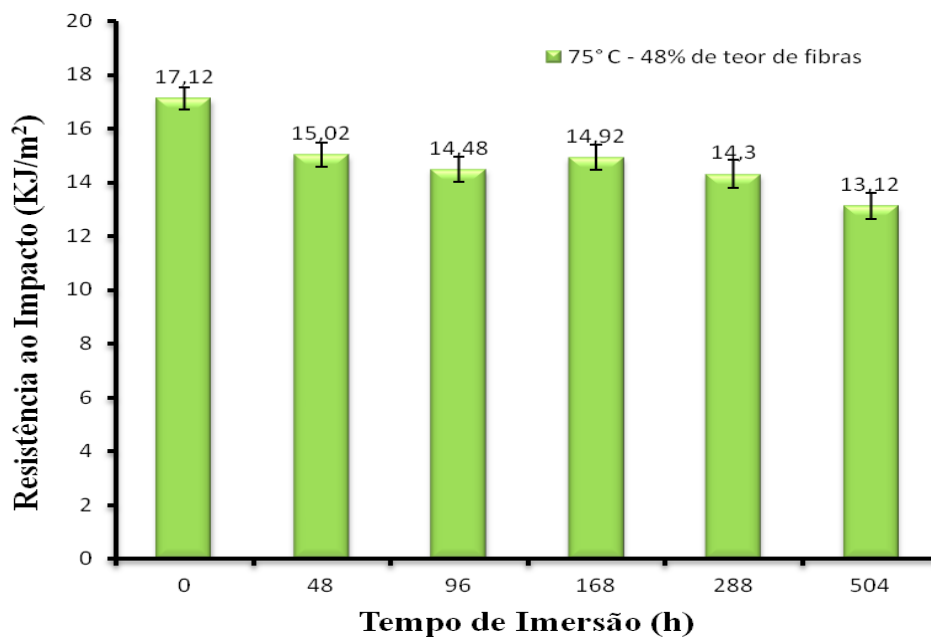


Figura 4.22: Resistência ao impacto dos compósitos com 48% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 75 °C.

4.2.4 Resistência à flexão

Os dados de resistência à flexão de compósitos com 32% de teor de fibra e 48% de teor de fibra de tecido juta/algodão (Figuras 4.23 e 4.24) evidenciam que essa propriedade depende do teor de fibras, tempo e temperatura de imersão. Tal como observado para o módulo de Young, a resistência à flexão diminui com o aumento do tempo e temperatura de imersão em água e esse decréscimo é acentuado nas primeiras 48h de imersão e praticamente não decresce em tempos mais longos. A resistência à flexão dos compósitos com 32% de fibras diminui 29,83% e 47,93% após 48h de imersão em água nas temperaturas de 50 e 75°C, respectivamente e 40,30% e 46,38% após 504h de imersão nessas mesmas temperaturas. Segundo Mazuki et al. (2011), na absorção de água de compósitos de poliéster insaturado com fibras vegetais, as moléculas de água se difundem para a matriz, diminuindo a temperatura de transição vítrea e aumentando a taxa de difusão. Moléculas de água absorvida preenchem as cavidades e fissuras dentro do compósito e atuam como plastificante tornando o compósito com uma estrutura mais flexível (DHAKAL e ZHANG, 2007; VÁSQUEZ, 2012).

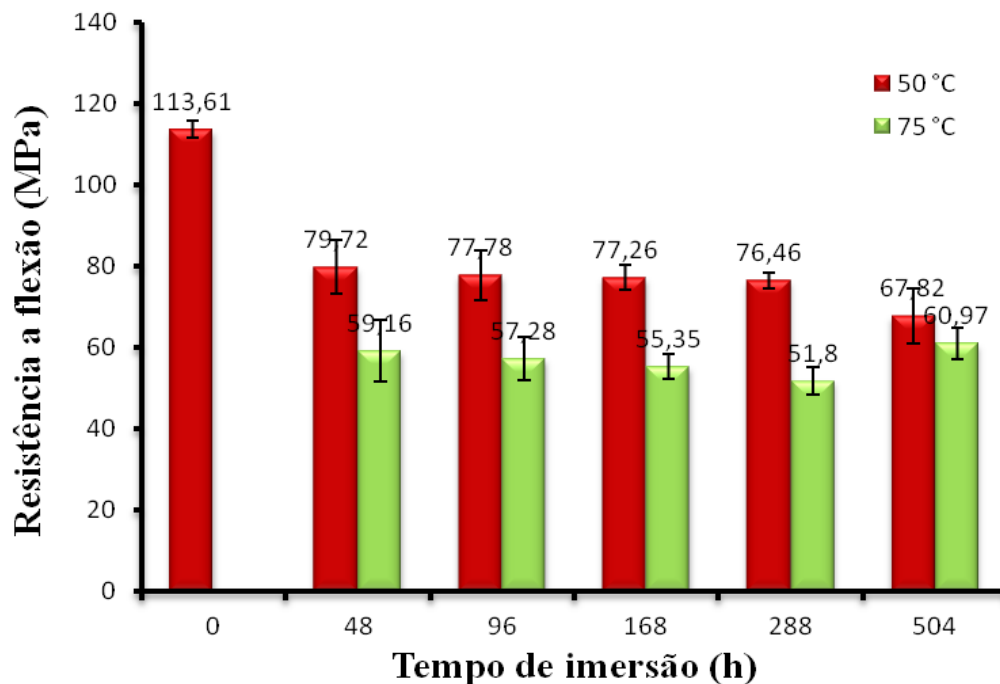


Figura 4.23: Resistência à flexão dos compósitos com 32 % de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 50 e 75° C.

A resistência à flexão dos compósitos com 48% de teor de fibras com tecido juta/algodão (Figura 4.24) à seco e imersos em água nas temperaturas de 50 e 75°C, sofreram reduções de 28,8% e 47,83% após 48h de imersão, e de 48,83% e 55,93% após 504h de imersão em água. Esses dados evidenciam a rápida absorção de água nas primeiras 48h de imersão seguida de uma absorção menor e mais lenta em tempos longos. As propriedades foram mais afetadas nos estágios iniciais da absorção de água porque, nesta etapa, praticamente toda a capacidade de sorção de água dos sistemas é manifestada e a deterioração da interface fibra-matriz praticamente se completa nesse intervalo de tempo. Quando os compósitos são imersos em água, as camadas externas ficam permanentemente expostas à água e, conseqüentemente sofrem maior degradação do que as camadas internas. Assim, acredita-se que o decréscimo apresentado em ambos os gráficos da resistência à flexão deve-se principalmente ao aumento da plasticidade que se inicia na matriz do compósito (resina poliéster) passando para as fibras vegetais (reforço) ao longo do tempo de imersão (DA SILVA et al., 2008). Observa-se que as camadas que apresentam maior dano são as superficiais, as quais são mais suscetíveis a dilatações térmicas influenciando na diminuição da resistência dos compósitos (CAMPOS, 2012).

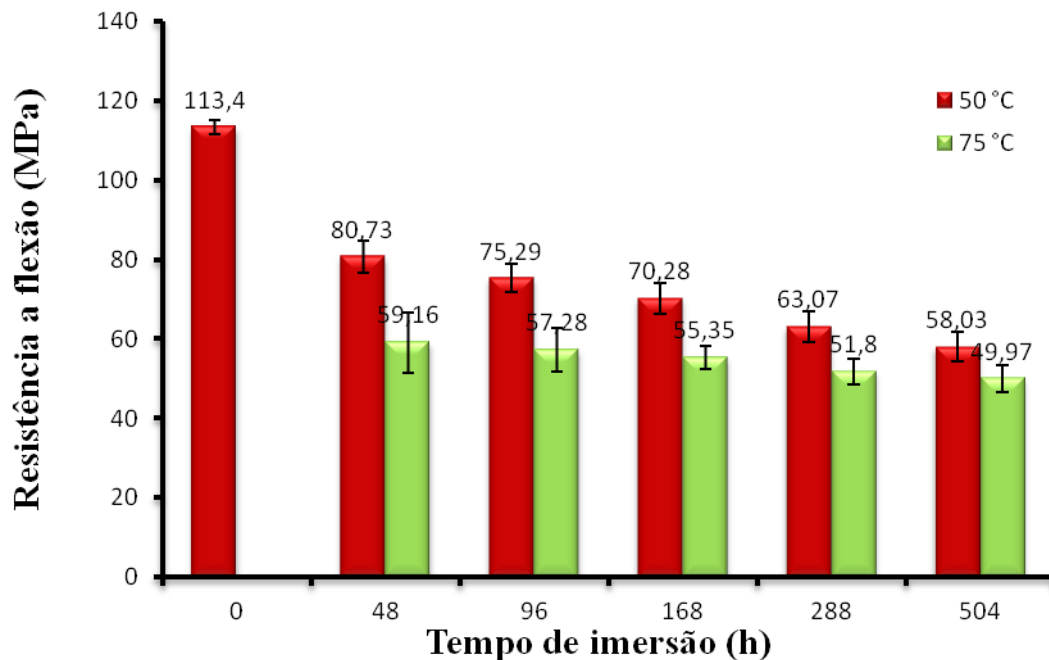


Figura 4.24: Resistência à flexão dos compósitos com 48% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 50 e 75°C.

As Figuras 4.25 e 4.26 mostram o comportamento da resistência à flexão dos compósitos seco e imersos em água na temperatura de 50°C, em função do teor de fibras juta-algodão 32 e 48%. Os resultados dos compósitos, na condição seca evidenciam serem melhores do que na condição imerso em água. Segundo Passos (2005), que estudou a incorporação de fibras vegetais em compósitos na condição seca para obtenção de telhas e chapas, a resistência à flexão aumentou significativamente com o teor de fibras, fato também observado por Ayrilmes et al. (2011), que pesquisou o compósito confeccionado com fibra de coco. O aumento de resistência é interessante nas aplicações dos materiais compósitos em situações nas quais as forças deflexivas são necessárias. Joseph et al. (1999) verificaram que compósitos de matriz poliéster instaurado com fibra vegetal possuindo mais de 30 % em fração volumétrica, a resistência dos compósitos decresce quando imersos em água, sendo essa redução atribuída a absorção de água das fibras pela matriz, de modo que estes tendem a apresentar menor resistência à flexão. Isto é apresentado quando os compósitos estão imersos a 48h e 504 h. Para os compósitos com 32% de fibras, houve uma redução de 29,83% em 48h e 40,30% em 504h, e para os compósitos com 48% de teor de fibras, essas reduções foram de 28,81% e 48,83%, num mesmo tempo de processo.

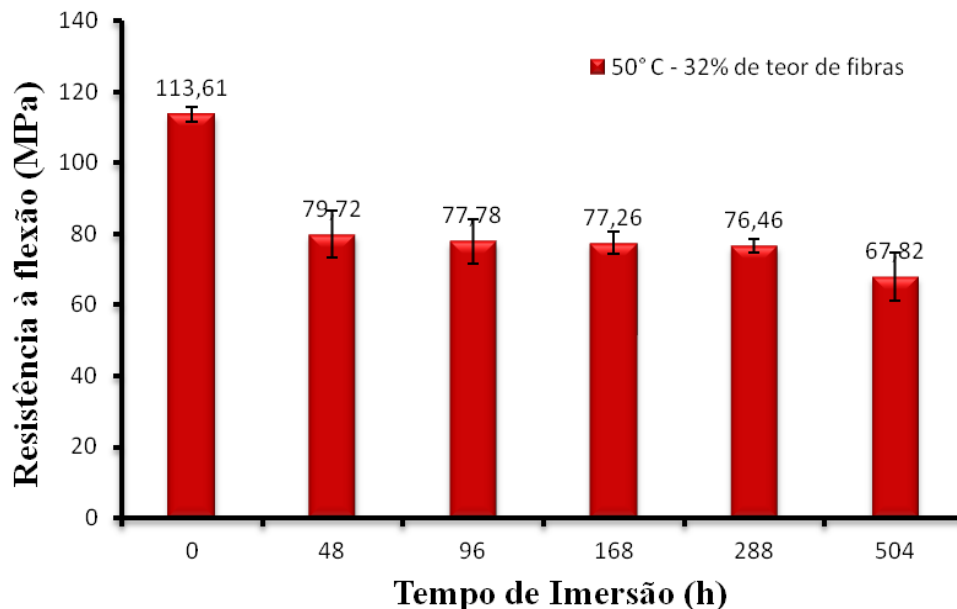


Figura 4.25: Resistência à flexão dos compósitos com 32 % de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 50° C.

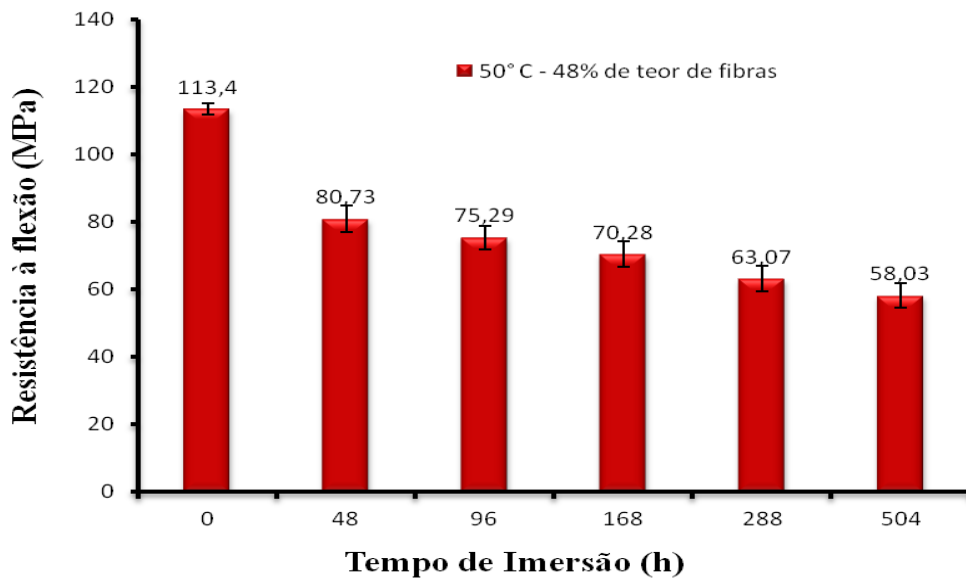


Figura 4.26: Resistência à flexão dos compósitos com 48% de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada na temperatura de 50 °C.

As Figuras 4.27 e 4.28 ilustram o comportamento transiente da resistência à flexão dos compósitos com teores de fibras de 32 e 48%, na temperatura de 75°C. Analisando-se as propriedades mecânicas em flexão nas figuras foi observado um aumento nas propriedades mecânicas para os compósitos na condição seca quando comparado aos imersos em água. Comportamento análogo foi reportado por Silva (2008), em estudos sobre o laminado híbrido /curauá em resina de poliéster. Em ambos os casos, essa propriedade decresceu em teores elevados de fibra. Segundo Esgalhado e Rocha (2002) esta redução na propriedade dos compósitos é atribuída à degradação térmica da matriz e do reforço e, sobretudo, ao empobrecimento da interface fibra/matriz causada pela exposição térmica, levando a uma diminuição da resistência mecânica e tornando os polímeros mais frágeis e quebradiços. Este fato é atribuído ao aumento da porcentagem de água absorvida que pode levar à formação de maior número de microtrincas com o resultado de inchaço de fibras que, por sua vez, enfraquece a região de interface fibra-matriz quando são aplicadas cargas de flexão. Segundo Muñoz e García-Manrique (2015), em estudo realizado em 6 amostras de compósitos reforçados com camadas de linho (em 40% de fração volumétrica) foi observado queda de 25,5% na resistência à flexão, indicando um aumento na propriedade após imersão em água, em comparação com amostras secas. Segundo eles isto ocorre devido ao inchaço das fibras, mencionado anteriormente, onde a água preenchem as lacunas entre as fibras e matriz,

aumentando assim, a ligação entre eles, o que resulta num aumento das propriedades mecânicas.

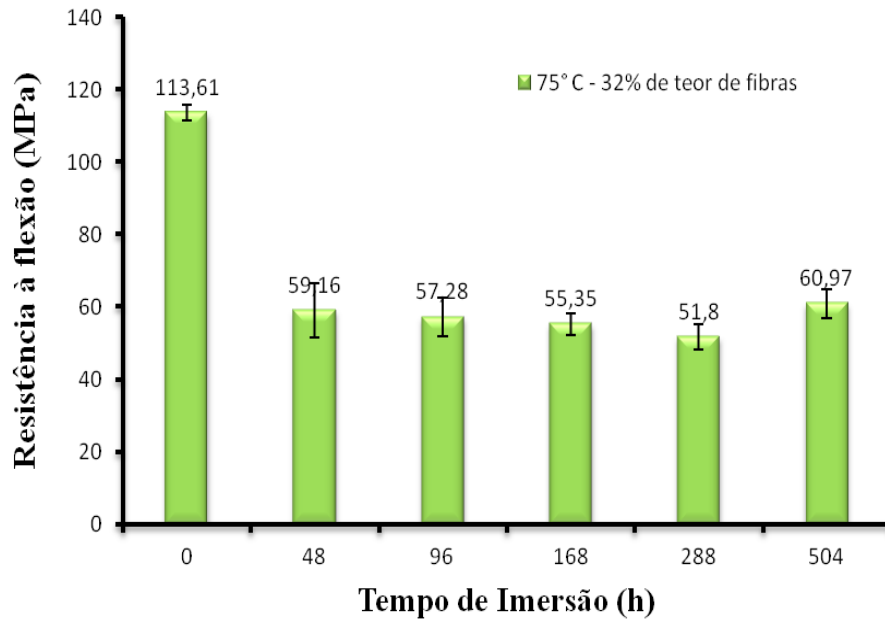


Figura 4.27: Resistência à flexão dos compósitos com 32 % de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 75° C.

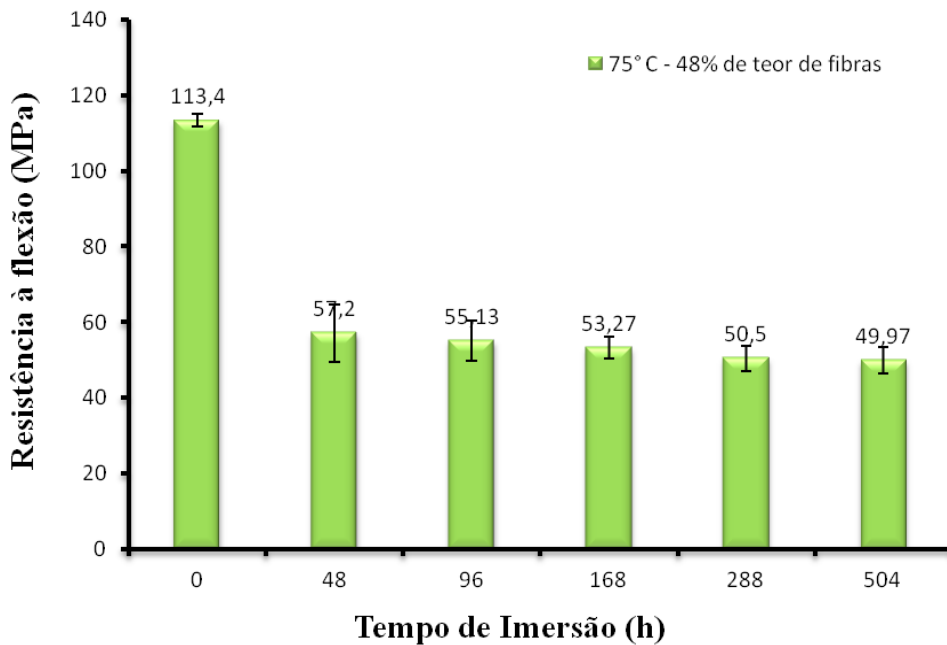


Figura 4.28: Resistência à flexão dos compósitos com 48 % de teor de fibras de tecido juta/algodão imersos em água destilada nas temperaturas de 75° C.

4.3. Caracterização do compósito de tecido juta/algodão por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As análises por microscopia eletrônica de varredura têm por objetivo determinar as características das fibras do tecido juta/algodão quanto à morfologia e ao aspecto superficial, além de avaliar a resina poliéster sobre a superfície das mesmas.

Analizando as imagens do corte a laser na superfície do compósito com tecido juta/algodão, Figura 4.29 (a), observou-se que as fibras de juta/ algodão se mantiveram intactas ao longo da secção de corte do compósito. Já na Figura 4.29 (b), a imagem do corte com arco de serra na superfície causa formação de microfissuras na secção que foi cortado o compósito.

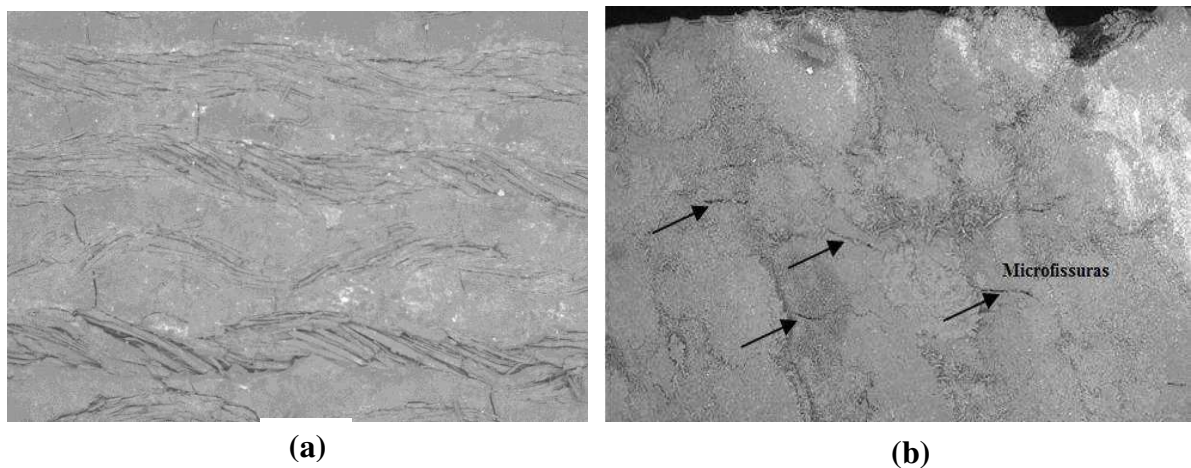


Figura 4.29: Micrografias da seção do corte da superfície das fibras no compósito com tecido juta/algodão (a) corte a laser e (b) corte com arco de serra.

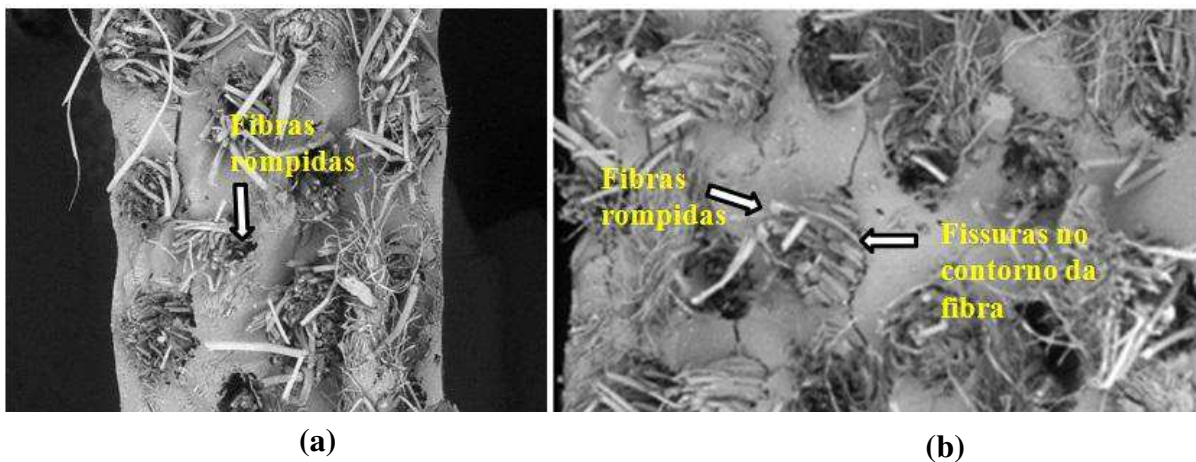


Figura 4.30: Micrografias da seção do corte da superfície da fratura do corpo de prova no compósito com tecido juta/algodão submetido ao ensaio de flexão (a) 32% de teor de fibras e (b) 48% de teor de fibras.

Na Figura 4.30 é apresentado o aspecto da superfície de fratura dos corpos de prova ensaiados em flexão contendo 32 e 48% de teor de fibras com tecido juta/algodão. Pode-se observar nos compósitos com 32% de teor de fibras, de acordo com a Figura 4.30 (a) as fibras do tecido juta/algodão não se partiram de maneira uniforme, algumas das microfibrilas que compõem partes das fibras do tecido se romperam desigual, como consequência, houve desprendimento da fibra (espaços vazios) apenas em alguns feixes da fibra que foram ocasionados durante o ensaio de flexão. E na Figura 4.30 (b) também houve rompimentos e propagação de trinca na direção das fibras. As fissuras se formam entre os fios de algodão e pode-se afirmar que a quebra ocorreu entre as duas fibras.

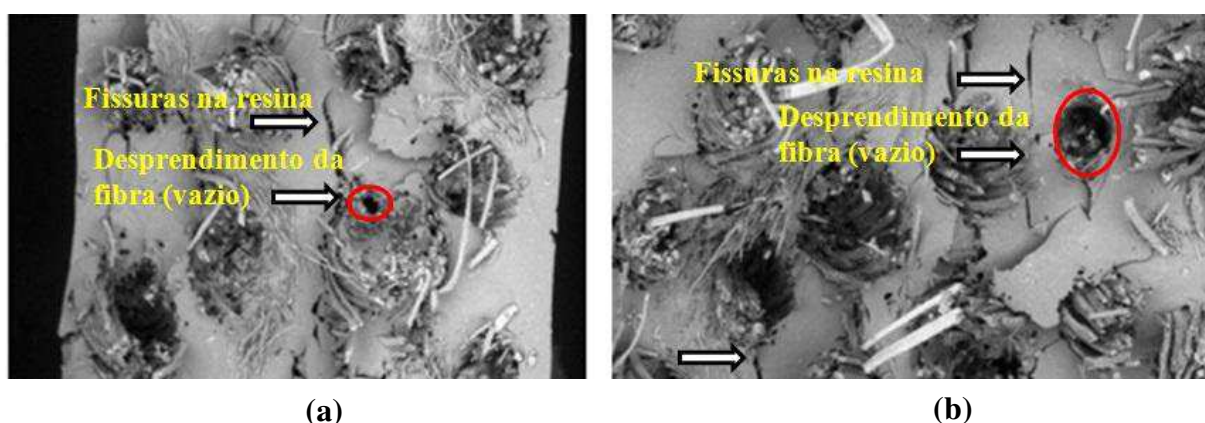


Figura 4.31: Micrografias da seção corte da superfície da fratura do corpo de prova no compósito com tecido juta/algodão submetido ao ensaio de impacto (a) 32% de teor de fibras e (b) 48% de teor de fibras com tecido juta/algodão. Aumento de 300x.

Percebe-se ainda, na Figura 4.31, relativa à ruptura dos corpos de prova ensaiados em impacto Izod que, a orientação de formação de fissuras durante a ruptura, ocorre ao longo da fibra de algodão, ou seja, ortogonalmente as fibras de juta. Portanto, pode-se afirmar que as fibras de algodão orientam a ruptura e a formação de fissuras do corpo de prova.

A formação de trincas durante o ensaio de impacto Izod é produzida através das forças de atrito (fricção) que apresenta uma tensão não-uniforme ao longo da fibra descolada permitindo que ela fracture fora do plano onde ocorre a fratura da matriz, isto é, ocorre o arrancamento das fibras da matriz, esse tipo de falha denomina-se pull-out.

CAPITULO IV

CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1 Conclusão

Neste trabalho, foram moldados compósitos de matriz poliéster insaturado do tipo ortoftálico por RTM, tendo como reforço tecido híbrido composto por fibras de juta/algodão. As propriedades mecânicas em tração, módulo de elasticidade, impacto e flexão, em função do tempo e temperatura de sorção de água, foram avaliadas e comparadas às de compósitos secos, testados unidirecionalmente na direção das fibras de juta. Os teores de reforço nos compósitos foram de 32% e 48% , respectivamente para compósito com 4 e 6 camadas de reforço. As temperaturas do banho de imersão foram de 25, 50 e 75°C. A sorção de água dos compósitos foi determinada em amostras de 20x20mm² e em amostras nas dimensões dos corpos de prova.

Os resultados obtidos indicam que:

- a) As propriedades dos compósitos aumentaram com o teor de fibras e diminuíram com o tempo e temperatura de imersão em água.
- b) As propriedades menos afetadas pela imersão em água a 50 e 75°C por até 504h foram às resistências à tração e ao impacto. A mais afetada foi o módulo de Young que diminuiu bruscamente em até 48h de imersão em água, nas duas temperaturas investigadas. A resistência à flexão também diminuiu rapidamente nas primeiras 48h de imersão, mas não tão intensamente quanto o módulo elástico. O comportamento mecânico dos sistemas foi associado a reduções na adesão fibra-

matriz, descolamento das fibras, criação de tensões internas e plastificação da matriz com a absorção de água.

- c) Compósitos com propriedades adequadas para uma variedade de aplicações em ambientes secos e úmidos foram obtidos. No entanto, sugere-se que estes não sejam utilizados em aplicações de longo prazo onde a umidade relativa do ar seja muito elevada ou onde estes necessitem ser imersos em água.
- d) A cinética de sorção de água mostra-se influenciada pela temperatura, sendo mais acentuada para a temperatura de 75°C.

5.2 Sugestões para trabalhos futuro

Como sugestões para futuras pesquisas, pode-se citar:

- Estudar o processo sorção de água em diferentes camadas de tecido juta/algodão compósitos híbridos reforçados por fibras vegetais;
- Estudar tratamentos superficiais das fibras vegetais em compósitos para diminuir a absorção de umidade.
- Estudar os efeitos de cada tipo de envelhecimento térmico em diferentes temperaturas, variando o número de camadas de tecido juta/algodão.
- Estudar o efeito do tempo de exposição ao envelhecimento higrotérmico em compósitos de tecido juta/algodão.
- Estudar a fadiga térmica de compósitos híbridos em diferentes camadas de tecido juta/algodão reforçados por fibras vegetais pensando na aplicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABMACO, Site Associação Brasileira de Materiais Compósitos. Disponível em: <http://www.abmaco.org.br/>, 15/07/2014.

ADAMS D., CARLSSON L. et al. Experimental Characterization of Advanced Composite Materials 3 ed. CRC Presss, 2003.

AGOPYAN, V. The effect of different mineral additions and synthetic fibre contents on properties of cement based composites. *Cement & Concrete Composites*, v. 28, n. 6, p. 555-563, 2006.

AGOPYAN, V.; SAVASTANO Jr., H. Uso de materiais à base de fibras vegetais na construção civil: experiência brasileira. In: SEMINÁRIO IBEROAMERICANO 1997 DE MATERIAIS FIBRORREFORZADOS, 1. Y REUNION DEL PROYETO PIP VIII. 5 CYTED, 3. Cali, 1997. Memórias. Cali, Cyted/ Universidade Del Valle, 1997. P. 23-40.

AGUIAR NETO, P. P.; PITA, P. Fibras têxteis. Rio de Janeiro: SENAI/CETIQT, v. 1, p. 342,1996.

ALBUQUERQUE, A. C.; KURUVILLA, J.; CARVALHO, L. H., Jose Roberto Morais d'Almeida. Effect of wettability and ageing conditions on the physical and mechanical properties of uniaxially oriented jute-roving-reinforced polyester composites. *Composites Science and Technology*, p. 833-844, 2000.

ALEXANDRE, M. E. O. ; LADCHUMANANADASIVAM, R.; VERÍSSIMO, S. A.; MENEZES, P. L.; BATISTA, J. H.; ARAÚJO, R. C. Fibra da folha do abacaxi (FFA) como reforço para compósito de matriz poliéster. *Anais do II SIENTEX*, Natal, Brasil, 2004.

AL-OQLA, F. M. A., SAPUAN, S. M. Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry. *Journal of Cleaner Production*. vol. 66, p. 347-354,2014.

ALVES, R.T. (2008) Embrapa Cerrados celebra centenário da imigração japonesa. *Cerrados Informa*. Planaltina, v. 9, n. 88, p. 2.

AMICO, S. C. Vegetable fibers as multifunctional materials. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 15, n. 2, p. 355-363, 2010.

AMORIM, W. F. Jr., Processamento de Placa Espessa de Compósito através de Moldagem por Transferência de Resina. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, Universidade Federal do Rio De Janeiro, 2007.

ANCELOTTI JR, A. C. (2006). Efeitos da porosidade na resistência ao cisalhamento e nas propriedades dinâmicas de compósitos de fibra de cana de açúcar. Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil.

ANDREOPOULOS, A.; TARANTILI, P. Water sorption characteristics of epoxy resin-UHMPE fibers composites. *Journal of applied polymer science*, v. 70, n. 4, p. 747-755, 1998.

ANGRIZANI, C. A.; VIEIRA, C. A. B.; ZATTERA, A. J.; FREIRE, E.; SANTANA, R. M. C.; AMICO, S. C. Influência do comprimento da fibra de sisal e do seu tratamento químico nas propriedades de compósitos com poliéster. *CBECIMat*, Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2006.

ANGRIZANI, C.A. (2011). Compósitos laminados híbridos de curauá/vidro: análise mecânica experimental e teórica. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

ASTM (American Society for Testing and Materials) D 3039. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. 2008.

ASTM (American Society for Testing and Materials) D 3030. Standard Test Method for Volatile Matter (Including Water) of Vinyl Chloride Resins. 2011.

ASTM (American Society for Testing and Materials) ASTM D 256. Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. 2010.

ASTM (American Society for Testing and Materials) ASTM D 3822. Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers. 2014.

ASTM (American Society for Testing and Materials) ASTM D 3878. Standard Terminology for Composite Materials. 2015.

ASTM (American Society for Testing and Materials) D 570. Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. 1998.

APICELLA, A.; MIGLIARESI, C.; NICOLAIS, L.; IACCARINO, L.; ROCCO, S.; TEL, L. I. The water ageing of unsaturated polyester-based composites: influence of resin chemical structure. *Composites*, vol. 14, n°4, p.387-392, 1983.

AQUINO, E. M. F.; RODRIGUES, L.P.S.; OLIVEIRA, W.; SILVA, R.V. Moisture effect on degradation of jute/ glass hybrid composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 27, p. 219-233; 2007.

ARAÚJO, M.; CASTRO, E. M. M. *Manual de Engenharia Têxtil*. Fundação Calouste Gulbenkian (Ed.), Lisboa, v. 1, 1984.

ATHIJAYAMANI, A. Effect of moisture absorption on the mechanical properties of randomly oriented natural fibers/polyester hybrid composite. *Materials Science and Engineering A*, v. 517, n. 1 2, p. 344 353, 2009.

AWAJA, F.; ARHATARI, B.; WIESAUER, K.; LEISS E.; STIFTER, D. An investigation of the accelerated thermal degradation of different epoxy resin composites using X-ray microcomputed tomography and optical coherence tomography. *Polymer Degradation and Stability*, vol. 94,p.1814–1824, 2009.

BADÍA, J. D.; VILAPLANA, F. ; KARISSON, S. RIBES-GREUS, A. Thermal analysis as a quality tool for assessing the influence of thermo-mechanical degradation on recycled polyethylene. *Polymer Testing*. V. 28, p. 169-175, 2009.

BIN YU; JINGLEI YANG. Hygrothermal Effects in Composites Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, Current as of 6 March 2017.

BISANDA, E. The effect of alkali treatment on the adhesion characteristics of sisal fibres. Applied Composite Materials, v. 7, n. 5-6, p. 331-339, 2000.

BISMARCK, A., ASKARGORTA, I. A., SPRINGER, J., LAMPKE, T., WIELAGE, B., STAMBOULIS, A. Surface characterization of flax, hemp and cellulose fibres; surface properties and the water uptake behaviour. Polymer Composites. vol. 23, n. 5, p.872–894, 2002.

BOTELHO, E.C.; COSTA, M.L.; PARDINI, L.C.; REZENDE, M.C. Processing and hygrothermal effects on viscoelastic behavior of glass fiber/epoxy composites. Journal of Materials Science, vol.40, p.3615-3623, 2005.

BLASS, A. Processamento de polímeros. Ed. da UFSC, Florianópolis, SC,1985.

BLACKBURN, R.S., Biodegradable and sustainable fibres. 2010: Woodhead Publishing.

BLEDZKI, A. K., GASSAN, J. Natural fiber reinforced plastics. Handbook of Engineering Polymeric Material, p. 787-809, Ed. Cheremisinoff, New York: Marcel Dekker, Inc, 1997.

BOTELHO, E. C.; REZENDE, M. C. Caracterização mecânica de compósitos de poliamida/fibra de carbono via ensaios de cisalhamento interlaminar e de mecânica da fratura. Polímeros, v. 12, n. 3, p. 153-163, 2002.

BOTELHO, E.C.; COSTA, M.L.; PARDINI, L.C.; REZENDE, M.C. Processing and hygrothermal effects on viscoelastic behavior of glass fiber/epoxy composites. Journal of Materials Science, vol.40, p.3615-3623, 2005.

BRINSON, L. C.; GATES, T. S. Effects of Physical Aging on Long Term Creep of Polymers and Polymer Matrix Composites. J. International Journal Solids Structures, vol. 32, p. 827-846, 1995.

BROCKS, T. Compósito estrutural carbono/epóxi via RTM para aplicação aeronáutica: processamento e caracterização. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011.

CADY, W.M. Radar Scanners and Radomes. MIT, 2004. Disponível em: <http://www.archive.org/details/radarscannersand033384mbp>. Acesso em 15 de Abril 2016.

CALLISTER JR, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução, 7^a ed. Rio de Janeiro, LTC, 2008.

CAMPOS, A. Estudo dos Efeitos Ambientais no Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos, 63 páginas, Dissertação de Mestrado, UBI (Universidade da Beira Interior), Covilhã, Portugal, 2012.

CÂNDIDO, G. M. – Influência do condicionamento ambiental na resistência a delaminação de borda livre em compósitos avançados”. Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos (2001).

CANEVAROLO JR., S. V. Ciência dos polímeros : Um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2^a ed. São Paulo: Artlieber, 2006.

CARASCHI, J. C.; LEÃO, A. L. Compósitos de poliéster reforçado com capim-elefante. In: Congresso Brasileiro de Polímeros, 6, 2001, Gramado, RS. Anais do 6o Congresso Brasileiro de Polímeros, Gramado, RS: Abpol, 2001.

CARVALHO, W.; BRETAS, R. Correlação morfológica/propriedades dinâmicas e mecânicas de compósitos de termoplásticos com fibras de carbono. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência de Materiais, Campinas, SP, 1988.

CARVALHO, L. H; JOSEPH, K.; NÓBREGA, M. M. S. Reforços híbridos em compósitos poliéster/fibras vegetais. In: SIMPOSIO ARGENTINO DE POLÍMEROS, Anais. Córdoba, Argentina, p. 67-71, 1999.

CARVALHO L. P.; SANTOS, W. J. Respostas correlacionadas do algodoeiro com a seleção para a coloração da fibra. Brasília. Pesq. Agropec. Bras. 2003.

CARVALHO, R. Compósitos de fibras de sisal para uso em reforço de estruturas de madeira. Tese de D. Sc., USP, São Carlos, SP, Brasil, 2005.

CAVALCANTI, W. S.; ALSINA, O. L. S.; CARVALHO, L. H. Influência de modificações do reforço na cinética de sorção de água em compósitos poliéster/juta. In. CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS. 6. 2001, Gramado. Anais. Rio Grande do Sul, p.628-631.2001.

CAVALCANTI, W. S. Compósitos Poliéster/tecidos tramados vegetal-vidro: caracterização mecânica e simulação da sorção de água. 122f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande. Paraíba. 2006.

CAVALCANTI, W. S.; DE LIMA, A. G.; CARVALHO, L. H. D. Water sorption in unsaturated polyester composites reinforced with jute and jute/glass fiber fabrics: modeling, simulation and experimentation. *Polímeros*, v. 20, n. 1, p. 78-83, 2010.

CHAND, N.; JAIN, D. Effect of sisal fibre orientation on electrical properties of sisal fibre reinforced epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 36, n. 5, p. 594-602, 2005.

CHEREMISINOFF, N. P., *Advanced polymer processing operations*. Noyes Publications. New Jersey. USA, 1998.

CHOW, C. P. L., XING, X. S., LI, R. K. Y. Moisture absorption studies of sisal fibre reinforced polypropylene composites. *Composites Science and Technology*. vol. 67, n. 2, p. 306–313, 2007.

CORREIA, A. Z. *Métodos e Processos para Fabricação de Materiais Compostos*. EMBRAER, 56 p., São Paulo, 2008.

COUTINHO, F. M. B.; COSTA, T. H. S. Performance of polypropylene–wood fiber composites. *Polymer Testing*, v. 18, n. 8, p. 581-587, 1999.

COUTTS, R. S. P. *Form forest to factory to fabrication*. International symposium on fibre reinforced cement and concret, London: E&FN Spon., 1992.

CUNHA, J.A.P.; COSTA, M.L.; REZENDE, M.C. Influência de diferentes condições higrotérmicas na resistência à tração de compósitos de fibra de carbono/epóxi modificada. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 16, nº 3, p. 193- 201, 2006.

DAS, S.; SAHA, A.K.; CHOUDHURY, P.H.; BASAK, R.K.; MITRA, B.C.; TODD, T.; LANG, S.; ROWELL, R.M.; Effect of steam pretreatment of jute fiber on dimensional stability of jute composite. *J.Appl.Polym.Sci*, 2000.

DA SILVA, R.V.; AQUINO, E.M.F.; RODRIGUES, L.P.S.; BARROS, A.R.F.; Desenvolvimento de um compósito laminado híbrido com fibras natural e sintética. *Revista Matéria*, v. 13, n. 1, p. 154-161, 2008.

DE PAOLI, M. A.; *Degradação e Estabilização de Polímeros*, Artliber, São Paulo, 2009.

D'ALMEIDA, A. L. F. S., CARVALHO, L. H., D'ALMEIDA, J. R. M. Characterization of caroá (*Neoglazioviavariegata*) fibers. *World Polymer Congress – 41st International Symposium on Macromolecules*. Anais. Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

D'ARSIE, D. *Los plásticos reforzados come fibras naturales*. 2 ed. Editoriale Americale: Buenos Aires. 1986.

DANIEL, I. M.; ISHAI, O. *Engineering Mechanics of Composite Materials*, Oxford University Press, New York, 1994.

DHAKAL HN, ZHANG ZY, RICHARDSON MOW. Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites. *Compos Sci Technol*, 2007.

DE AMORIM JÚNIOR, W. F. Processamento de placa espessa de compósito através de moldagem por transferência de resina. *Revista Matéria*, v. 11, n. 3, p. 316-323, 2006.

DODIUK, H.; GOODMAN, S. H. *Handbook of thermoset plastics*. William Andrew, 2013. ISBN 1455731099.

ELZUBAIR, A.; SUAREZ, J.C.M. Mechanical behavior of recycled polyethylene/piassava fiber composites. *Materials Science & Engineering A*, v. 557, p. 29–35, 2012.

ENGLISH, B.; CLEMEONS, C.M.; STRAK, N.; SCHNEIDER, J.P. *Waste-Wood-Derived Fillers for Plastics*. USDA Forest Service Forest Products Laboratory General Technical Report. FPL-GTR 91, 1996, 15p.

ESPERT, A.; VILAPLANA, F.; KARLSSON, S. Comparison of water absorption in natural cellulosic fibres from wood and one-year crops in polypropylene composites and its influence on their mechanical properties. *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, v. 35, n. 11, p. 1267-1276, 2004.

FANN, D. M.; HUANG, S. K.; LEE, J. Y. DSC studies on the cryatallization characteristics of poly (ethylene terephthalate) for blow molding applications. *Polymer Engineering and Science*. V. 38, p. 265-273, 1998.

FARIAS, C. S. P.; O cultivo e a produção de têxteis do algodão colorido em alguns espaços derivados do continente americano: de atividade complementar às tentativas de erradicação. *Revista Geografia. Recife. UFPE*. v. 25, n. 3, 2010.

FARUK, O., BLEDZKI, A. K., FINK, H. P., SAIN, M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science*. vol. 37, n. 11, p. 1552-1596, 2012.

FAULSTICH DE PAIVA, J. M.; FROLLINI, E. Unmodified and modified surface sisal fibers as reinforcement of phenolic and lignophenolic matrices composites: thermal analyses of fibers and composites. *Macromolecular Materials and Engineering*, v. 291, n. 4, p. 405-417, 2006.

FELIPE, R.C.T.S. Envelhecimento ambiental acelerado em prf a base de tecidos híbridos kevlar/vidro: propriedades e instabilidade estrutural, 189 páginas. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte – RN, 2012.

FONSECA, V. M. Estudo comparativo das propriedades/sisal quimicamente tratado. 1998. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

FONTELES, C. A. L. Compósitos poliméricos à base de matriz termofixa e coco babaçu (*Orbignya phalerata*): análise por sorção de água e propriedades mecânicas. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2013.

FRANCK, R.R. and T. Institute, Bast And Ohter Plant Fibres. 2005: Woodhead.

GARAY, A. C. Efeito da adição de carbonato de cálcio em compósitos poliméricos moldados por RTM e RTM light. Dissertação (Mestrado). Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Matérias, Universidade Federal do Rio Grande do Sul-RS, 2010.

GEORGE, J., THOMAS, S. Short Fiber Reinforce Plastic Composites. In: N. P. Cheremisinoff, Handbook of Engineering Polymeric Materials. New York: MarcelDekker, 1997.

GIOVEDI, C., MARINUCCI, G., ROUSE, P.R., CLÁUDIO, A.L.L. Determinação das Frações Volumétricas de Compósito de Fibra de Carbono e Matriz Epóxi por Diferentes Metodologias. XVI Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Porto Alegre, 2004.

GOODMAN, S. H. Handbook of Thermoset Plastics. Noyes Publications. (2nd. Ed.) Noyes Publications. New Jersey, USA,1998.

GORDON, J.; JERONIMIDIS, G.; RICHARDSON, M. Composites with high work of fracture [and discussion]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, v. 294, n. 1411, p. 545-550, 1980.

GUIMARÃES Suely. Utilização de Fibras Vegetais no Fibro-Cimento e no Concreto-Fibra. Centro de Pesquisas e Desenvolvimento - CEPED, 1982.

GREVE, L.; PICKETT, A. Delamination testing and modelling for composite crash simulation. Composites science and technology, v. 66, n. 6, p. 816-826, 2006.

HAN, K. K.; LEE, C. W.; RICE, B. P. Measurements of the permeability of fiber preforms and applications. Composites science and Technology, v. 60, n. 12, p. 2435-2441, 2000.

HODZIC, A., SHANKS, R. Natural Fibers Composites Materials, processes and properties, Woodhead Publishing, Philadelphia, USA, 401p., 2014.

HOMMA, A. K.O. Amazônia: como aproveitar os benefícios da destruição? Estudos Avançados, São Paulo, v. 54, n. 19, p. 115-135, 2005.

HULL, D.; CLYNE, T. An Introduction to Composite Materials. Ed. Cambridge University Press, Cambridge, 246 p., 1988.

ISHIZAKI, M. H. Caracterização mecânica e morfológica de compósitos de polipropileno e fibras de coco verde: influência do teor de fibra e das condições de mistura. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 16, n. 3, p. 182-186, 2006.

ITTNER, C. A.; FELISBERTI, M. I. CINÉTICA DE CURA DE COMPÓSITOS À BASE DE RESINA ÉSTER VINÍLICA E SÍLICA FUNCIONALIZADA. *Anais do 14 CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS*, São Pedro – SP, 2000.

JOSEPH, K.; VARGHESE, S.; KALAPRASAD, G.; THOMAS, S.; PRASANNAKUMARI, L.; KOSHYH, P.; PAVITHRAN, C. Influence of Interfacial Adhesion on The Mechanical Properties and Fracture Behaviour of Short Sisal Fibre Reinforced Polymer Composites. *European Polymer Journal*. 1996.

KALIA, S., KAITH, B.S., KAUR, I. Cellulose fibers: bio- and nano-polymer composites green chemistry and technology. Ed. Springer Science & Business Media, 737 págs., 2011.

KIRAN, C. U. Tensile properties of sun hemp, banana and sisal fiber reinforced polyester composites. *Journal of reinforced plastics and composites*, v. 26, n. 10, p. 1043-1050, 2007.

KOZLOWSKI, R.; MIELENIK, B.; PRZEPIERA, A. Plant Residues as Raw Materials for Particleboards. *Institute of Natural Fibers*, Pozna, Poland. April 12-14, 1993.

LI, X.; TABIL, L. G.; PANIGRAHI, S. Chemical of Treatments of Natural Fiber For use in Natural Fiber Reinforced Composites: A Review. *Journal of Polymers and the Environment*, v.15, n.1, p.25-33, 2007.

LIMA Jr., U. M. Fibras da Semente do Açaizeiro (*Euterpe Oleracea* Mart.): Avaliação quanto ao uso como reforço de Compósitos fibrocimentícios. *Dissertação (Mestrado)*. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande Do Sul. Programa de pós-Graduação em engenharia e tecnologia de materiais. Porto Alegre, RS, 2007.

LIMA, A.C.; Caracterização e propriedades de compósitos de tecido de juta reforçando matriz de poliéster reciclado. *Tese de doutorado*. UENF - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ, 2009.

LUO, Y. VERPOEST, K. HOES, M. VANHEULE, H. SOL, A. Cardon. Permeability measurement of textile reinforcement with several test fluids. *Composites Part A: Applied Science na Manufacturing*, Vol. 32, n. 10, p.497-1504, 2001.

MARCOVICH, N.; REBOREDO, M.; ARANGUREN, M. Moisture diffusion in polyester-woodflour composites. *Polymer*, v. 40, n. 26, p. 7313-7320,1999.

MARINELLI, A. L. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade amazônica. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 18, n. 2, p. 92-99, 2008.

MARINUCCI, G. *Materiais compósitos poliméricos: fundamentos e tecnologia*. Artliber Editora. São Paulo, 2011.

MARTIN, A. R. Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade Agave sisalana. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 19, n. 1, p. 40-46, 2009.

MARTIN, R. *Ageing of composites*. 1ª ed. USA: CRC Press, 2008.

MATTEWS, F. L.; RAWLINGS, R. D. *Composite materials: engineering and science*, Great Britain: Chapman & Hall, 470 p, 1994.

MATTOSO, L.; FRAGALLE, E. Uso de fibras vegetais na indústria automobilística: necessidade ecológica, oportunidade para o Brasil. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 4, n. 1, p. 9-1, 1996.

MAZUKI, A.; AKIL H.; SAFIEE, S.; ISHAK; Z. Degradation of dynamic mechanical properties of pultruded kenaf fiber reinforced composites after immersion in various solutions. *Ed. Compos Eng*, 2011.

MEJRI, M.; TOUBAL, L.; CUILLIÈRE, J.C.; FRANÇOIS, V. Hygrothermal aging effects on mechanical and fatigue behaviors of a short natural-fiber-reinforced composite. *International Journal of Fatigue*, v. 108, p. 96–108, 2018.

MELLO, N. C., FERREIRA, F. C., CURVELLO, A. A. S., COLNAGO, L. A. & MATTOSO, L. H. C. Estudos e caracterização de sisal “in natura” e sisal benzilado por RMN CPMAS de ¹³C, in: *Anais do 3º Congresso Brasileiro de Polímeros*, p.1349, 1995.

MENEZES, A.; GOMES, M.G.; FLORES-COLEN, I. In-situ assessment of physical performance and degradation analysis of rendering walls. *Construction and Building Materials*, vol. 75, p. 283–292, 2015.

MEYER, J. A., *Wood Polymer Materials: State of the Art*. Wood Science, Madison. p. 49-54, 1981.

MIRACLE, D.B.; DONALDSON, S.L. *ASM Handbook – Volume 21 Composites*. 1ª ed. USA: ASM International, 2001.

MISHRA, S.; MOHANTY, A. K.; DRZAL, L. T.; MISRA, M.; PARIJA, S.; NAYAK, S. K.; TRIPATHY, S. S., *Comp. Sci. and Technol.*, p.1, 2003.

MITCHELL, B. S. *An introduction to materials engineering and science for chemical and materials engineers*. John Wiley & Sons, 2004.

MITRA, B. C., BASAK, R. K., SARKAR, M. Studies on Jute-reinforced composites, its limitations, and some solutions through Chemical modifications of fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 67, n.6, p. 1093-1100, 1998.

MOE, M. T., LIAO, K., Durability of bamboo-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites, *Composite Science and Technology*, v. 63, pp. 375-387, 2003.

MONTEIRO, S.N.; TERRONES, L.A.H.; CARVALHO, E.A.; D'ALMEIDA, J.R.M. Efeito de interface fibra/matriz sobre a resistência de compósitos poliméricos reforçados com fibras de coco, *Rev. Mater.*, v. 11, n.4, p. 395-402, 2007.

MORAES, G. S., ALSINA, O. L. S., CARVALHO, L. H. Efeito da sorção de água nas propriedades mecânicas de compósitos poliéster/ fibras vegetais. 7º Congresso Brasileiro de Polímeros, Anais, 9-13 Novembro, Belo Horizonte - MG, Brasil, 2004.

MORASSI, J. Fibras naturais: aspectos gerais e aplicação na indústria automobilística. Mercedes Benz do Brasil, p. 1259-1262, 1994.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M., Studies on jute composites - A Literature Review, *Polymer Plastic Technology Engineering*. v. 34, n. 5, p.729-792, 1995.

- MOHANTY, A.K., M. MISRA, and L.T. Drzal, Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites. 2005: Taylor & Francis.
- MORREN, G.; BOSSUYT, S.; SOL, H. 2D permeability tensor identification of fibrous reinforcements for RTM using an inverse method. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, v. 39, n. 9, p. 1530-1536, 2008.
- MOUZAKIS, D.E.; ZOGA, H.; GALIOTIS, C. Accelerated environmental ageing study of polyester/glass fiber reinforced composites (GFRPCs). Composites Part B Engineering, vol. 39, n°3, p. 467-475, 2008.
- MUÑOZ, E.; GARCÍA-MANRIQUE, J.A. Water Absorption Behaviour and Its Effect on the Mechanical Properties of Flax Fibre Reinforced Bioepoxy Composites. International Journal of Polymer Science, 2015.
- MÜSSIG, J. and C. STEVENS, Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications. 2010: Wiley.
- NAIR, M. K. C., THOMAS, S. Effect of ageing on the mechanical properties of short sisal fibre reinforced polystyrene composites. Journal of Thermoplastic Composite Materials. vol. 16, n. 3, p. 249-271, 2003.
- NAIT-ALI, L.; COLIN, X.; BERGERET, A. Kinetic analysis and modelling of PET macromolecular changes during its mechanical recycling by extrusion. Polymer Degradation and Stability. V. 96, p. 236-246, 2011.
- NASCIMENTO, R. L. E. D. Produção e caracterização de compósitos inteligentes. Dissertação de Mestrado, Engenharia de Materiais, Lisboa, Portugal, 2009.
- NAVARRO, R.F. Aspectos da Degradação de Polímeros. 2ª ed. Paraíba: Editora da Universidade Federal de Campina Grande, 2009.
- NETO, J. R. A., CARVALHO, L. H., ARAÚJO, E. M. Influência da Adição de uma Carga Nanoparticulada no Desempenho de Compósitos Poliuretano/Fibra de Juta, Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 17, n° 1, p. 10-15, 2007.

NÓBREGA, M. M.S.; FONSECA, V. M.; CARVALHO, L. H. Uso de Fibras de Caroá e Macambira em Compósitos de Matriz Poliéster. 8º Congresso Brasileiro de Polímeros, Anais. Águas de Lindóia, São Paulo, p.1231-1232, 2005.

NOBREGA, M. M. S. Compósitos de matriz poliéster com fibras de caroá neoglaziovia variegata: caracterização mecânica e sorção de água. Tese de Doutorado. Doutorado em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande, PB, Brasil, 2007.

OLIVEIRA, B. F.; Um modelo analítico e computacional para consideração de efeitos de envelhecimento em estruturas de material compósito. Tese de doutorado. UFRGS, Porto Alegre, RS, 2004.

OLIVEIRA, W. Comportamento mecânico e características da fratura em compósitos híbridos. Natal, 124p, 2005.

PACI, M.; LA MANTIA, F. P. Influence of small amounts of polyvinylchloride on the recycling of polyethyleneterephthalate, *Polymer Degradation and Stability*. v. 63, p. 11-14, 1999.

PAILLOUS, A.; PAILLER, C. Degradation of multiply polymer-matrix composites induced by space environment. *Composites*, vol.25, n°4, p.287-295,1994.

PAIVA, J. M. F.; FROLLINI, E. Unmodified and Modified Surface Sisal Fibers as Reinforcement of Phenolic and Lignophenolic Matrices Composites: Thermal Analyses of Fibers and Composites. *Macromolecular Materials Engineering*. 1999.

PANZERA, T. Estudo do comportamento mecânico de um compósito particulado de matriz polimérica. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG, 2003.

PAUL, A.; JOSEPH, K.; THOMAS, S. Effect of surface treatments on the electrical properties of low-density polyethylene composites reinforced with short sisal fibers. *Composites Science and Technology*, v. 57, n. 1, p. 67-79, 1997.

PEREIRA, G. Introdução à tecnologia têxtil. Apostila do curso têxtil em malharia e confecção, módulo II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, Unidade de ensino Aranguá, 2010.

PEREIRA, J. C. Curso de projeto estrutural com materiais compostos. Departamento de Engenharia Mecânica, 2002.

PITA, P. - “Fibras têxteis”, SENAI - CETIQT, Rio de Janeiro (1996).

POTHAN, L. A.; THOMAS, S. Effect of hybridization and chemical modification on the water-absorption behavior of banana fiber–reinforced polyester composites. *Journal of applied polymer science*, v. 91, n. 6, p. 3856-3865, 2004.

POTTER, K. The early history of the resin transfer moulding process for aerospace applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 30, n. 5, p. 619-621, 1999.

PRACELLA, M. Functionalization, compatibilization and properties of polypropylene composites with Hemp fibres. *Composites Science and Technology*, v. 66, n. 13, p. 2218-2230, 2006.

RANA, A. K; MANDAL, A.; MITRA, B.C.; JACOBSON, R.; BANERJEE, A. N. Short jute-reinforced polypropylene composites: effect of compatibilizer. *Journal of Applied Polymer Science*, v.6, n.2, p.329-338, 1998.

RAO, R. M. V. G. K.; BALASUBRAMANIAN, N.; CHANDA, M., Moisture absorption phenomenon in permeable fiber polymer composites. *Journal Applied Polymer Science*, v. 26, n. 12, p.4069-4079, 1981.

RAY, B.C. Temperature effect during humid ageing on interfaces of glass and carbon fibers reinforced epoxy composites. *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 298, nº1, p.111-117, 2006.

RAY, B.C.; RATHORE, D. Durability and integrity studies of environmentally conditioned interfaces in fibrous polymeric composites: Critical concepts and comments. *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 209, p. 68–83, 2014.

REZENDE, M. C. Caracterização Mecânica de Compósitos de Poliamida/Fibra de Carbono via Ensaio de Cisalhamento Interlaminar e de Mecânica da Fratura. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 12, n. 3, 2002.

RIEGEL, I.C.; FREITAS, L.L.; SAMIOS, D. Envelhecimento físico de sistemas DGEBA/DDM investigado por análise térmica (DSC/DMA). *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, Jul/Set. 1999.

RODRIGUES, L.P.S. Efeitos do envelhecimento ambiental acelerado em compósitos poliméricos. 127 páginas. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte – RN, 2007.

ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A. S.; DE PAOLI, M. PET: uma revisão sobre processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 19, n. 2, p. 121-132, 2009.

RONG, M. Z. ZHANG, M. Q.; LIU, Y.; YANG, G. C.; ZENG, M. H. The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. *Composites Science and Technology*. 2001.

ROWELL, R. M. Utilization of Agriculture-based Fiber for Composites. Ed. *Plastics, rubber, and paper recycling: a pragmatic approach*. National Meeting Chemical Society, 1994.

RUSSELL H. J. Environmental Effects on Engineered Materials. Ed. Marcel Dekker, Nova York, 2001.

SANTOS, A. C. L., MIRANDA, C. S., CARVALHO, G. G. P., CARVALHO, R. F., FIUZA, R. P., JOSE, N. M. Efeito dos tratamentos superficiais na fibra de bananeira proveniente do estado da bahia. 20º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Novembro de 2012, Joinville - SC – Brasil.

SANTOS, D.G., Estudo termo-hídrico e caracterização mecânica de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra vegetal: simulação 3D e experimentação. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciência e Tecnologia, 2017.

SATYANARAYANA, K. G. Lectures on materials science of natural fibers and their composites. Regional Research Laboratory (RRL-CSIR), Trivandrum 695.019 – Kerala, India. Curso de extensão universitária, Pró-reitoria de Extensão, UFRN, Brasil, 2000.

SEENA, Y. A., Comparison of the mechanical properties of phenol formaldehyde composites reinforced with banana fibres and glass fibres. *Composite Science and Technology*, v. 62, pp.1857-1868, 2002.

SENSARZADEH, M. A.; AMIRI, D. Binder for jute-reinforced unsaturated polyester resin, *Polymer Engineering & Science*, v. 25, n. 10, p. 618-619, Jul. 1985.

SCIDA, D. ;ASSARAR, M; POILÂNE, C. Influence of hygrothermal ageing on the damage mechanisms of flx-fibre reinforced epoxy composite, *Composites: Part B*, p. 51 -58, 2013.

SCOPEL, F.; MILANEZ, D. H.; FARIA, L. I. L.; GREGOLIN, J. A. R. Prospecção tecnológica sobre fibras naturais em materiais compósitos a partir da análise de documentos de patente. In 67º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia, P. 3309-3321, 2012.

SHAH, A. N.; LAKKAD, S. C. 1981. MECHANICAL PROPERTIES OF JUTE REINFORCED PLASTICS. In O'DELL, J. L. Natural fibers in resin transfer molded composites. The Fourth International Conference on Woodfiber-Plastic Composites, Forest Products Society, p. 280-285, 1997.

SHIINO, M.Y. Desenvolvimento e caracterização de compósitos processados por RTM para aplicação aeroespacial. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP, 2011.

SILVA, R. V., Compósito de Resina Poliuretano Derivada de Óleo de Mamona e Fibras Vegetais, Tese de D. Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SILVA, O. D.; BELTRÃO, N. E. O agronegócio do sisal no Brasil. Embrapa, Brasília, 1999.

SILVA, O. R. R. F. D.; CARVALHO, O. S. Beneficiamento. In: BELTRÃO, N. D. M. (Ed.). O agronegócio do algodão no Brasil: Embrapa Comunicacao para Transferencia de Tecnologia, 1999.

SILVA, C. G. Fibras celulósicas têxteis em compósitos de matriz fenólica. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

SILVA, F. A.; CHAWLA, N.; FILHO, R. D. T. Tensile behavior of high performance natural (Sisal) fibers. *Composites Science and Technology*, Vol. 68, p. 3438–3443, 2008.

SILVA, Leandro José da. Estudo experimental e numérico das propriedades mecânicas de compósitos poliméricos laminados com fibras vegetais. São João Del Rei, MG, 2011.

SILVA, R. V.; RUPP, N. H. S.; AMARAL, M. C.; VOLTZ, H.; ITMAN, A. Efeito da absorção d'água na degradação de compósitos híbridos com fibras naturais. 70º Congresso Anual da ABM, Anais. Rio de Janeiro, RJ, p.651-659, 2015.

SHAH, A.A.; HASAN, F.; HAMEED, A.; AHMED, S. Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnology Advances*, vol. 26, p. 246 – 265 (2008).

SREEKALA, M. S.; KUMARAN, M. G.; THOMAS, S. Water sorption in oil palm fiber reinforced phenol formaldehyde composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 33, p. 763-777, 2002.

STEENKAMER, D. A. The influence of preform design and manufacturing issues on the processing and performance of resin transfer molded composites. University of Delaware, 1994.

SURATHI, P.; KARBHARI, V.M. Hygrothermal effects on durability and moisture kinetics of fiber-reinforced polymer composites, 294 pages. Interim Report. Department of Structural Engineering, University of California, 2006.

TEÓFILO, E.T.; SILVA, E.S.; SILVA, S.M.L.; RABELLO, M.S. Falha por stress cracking em híbridos PET/argila. *Polímeros*, vol. 24, nº 6, p. 694-702(2014).

THWE, M.M.; LIAO, K. Effects of environmental aging on the mechanical properties of bamboo-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v.33, p.43-52, 2002.

TITA, V. Análise dinâmica teórica e experimental de vigas fabricadas a partir de materiais compósitos poliméricos reforçados. 155p. Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Paulo, SP. 1999.

TOWO, A. N.; ANSELL, M. P. Fatigue evaluation and dynamic mechanical thermal analysis of sisal fibre–thermosetting resin composites. *Composites Science and Technology*, v. 68, n. 3, p. 925-932, 2008.

TRAN, L.Q.N.; FLUENTES, C.A.; GILLAIN, C.D.; VUURE, A.W.V.; VERPOEST, I. Understanding the interfacial compatibility and adhesion of natural coir fibre thermoplastic composites. *Composites Science and Technology*, v.80, n. 1-108, p. 23–30, 2013.

VÄISÄNEN, T.; HAAPALA, A.; LAPPALAINEN, R.; TOMPPU, L. Utilization of agricultural and forest industry waste and residues in natural fiber-polymer composites: A review. *Waste Management*, v.54, p. 62–73, 2016.

VARELA, P.H.A. Obtenção, caracterização e aplicabilidade de um compósito com matriz de resina ortoftálica e reforço de tecidos de juta (*Corchorus Capsularis*) hibridizado com fibra de vidro. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFRN, 2017.

VÁSQUEZ, A.; HOYOS, C.G. Flexural properties loss of unidirectional epoxy/fique composites immersed in water and alkaline medium for construction application. Elsevier, 2012.

VENTURA, A. M. F. Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, v. 21, n. 3-4, p. 10-19, 2009.

VILAR, Z. T. Comportamento Eletro-Termomecânico de um Compósito Ativo de CFRP com Fios Ni-Ti Embebidos. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós- Graduação em Ciência e engenharia de Materiais, UFCG, 2009.

VIVAS, V. Influência da degradação ambiental no comportamento mecânico e balístico de compósitos produzidos com fibra de polietileno de ultra alto peso molecular. 216 páginas. Dissertação (Mestrado) - Instituto Militar de Engenharia – RJ, 2013.

WOLFRUM, J.; EIBL, S.; LIETCH, L. Rapid evaluation of long-term thermal degradation of carbon fibre epoxy composites. *Composites Science and Technology*, vol. 69, n°3/4, p.523-530, 2009.

WOLLERDORFER, M.; BADER, H. Influence of natural fibres on the mechanical properties of biodegradable polymers. *Industrial Crops and Products*, v. 8, n. 2, p. 105-112, 1998.

XIE, Y.; CALLUM A. S. H.; JALALUDIN, Z.; CURLING, S. F.; ANANDJIWALA; NORTON, R. D.; NEWMAN, G. The dynamic water vapour sorption behaviour of natural fibres and kinetic analysis using the parallel exponential kinetics model. *Springer Science Business Media*, v. 46, n. 2, p. 479–489, 2011.

XUE, Y. Environmental effects on the mechanical and thermomechanical properties of aspen fiber–polypropylene composites. *Composites Part B: Engineering*, v. 38, n. 2, p. 152-158, 2007.

ZAH, R. Curauá fibers in the automobile industry—a sustainability assessment. *Journal of Cleaner Production*, v. 15, n. 11, p. 1032-1040, 2007.

ZHOU, J.; LUCAS, J. P. Hygrothermal effects of epoxy resin. Part I: the nature of water in epoxy. *Polymer*, vol. 40, p. 5505–5512 (1999).

ZIVKOVIC, I.; FRAGASSA, C.; PAVLOVIC, A.; BRUGO, T. Influence of moisture absorption on the impact properties of flax, basalt and hybrid flax/basalt fiber reinforced green composites. *Composites Part B*, vol. 111, p. 148-164 (2017).