

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

Absorção de Água em Materiais
Compósitos de Fibra Vegetal: Modelagem e
Simulação via CFX

Autor: **Carlota Joaquina e Silva**

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

Campina Grande, março de 2014.

PB - Brasil

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

Absorção de Água em Materiais
Compósitos de Fibra Vegetal: Modelagem e
Simulação via CFX

Autor: **Carlota Joaquina e Silva**

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

Curso: **Engenharia Mecânica**

Área de Concentração: **Térmica e Fluídos**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campina Grande, março de 2014.

PB - Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586a Silva, Carlota Joaquina e.
Absorção de água em materiais compostos de fibra vegetal :
modelagem e simulação via CFX / Carlota Joaquina e Silva. –
Campina Grande, 2014.
95 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade
Federal de Campina Grande, Centro Ciências e Tecnologia.

"Orientação: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima".
Referências.

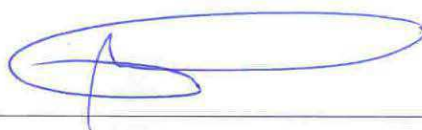
1. Fibra de Caroa. 2. Absorção de Água. 3. Compostos. 4. CFX.
I. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. II. Título.

CDU 677.165(043)

“ABSORÇÃO DE ÁGUA EM MATERIAIS COMPÓSITOS DE FIBRA VEGETAL:
MODELAGEM E SIMULAÇÃO VIA CFX”.

CARLOTA JOAQUINA E SILVA

Dissertação Aprovada em 17/03/2014 pela banca examinadora constituída dos seguintes
membros:



Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Orientador

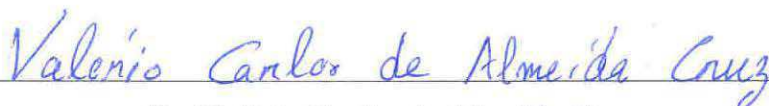
PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dra. Wilma Sales Cavalcanti

Examinador Externo

UAEMat/CCT/UFCG



Dr. Valério Carlos de Almeida Cruz

Examinador Externo

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação de mestrado primeiramente a Deus que sempre esteve comigo em todos os momentos da minha vida e ao meu pai biológico Joaquim Neto e o de coração Gerson Miranda, e a minha mãe Leonila Rodrigues, irmãos, familiares, e amigos que de muitas formas me incentivaram e ajudaram para que fosse possível a concretização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A professora Dr. Antônio Gilson Barbosa de Lima, pela orientação e o apoio para realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Tony Herbert Freire de Andrade pelas contribuições prestadas a este trabalho.

A professora Me. Edna Gomes da Silva pelas sugestões, pela amizade e parceria nos estudos realizados para este trabalho.

Aos meus pais, irmãos e amigos pela contribuição e apoio nos momentos difíceis desta jornada.

A Unidade acadêmica de Engenharia de Engenharia Mecânica/UAEM/UFMG pelo uso de seus laboratórios e equipamentos e aos funcionários.

Aos órgãos de fomento CAPES, CNPQ, FINEP pelos recursos disponibilizados.

A todos que contribuíram de alguma forma para realização deste trabalho.

Muito valiosa e positivamente destinada a um grande futuro industrial é conhecida Caroá, bromeliácea, Neoglaziovia Variegata por Karl Mez, cujas fibras se tornam ainda mais preciosas pela sua abundância, principalmente nos terrenos mais sáfaros e que nunca poderão, servir para a lavoura nem para a indústria pastoril. Acreditamos ser uma planta uma das grandes riquezas da região, constituindo uma espécie de compensação pela natureza estéril e hostil do solo em que cresce.

Ameida Pinto, 1873.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

1 Introdução	01
--------------	----

CAPÍTULO 2

2 Revisão da Literatura	05
2.1 Compósito	05
2.1.1 Fundamentos Gerais	05
2.1.2 Classificação dos Compósitos	08
2.1.3 Reforço	09
2.1.4 Matriz polimérica	11
2.1.4.1 Resina Poliéster	13
2.1.4.2 Estrutura do Poliéster Insaturado	14
2.1.4.3 Poliéster Ortoftálico	14
2.5.1 Interface matriz-fibra	15
2.2 Fibras vegetais	16
2.2.1 Características gerais	16
2.5.2 Microestrutura e Composição Química das Fibras Vegetais	20

2.5.3 Fibras de Caroá	21
2.3 Compósitos reforçados por fibras vegetais	24
2.3.1 Aspectos estruturais	24
2.3.2 Efeitos da sorção de água	32
CAPÍTULO 3	
3 Metodologia	40
3.1 Teórica	40
3.1.1 Modelagem matemática	40
3.1.2 Geração da malha do compósito	43
3.1.3 Malha numérica	53
3.2 Experimental	55
3.2.1 Preparação dos compósitos	55
3.2.2 Ensaio de sorção de água	56
CAPÍTULO 4	
4 Resultados e Discussões	62
CAPÍTULO 5	
5 Conclusões e Sugestões	81
5.1 Conclusões	81
5.2 Sugestões para futuros trabalhos	82
Referências Bibliográficas	84

RESUMO

SILVA, Carlota Joaquina, Absorção de Água em Materiais Compósitos de Fibra Vegetal: Modelagem e Simulação via CFX, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, 2014. 114 p. Dissertação (Mestrado).

Estudos em compósitos de poliméricos reforçados com fibras vegetais mostram que eles são bastante sensíveis às influências de agentes ambientais, tais como a água e à temperatura. A umidade provoca a degradação das propriedades mecânicas dos compósitos reforçados de fibras naturais, quando comparada com compósitos reforçados com fibra sintética. Isto é uma consequência da elevada absorção de água e a natureza hidrofílica das fibras vegetais. Neste sentido, o objetivo do presente trabalho foi estudar teoricamente a absorção de água em compósitos de poliéster insaturado reforçados com fibras naturais caroá (*Neoglaziovia variegata*) nas temperaturas de 25, 50 e 70°C. Os compósitos têm uma composição em massa de 30 % caroá e 70% de resina de poliéster insaturado e as dimensões de 20x20x3 e 20x20x6 mm³. Os resultados do teor médio de umidade e distribuição de conteúdo de umidade durante o processo de absorção são apresentados e analisados. Comparação entre os dados numéricos e experimentais do teor médio de umidade apresentaram pequenos desvios. Conclui-se que a taxa de absorção de água é mais rápida na região do vértice dos compósitos, principalmente em temperaturas mais elevadas.

Palavras Chave: Absorção de água, compósitos, Fibra de caroá, CFX®.

ABSTRACT

SILVA, Carlota Joaquina, Water Absorption in Composite Materials of Vegetal Fiber: Modeling and Simulation via CFX, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, 2014. 114 p. Dissertação (Mestrado).

Studies in polymer composites reinforced with vegetable fiber show that they are enough sensitive to influences from environmental agents such as water and temperature. The moisture causes degradation of the mechanical properties of natural fiber reinforced composites to a large extent when compared to synthetic fiber reinforced composites. This is a consequence of the higher moisture absorption, and the hydrophilic nature of the natural fiber. In this sense, the purpose of this work is to study theoretically the water absorption in unsaturated polyester composites reinforced with caroá natural fiber (*Neoglaziovia variegata*) at the temperatures 25, 50 e 70°C. The composite had a weight composition of 30% caroá and 70% unsaturated polyester resin and dimensions of 20x20x3 and 20x20x6 mm³. Results of the average moisture content and moisture content distribution during the absorption process are presented and analyzed. Comparison between numerical and experimental data of the average moisture content presented good agreement. It can be concluded that the water absorption rate is faster in the vertex region of the composites, mainly at increased temperature.

Key Words: Water absorption, composite, caroá fiber, CFX[®].

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama esquemático apresentando conceitos de interface em materiais compósitos	07
Figura 2.2 a Classificação de sistemas de materiais compósitos: Compósito particulado	08
Figura 2.2 b Classificação de sistemas de materiais compósitos: Compósito de fibras descontinuas unidirecionais	08
Figura 2.2 c Classificação de sistemas de materiais compósitos: Compósito de fibras descontinuas orientadas aleatoriamente	08
Figura 2.2 d Classificação de sistemas de materiais compósitos: Compósito de fibras contínuas unidirecionais	08
Figura 2.2 e Classificação de sistemas de materiais compósitos: Compósito de manta de fibras contínuas	08
Figura 2.2 f Classificação de sistemas de materiais compósitos: Compósito de fibras contínuas multidirecional	08
Figura 2.3 Representação da reação de obtenção do poliéster insaturado	14
Figura 2.4 Estrutura química do ácido orto-ftálico	15
Figura 2.5 Representação de uma fibra-celular contendo as paredes primárias, secundárias, terciárias, e suas constituições: o lúmen e o ângulo espiral	18
Figura 2.6 Planta do Caroá (Neoglaziovia Variegata)	22
Figura 3.1 Configuração geométrica do problema físico	41
Figura 3.2 Janela principal do ICEM CFD® versão 12.01	44

Figura 3.3 Janela de definição do nome da malha	45
Figura 3.4 Janela de definição da dimensão	46
Figura 3.5 Criação dos pontos da geometria	46
Figura 3.6 Criação das curvas da geometria	47
Figura 3.7 Criação das superfícies da geometria	48
Figura 3.8 Deletando pontos e curvas da geometria	48
Figura 3.9 Reparando a geometria modificando a tolerância	49
Figura 3.10 Nomeando as superfícies de contorno	50
Figura 3.11 Criação do sólido a partir do conjunto das superfícies obtidas	51
Figura 3.12 Obtenção da região 3D	51
Figura 3.13 Criação da malha da geometria obtida	52
Figura 3.14 Malha criada no software CFX [®]	53
Figura 3.15 Malha numérica da geometria do compósito reforçado com fibra de caroá com 3 mm de espessura	54
Figura 3.16 Malha numérica da geometria para o compósito reforçado com fibra de Caroá com 6 mm de espessura	54
Figura 3.17 Fibras de caroá obtidas de forma tradicional	55
Figura 3.18 Compósito no molde; medição e preparação do corpo de prova	56
Figura 3.19 Corpos de prova para ensaio de sorção de água, com 3 e 6 mm de espessura	57
Figura 3.20 a Corpos de prova imersos em água	58
Figura 3.20 b Corpos de prova imersos em água	58
Figura 3.20 c Corpos de prova imersos em água	58
Figura 4.1 Comparação entre teores de umidade médios da matriz, experimental (Nóbrega, 2007) e numérico (Ansys CFX [®])	63
Figura 4.2 Comparação entre teores de umidade experimental (Nóbrega, 2007) e numérico (Ansys CFX [®]), para compósito reforçado com 30% de fibras de caroá, 3 mm de espessura e temperatura de 25°C.	64
Figura 4.3 Comparação entre teores de umidade experimental (Nóbrega, 2007) e numérico (Ansys CFX [®]), para compósito reforçado com 30% de fibras de caroá, 3 mm de espessura e temperatura de 50°C	65
Figura 4.4 Comparação entre teores de umidade experimental (Nóbrega, 2007)	

e numérico (Ansys CFX [®]), para compósito reforçado com 30% de fibras de caroá, 3 mm de espessura e temperatura de 70°C.	65
Figura 4.5 Comparação entre teores de umidade experimental (Nóbrega, 2007) e numérico (Ansys CFX [®]), para compósito reforçado com 30% de fibras de caroá, 6 mm de espessura e temperatura de 25°C	66
Figura 4.6 Comparação entre teores de umidade experimental (Nóbrega, 2007) e numérico (Ansys CFX [®]), para compósito reforçado com 30% de fibras de caroá, 6 mm de espessura e temperatura de 50°C	66
Figura 4.7 Comparação entre teores de umidade experimental (Nóbrega, 2007) e numérico (Ansys CFX [®]), para compósito reforçado com 30% de fibras de caroá, 6 mm de espessura e temperatura de 70°C	67
Figura 4.8 Cinéticas de sorção de água dos compósitos reforçados com 30% de fibras de Caroá nas espessuras de 3 e 6 mm, temperatura de ensaio de 25°C, obtidos com o Ansys CFX [®]	68
Figura 4.9 Cinéticas de sorção de água dos compósitos reforçados com 30% de fibras de Caroá nas espessuras de 3 e 6 mm, temperatura de ensaio de 50°C, obtidos com o Ansys CFX [®]	68
Figura 4.10 Cinéticas de sorção de água dos compósitos reforçados com 30% de fibras de Caroá nas espessuras de 3 e 6 mm, temperatura de ensaio de 70°C, obtidos com o Ansys CFX [®]	69
Figura 4.11 Cinéticas de sorção de água dos compósitos reforçados com 30% de fibras de caroá com 3 mm de espessura nas temperaturas de ensaios 25, 50 e 70°C, obtidos com o Ansys CFX [®]	70
Figura 4.12 Cinéticas de sorção de água dos compósitos reforçados com 30% de fibras de caroá com 6 mm de espessura nas temperaturas de ensaios 25, 50 e 70°C, obtidos com o Ansys CFX [®]	70
Figura 4.13 Distribuição do teor de umidade no interior do poliéster insaturado, na temperatura de 25°C e espessura de 3 mm nos planos (x=0, y, z), (x, y=0, z) e (x, y, z=0) em tempos variados	72
Figura 4.14 Distribuição do teor de umidade no interior do compósito com reforço de fibra de caroá, na temperatura de 25°C e espessura de 3 mm nos	

planos $(x=0, y, z)$, $(x, y=0, z)$ e $(x, y, z=0)$ em tempos variados	73
Figura 4.15 Distribuição do teor de umidade no interior do compósito com reforço de fibra de caroá, na temperatura de 50°C e espessura de 3 mm nos planos $(x=0, y, z)$, $(x, y=0, z)$ e $(x, y, z=0)$ em tempos variados	74
Figura 4.16 Distribuição do teor de umidade no interior do compósito com reforço de fibra de caroá, na temperatura de 70°C e espessura de 3 mm nos planos $(x=0, y, z)$, $(x, y=0, z)$ e $(x, y, z=0)$ em tempos variados	75
Figura 4.17 Distribuição do teor de umidade no interior do compósito com reforço de fibra de caroá, na temperatura de 25°C e espessura de 6 mm nos planos $(x=0, y, z)$, $(x, y=0, z)$ e $(x, y, z=0)$ em tempos variados	76
Figura 4.18 Distribuição do teor de umidade no interior do compósito com reforço de fibra de caroá, na temperatura de 50°C e espessura de 6 mm nos planos $(x=0, y, z)$, $(x, y=0, z)$ e $(x, y, z=0)$ em tempos variados	77
Figura 4.19 Distribuição do teor de umidade no interior do compósito com reforço de fibra de caroá, na temperatura de 70°C e espessura de 6 mm nos planos $(x=0, y, z)$, $(x, y=0, z)$ e $(x, y, z=0)$ em tempos variados	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Análise química de fibras vegetais	23
Tabela 3.1 Condições de umidificação, composição e dimensões das amostras usadas para cada experimento	59
Tabela 3.2 Parâmetros da Equação (8) ajustados aos dados experimentais	60
Tabela 3.3 Coeficiente de difusão e teores de umidade	60
Tabela 4.1 Teores de umidade, dados geométricos e tempo final de absorção de cada amostra	63

NOMENCLATURA

Letras Latinas

D – Coeficiente de difusão efetivo	[m ² /s]
dM/dt – Taxa de difusão	[1/s]
$\partial M/\partial t$ – Taxa de difusão	[1/s]
ERMQ – Erro médio quadrático	[(kg/kg) ²]
exp – Exponencial	[-]
m – Massa	[kg]
M – Teor de umidade em base seca	[kg/kg]
M* - Razão de umidade	[-]
M _o – Teor de umidade inicial em base seca	[kg/kg]
M _e – Teor de umidade de equilíbrio em base seca	[kg/kg]
\bar{M} - Teor de umidade médio	[kg/kg]
\bar{M}^* - Razão de umidade médio	[kg/kg]
R – Comprimento relacionado às dimensões do sólido, R ₁ , R ₂ e R ₃	[m]
R ₁ – Dimensão do sólido em relação ao comprimento	[m]
R ₂ – Dimensão do sólido em relação à profundidade (largura)	[m]
R ₃ – Dimensão do sólido em relação à altura (espessura)	[m]
t – Tempo	[s]
V – Volume	[m ³]
x, y, z – Coordenadas cartesianas	[m]

Letras Gregas

ρ - Densidade - (massa específica)	[kg/m ³]
∇ - Operador nabla	[-]
Γ^Φ - Propriedade do material	[-]
$\zeta = \rho$ - Densidade do sólido seco	[kg/m ³]

Superescritos

- * Adimensional
- o Anterior

Subscritos

- e – Equilíbrio
- o – Inicial
- t - Tempo
- m – matriz
- b.s – base seca

Abreviações

- °C - graus Celsius
- Exp - Experimental
- m – Metro
- MEK - Metil Etil Cetona
- MEV - microscopia eletrônica de varredura
- mm – Milímetro

NFRPC - compósitos poliméricos reforçados com fibra natural

Num – Numérico

PLA - Poli ácido láctico

TGA - Análise Termogravimétrica

PEK - modelo cinético exponencial

XPS - espectroscopia de fotoelétrons de raios -X

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A busca por materiais ecologicamente corretos visando minimizar os problemas ambientais tem se tornado uma grande preocupação nos últimos anos. O novo paradigma do desenvolvimento econômico está voltado para propiciar a melhoria de vida das futuras gerações, incorporando na sua concepção modos de produção menos poluentes e impactantes. A utilização das fibras vegetais como substitutas de diversos reforços sintéticos ou de cargas minerais em compósitos poliméricos tem apresentado um grande potencial de aplicação tecnológica. Devido a isto, a busca por novos materiais tem levado os cientistas a desenvolverem compósitos utilizando fibras naturais como cargas reforçastes (Ishizaki et al., 2004; D’Almeida et al., 2006).

Além da grande importância socioeconômica, ligada à cultura de fibras vegetais no Brasil, tais como o sisal e a juta, existem outros fatores que motivam os estudos visando à aplicação destas fibras. Dentro desta visão ecológica a utilização de fibras vegetais como reforço em polímeros tem despertado grande interesse da indústria de produtos ecologicamente corretos

devido à possibilidade de substituição de fibras sintéticas pelas fibras naturais, a busca de novas aplicações através do entendimento da correlação entre estrutura e propriedades dos compósitos e a redução de custo devido ao baixo preço destas fibras vegetais (Martins et al., 2004; Tanobe et al., 2003).

O uso de matérias-primas de fontes renováveis vem sendo objeto de diversos estudos e pesquisas, devido ao seu potencial na substituição de derivados petroquímicos. Neste contexto, nos últimos anos, o uso de fibras naturais como curauá, coco, sisal, rami, bagaço de cana-de-açúcar, juta, abacaxi, macambira, dentre outras, como reforço em materiais poliméricos teve um acelerado crescimento. Isto porque as fibras vegetais apresentam importantes características como: baixo custo, baixa densidade, resistência, baixa abrasividade aos equipamentos de processo, biodegradabilidade, não toxicidade ou não poluentes diminuindo assim os problemas ambientais, além de provirem de fontes renováveis e serem abundantes em todo o mundo (Nóbrega et al., 2005; Cavalcanti et al., 2004; Mothé et al., 2004; Medeiros et al., 2003; Bledzki e Gassan, 1999). Devido a estas características, a indústria aeronáutica, espacial e de construção são grandes impulsionadoras do desenvolvimento desses materiais, pois necessitam de componentes com baixa densidade e que atendam aos requisitos de boa resistência mecânica ao qual foi destinada e modesta confiabilidade (Saikia, 2008).

Atualmente, os compósitos são considerados materiais de engenharia heterogêneos e multifásicos, em que pelo menos um dos componentes fornece a resistência ao reforço. Por esse motivo, ele é denominado componente matricial ou matriz, podendo ser obtido por diferentes técnicas de processamento, como por laminação manual, moldagem por compressão quente, bobinagem, moldagem por transferência de resina e pultrusão, dentre outras técnicas (Rezende et al., 2011).

As principais desvantagens no emprego das fibras vegetais em compósitos poliméricos são relacionadas à natureza polar e hidrofílica bem como à susceptibilidade dessas fibras a ataques de fungos e bactérias. A natureza hidrofílica das fibras vegetais proporciona baixa molhabilidade e adsorção da matriz polimérica em sua superfície, resultando em fraca adesão interfacial polímero-fibra no compósito final, que diminui o desempenho mecânico destes

materiais. A qualidade da interface fibra-matriz é significativa para a aplicação de fibras vegetais como reforço para plásticos (Carvalho et al., 2006; Nóbrega et al., 2006; Medeiros et al., 2003; Bledzki e Gassan, 1999).

Absorção de umidade pode resultar em inchamento das fibras afetando a matriz por iniciação de trincas ou enfraquecimento das interações da interface fibra-matriz. Em compósitos poliméricos reforçados por fibras vegetais, a absorção de umidade pela fibra não tratada, com baixa molhabilidade e adesão insuficiente entre matriz polimérica hidrofóbica e a fibra hidrofílica, tanto diminui as propriedades mecânicas do sistema como leva à delaminação com o tempo (Rouison et al., 2005; Wang et al., 2005; Wambua et al., 2003; Gassan, 2002).

Neste sentido, o conhecimento da difusividade mássica da água no compósito, a permeabilidade, e a solubilidade são essenciais para a aplicação de fibras naturais como um excelente reforço em polímeros (Cavalcanti, 2006; Li et al., 2007; Saikia, 2010; Nóbrega et al., 2010).

O teor de umidade pode degradar as propriedades dependentes da matriz, além de afetar diretamente aquelas que estão no sentido de carregamento do laminado, principalmente em ambientes com temperaturas elevadas. A movimentação das moléculas de água é o fator responsável pelo mecanismo de difusão da umidade de uma região de alta concentração, para outra de baixa concentração. Com a elevação da temperatura, essa transferência de moléculas aumenta e, conseqüentemente, a taxa de difusão da umidade também (Rezende et al., 2011).

Vários trabalhos sobre a cinética de absorção de água e/ou umidade em sistemas compósitos apresentando soluções analíticas e/ou numéricas foram encontrados na literatura. No entanto, todos os trabalhos se resumem em considerar a difusão de sólido como sendo unidimensional. Em alguns casos para levar em consideração a tridimensionalidade do problema alguns pesquisadores têm utilizado soluções analíticas para o problema tridimensional aplicada para tempos longos, o que simplifica bastante o problema (Tang et al., 2005; Pegoretti e Penati, 2004; Marcovich, 1999).

Devido à importância do tema, alguns pesquisadores têm estudado numericamente o problema de absorção de água em materiais compósitos reforçados com fibras vegetais, usando modelo tridimensional transiente (Cruz, 2011; Nóbrega, 2007; Cavalcanti, 2006), todos, contudo, usando o método numérico dos volumes finitos. No contexto das fibras vegetais, a região nordestina é rica de plantas, uma delas é o caroá.

As fibras são originadas da planta Caroá (*Neoglaziovia variegata*), nome derivado do tupi Kara'wã que significa talo com espinhos. É uma planta de caule terrestre, da família das bromeliáceas, de poucas folhas e flores variegadas. O caroá, planta originária do Cariri Velho no Estado da Paraíba, teve o apogeu econômico da utilização de suas fibras entre as décadas 40 e 60, onde foram utilizadas principalmente na fabricação de barbantes, linhas de pesca, tecidos e cordas.

Em prévios trabalhos (Cavalcanti, 2006; Nóbrega, 2007), foi verificado que as fibras de Caroá apresentam propriedades mecânicas que indicam boas aplicações em compósitos poliméricos, além de ser fator de desenvolvimento regional. Seu uso como reforço em compósitos de matriz polimérica, praticamente não foi referenciado por pesquisadores da área e a investigação da absorção de umidade por parte deste compósito também são escassas.

O objetivo geral do presente trabalho é estudar a absorção de água em materiais compósitos reforçados com fibra de caroá via CFX.

Como objetivos específicos, podemos citar:

- a) Apresentar um modelo matemático tridimensional transiente para simular o processo de sorção de água em compósitos poliméricos reforçados com fibra vegetal (Caroá);
- b) Estudar numericamente a absorção de água e a distribuição de umidade no interior dos compósitos ao longo do processo via software Ansys CFX[®];
- c) Comparar os resultados numéricos e experimentais de sorção de água para validar a metodologia numérica e determinar os coeficientes de transporte.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 COMPÓSITOS

2.1.1 Fundamentos Gerais

Os materiais compósitos têm origem na própria natureza, como é o caso da madeira, que constitui um compósito vegetal. A manufatura dos compósitos baseia-se na combinação e colocar em serviço dois ou mais materiais macro-constituintes distintos que, geralmente, diferem em composição química e/ ou física, com o objetivo de obter propriedades específicas, diferentes daquelas que cada constituinte apresenta separadamente, tendo uma interfase reconhecível entre os componentes (Rezende et al., 2011).

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 a fase contínua é denominada de matriz (Marinucci, 2011; Kaw, 2006; Shackelford, 2005; Callister Jr., 2003, Laranjeira, 2004; Flinn e Trojan, 1981).

As propriedades dos compósitos são a função das propriedades das fases constituintes, de suas quantidades relativas (teor de reforço), geometria dispersa (dependem da forma, tamanho, distribuição e orientação dessas partículas) e o grau de dispersão interface e adesão fibra/matriz e disposição de camadas e orientação. Estas propriedades controlam a homogeneidade do produto. As características de anisotropia de um compósito são influenciadas enormemente pela orientação do reforço. Compósitos longitudinalmente orientados são anisotrópicos por natureza e o máximo na resistência é obtido quando o material é testado na direção do alinhamento das fibras. Na direção transversal ao alinhamento das fibras, o reforço é virtualmente inexistente e, portanto, a falha do material já possui tensões muito baixas (Callister Jr., 2012).

Quando o reforço está na forma de partículas, com todas as dimensões aproximadamente iguais, o compósito comporta-se como um material isotrópico, cujas propriedades são independentes da direção. Em processos que utilizam fibras curtas, é possível que esses reforços não apresentem dimensões iguais em relação um ao outro, desse modo, devido à distribuição aleatória que essas fibras apresentam no material, pode-se considerar que o material possui um comportamento quase-isotrópico (Marinucci, 2011).

Como mencionado, um dos fatores mais importantes em materiais compósitos é a interface entre o reforço e a matriz (Figura 2.1). A interface é a região onde ocorre o contato entre os componentes do compósito. As propriedades finais dos compósitos dependem fundamentalmente da forma como os componentes individuais interagem entre si, ou seja, dependem da interface entre as fases descontínua e contínua. Esta região é a principal responsável pela transferência da solicitação mecânica da matriz para o reforço. A adesão inadequada entre as fases envolvidas na interface poderá provocar o início de falhas, comprometendo o desempenho do compósito. Portanto, além das propriedades individuais de

cada componente do compósito, a interface deve ser a mais adequada possível para aperfeiçoar a combinação das propriedades envolvidas (Cavalcanti, 2006; Kaw, 2006; Shackelford, 2005; Mitchell, 2004; Callister Jr., 2003; Nóbrega, 2000; Hull e Clyne, 1996; Hage, 1989).

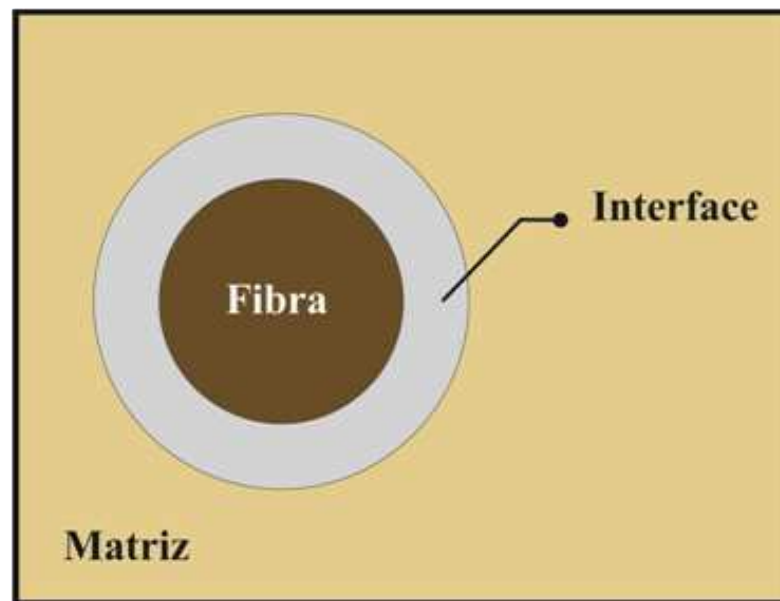


Figura 2.1 Diagrama esquemático apresentando conceitos de interface em materiais compósitos.

Fonte: Autoria própria.

Embora possuam propriedades mecânicas inferiores quando comparado aos compósitos com fibras contínuas, os compósitos com fibras descontínuas oferecem maior facilidade de processamento a um menor custo. Nos compósitos com fibras descontínuas, as propriedades do compósito dependem da quantidade e comprimento das fibras. Os extremos das fibras são geralmente pontos concentradores de tensões, que induzem tensões cisalhantes na interface. Assim como o comprimento das fibras, a sua orientação é de igual importância e depende essencialmente do processo de fabricação. As propriedades mecânicas variam consideravelmente de acordo com a mudança na distribuição de orientação das fibras (Shackelford, 2005; Silva, 2003; Callister Jr., 2003).

2.1.2 Classificação dos Compósitos

Os compósitos podem ser classificados de acordo com o tipo de matriz polimérica, tipo do reforço utilizado e com a geometria ou a forma dos reforços presentes. Materiais com características orgânicas podem ser conjugados com aqueles de natureza inorgânica. Componentes na forma de fibras (longas ou curtas), partículas globulares, plaquetárias ou escamas (Figura 2.2), podem ser incorporadas a matrizes dúcteis ou frágeis de maneira aleatória ou em laminados orientados, gerando compósitos com diferentes estruturas e propriedades (Cavalcanti, 2006; Mitchell, 2004; Callister Jr., 2003).

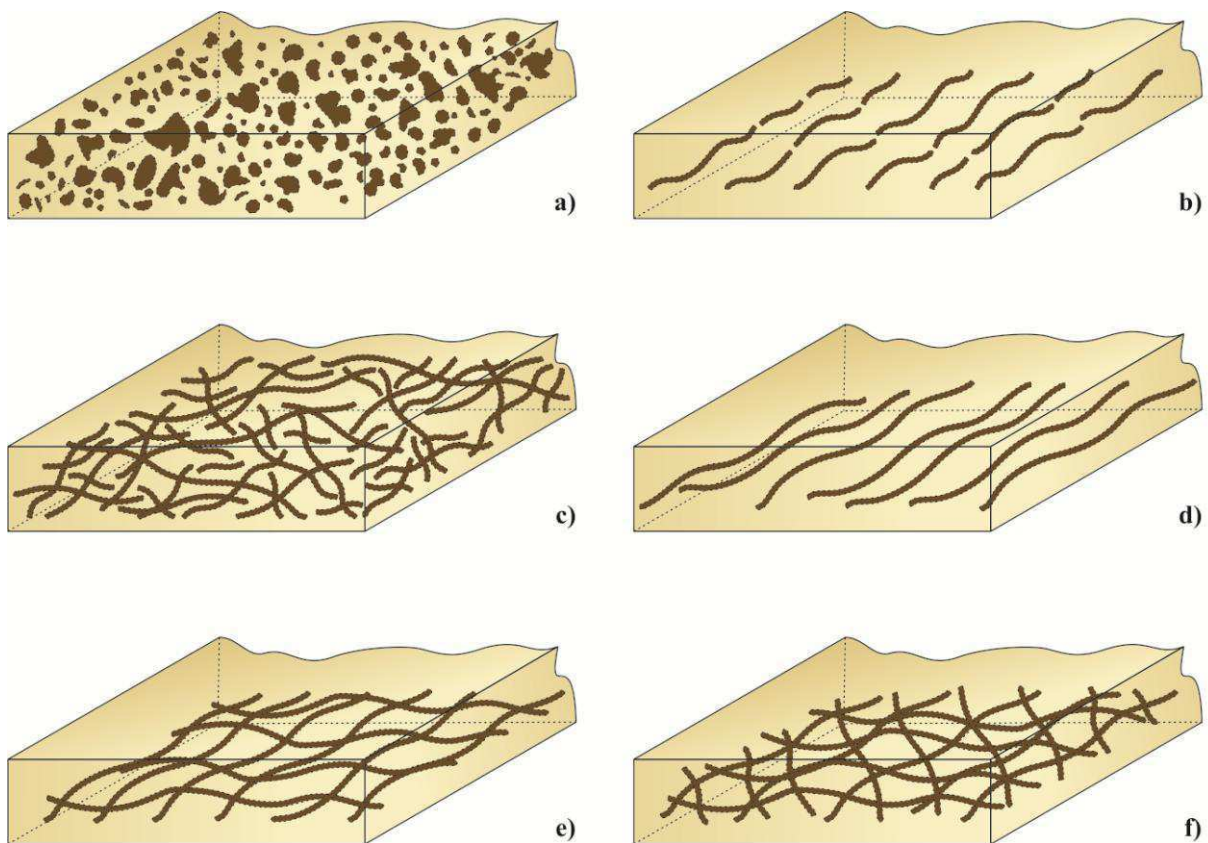


Figura 2.2 Classificação de sistemas de materiais compósitos: a) Compósito particulado, b) Compósito de fibras descontinuas unidirecionais, c) Compósito de fibras descontinuas orientadas aleatoriamente, d) Compósito de fibras contínuas unidirecionais, e) Compósito de manta de fibras contínuas, f) Compósito de fibras contínuas multidirecional. Fonte: Autoria própria.

Os materiais compósitos também são convencionalmente classificados de acordo com a sua natureza química e física da matriz em: cerâmicos, metálicos e poliméricos. Os materiais cerâmicos são inorgânicos e têm como características principais, elevada resistência ao calor e sua extrema fragilidade; os materiais metálicos apresentam como características gerais, ductilidade e excelente condutividade térmica e elétrica. A grande limitação do uso de metais em compósitos é a sua elevada densidade e custo do processo de fabricação. Os materiais poliméricos, por sua vez destacam-se pela sua baixa densidade, fácil conformação e elevada resistividade elétrica (Shackelford, 2005; Callister Jr., 2003).

O componente de reforço no compósito pode estar na forma particulada, na forma de laminados ou de fibras. O maior volume de aplicação de reforço envolve fibras, filamentos ou monofilamentos. O aspecto unidirecional da fibra permite a fabricação da estrutura do reforço, através das facilidades têxteis a que as fibras podem ser submetidas, como: tecidos; não-tecidos (*nonwoven*); mechas (*roving*); fios e outros (Cavalcanti, 2006; Crawford, 1999).

As propriedades físico-químicas e mecânicas dos componentes de um compósito são combinadas para proporcionar as características desejadas ao produto final; esta mudança deve ser realizada conhecendo as propriedades individuais de cada componente. Uma propriedade física dos materiais que afeta diretamente a estrutura dos compósitos é o coeficiente de expansão térmica. Uma discrepância muito acentuada nesta propriedade entre os componentes do compósito dificulta a adesão entre os componentes, pois a dilatação ou a contração diferencial favorece a separação das fases na região interfacial. Quanto maior o coeficiente de expansão térmica mais fraca será a interação atômica ou molecular na estrutura do material (Shackelford, 2005; Mitchell, 2004; Laranjeira, 2004; Hage, 1989). Este efeito será mais acentuado quando o material for submetido a elevados gradientes de temperatura.

2.1.3 Reforço

Reforços são os 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 ultra-alta

resistência. As cargas minerais proporcionam aumentos na rigidez, dureza e, algumas vezes, na resistência e temperatura de distorção térmica; os elastômeros proporcionam aumento na resistência ao impacto de matrizes poliméricas frágeis; as fibras, pelas suas características de elevada razão L/d , são os principais responsáveis pelo aumento nas propriedades mecânicas dos compósitos (Shackelford, 2005; Callister Jr., 2003).

Os reforços podem ser classificados como segue:

a) Quanto à sua natureza:

- Suficientemente duros para promover aumento na dureza e resistência à abrasão;
- Resistentes à ruptura para proporcionar elevada resistência à tração, à flexão e ao cisalhamento;
- Rígidos o suficiente para aumentar o módulo elástico;
- Flexíveis de forma a aumentar a resistência ao impacto;
- Resistentes termicamente visando aumentar a estabilidade térmica.

b) Quanto às características geométricas:

- Particulados;
- Fibrosos;
- Laminados.

As características do reforço que têm maior influência sobre as propriedades de compósitos são: constituição química, tamanho e razão de aspecto. A adesão entre os componentes de um compósito é de fundamental importância para que o reforço possa exercer sua função de forma efetiva e os esforços aplicados sejam divididos entre as duas fases (Cavalcanti, 2006; Peters, 1998; Richardson, 1997).

A quantidade do reforço é uma das principais variáveis a ser considerada no desenvolvimento do compósito. A qualidade do compósito final é função, dentre outros requisitos, do comprimento, razão de aspecto e dispersão do reforço na matriz polimérica e do grau de cristalinidade do compósito. No caso de compósitos reforçados por fibras longas ou

contínuas, a qualidade do produto final também depende do método e condições de moldagem dos componentes (Cavalcanti, 2006).

A definição mais usual da fibra para a fabricação de compósitos poliméricos é a reunião de milhares de monofilamentos contínuos, orientados numa só direção e unidos por um material aglomerante. Assim, a fibra é o primeiro produto na escala dos materiais de reforço, que podem ser torcidos (*twisted*) durante a fabricação, denominados de *yarns*, ou não torcidos (*non-twisted*), denominados de *rovings*. As fibras são disponíveis na forma de fibras curtas e fragmentadas ou na forma de filamentos contínuos, sendo cada uma fabricada numa enorme variedade de produtos distintos (Marinucci, 2011).

Quando se utilizam cargas fibrosas, as tensões aplicadas ao sistema são transferidas pelo polímero à fibra por um mecanismo de transferência de tensão por cisalhamento. Para que haja transferência efetiva de tensões é necessário que a interface seja forte, ou seja, que haja boa adesão entre os componentes (Brydson, 1999; Peters, 1998).

Fibras podem ser usadas como reforço em plásticos sempre que há a necessidade de propriedades mecânicas elevadas combinadas com baixo peso. No que diz respeito ao uso de fibras vegetais como reforço em compósitos poliméricos, o interesse maior é a substituição parcial ou total das fibras de vidro, extensamente usadas, além da obtenção de vantagens do ponto de vista de peso, custo e adesão fibra-matriz, especificamente com matrizes polares (Brydson, 1999; Wollerdorfer e Bader, 1998).

2.1.4 Matriz polimérica

As matrizes poliméricas podem ser termofixas, termoplásticas ou elastoméricas. Para os compósitos avançados, a maior parte das matrizes poliméricas é à base de resinas termofixas, destacando-se as resinas epóxi, fenólicas e poliéster (Hull e Clyne, 1996).

Resinas termofixas têm sido utilizadas como matrizes em compósitos devido as suas características químicas, propriedades mecânicas, resistência a solventes, e estabilidade à

temperaturas elevadas. Estima-se que mais de três quartos de todas as matrizes de compósitos poliméricos sejam constituídas por polímeros termofixos (Paiva e Frollini, 1999). Estas, em geral, são mais resistentes e menos sensíveis a ataques químicos e mais resistentes termicamente do que os termoplásticos.

A matriz é responsável pelo aspecto externo do compósito e pela proteção do reforço contra ataques químicos e físicos, no entanto, a principal função da matriz polimérica é dispersar ou aglomerar a fase reforçante, e, quando submetida a uma tensão, deve deformar o necessário a fim de distribuir e transferir as tensões para o componente de 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 (Cheremisinoff, 1998; Goodman, 1998; Hage, 1989).

A maior parte das matrizes poliméricas utilizadas em compósitos de alto desempenho é de resinas termofixas, destacando-se as resinas epóxi, poliéster, fenólicas e mais recentemente, compósitos reforçados a base de poliamidas. O uso de termoplásticos, convencionais e de engenharia, como matriz polimérica tem se restringido à compósitos de médio desempenho. A limitada estabilidade térmica dos termoplásticos à elevadas temperaturas tem tornado seu uso restrito. Entretanto, a incorporação de reforços em matrizes termoplásticas tem crescido bastante para aplicações até 150°C (Hage, 1989).

As resinas epóxi, apesar de apresentarem excelentes propriedades mecânicas, são penalizadas por custos elevados e baixa resistência a intempéries. O processo de cura destas resinas é bem mais complexo do que o da resina poliéster. No caso das resinas fenólicas, sua principal desvantagem perante as resinas poliéster e epóxi é que, durante a sua cura, forma-se água como subproduto. Portanto, sua aplicação em compósitos é mais complexa, pois a retirada da umidade passa a ser um importante fator durante o processo de fabricação (Cheremisinoff, 1998).

As resinas poliéster são usadas em compósitos devido ao baixo custo e propriedades mecânicas satisfatórias. Depois de curadas, apresentam boas propriedades elétricas e

oferecem boa resistência à corrosão e a ataques químicos. Por outro lado, a resina pura é pouco resistente e quebradiça. A cura da resina de poliéster é um processo exotérmico e exige um sistema de cura à base de peróxido orgânico como catalisador (Cheremisinoff, 1998; Goodman, 1998).

2.1.4.1 Resina Poliéster

As resinas poliéster 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) (Goodman, 1998).

Os poliésteres saturados são obtidos pela reação entre um diol e um diácido saturado, resultando num produto termoplástico, cuja cadeia molecular é composta apenas por ligações simples entre átomos de carbono. Possuem moléculas longas e lineares, e não são sujeitos a reações de reticulação, podendo ser encontrados em forma de fibras ou filmes (Cheremisinoff, 1998; Goodman, 1998).

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

2.1.4.2 Estrutura do Poliéster Insaturado

Um poliéster insaturado apresenta uma estrutura composta geralmente de três componentes básicos: ácidos saturados, ácidos insaturados e glicóis. No caso de um poliéster de uso geral, estes componentes consistem de ácido ou anidrido ftálico, ácido fumárico ou anidrido maléico, propileno glicol e um monômero vinílico, comumente o estireno (Figura 2.3). Cada um desses componentes tem uma função básica na obtenção da resina poliéster. O ácido insaturado fornece os pontos reativos para as ligações cruzadas; o ácido saturado determina o grau de espaçamento ou concentração das moléculas do ácido insaturado ao longo da cadeia do poliéster, e o glicol, naturalmente, proporciona os meios para a esterificação e a ponte entre os ácidos para formar o polímero. O monômero vinílico dissolve o polímero formado durante a reação de esterificação e serve de ponte de ligação (reticulação) entre os pontos de insaturação presentes na cadeia do poliéster (Goodman, 1998).

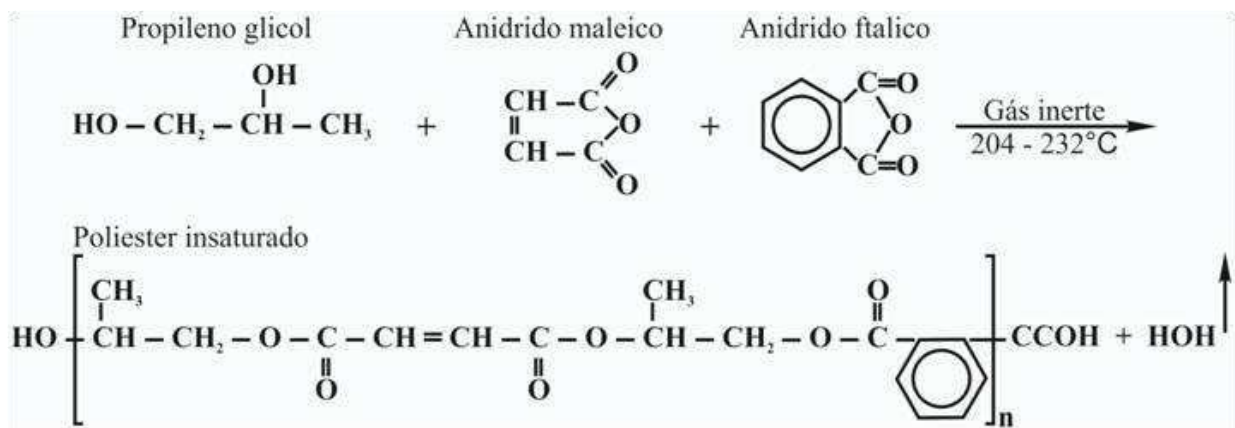


Figura 2.3 Representação da reação de obtenção do poliéster insaturado.
Fonte: Goodman (1998).

2.1.4.3 Poliéster Ortoftálico

Os poliésteres denominados ortoftálicos são considerados, do ponto de vista de aplicação, como de uso geral, e são assim chamados, por terem como ácido, o ácido ortoftálico (Figura 2.4).

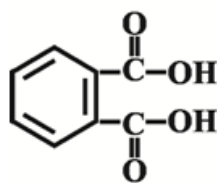


Figura 2.4 Estrutura química do ácido ortoftálico.

Fonte: Autoria própria.

A resistência química de um poliéster está ligada principalmente ao seu índice de acidez, quantidade de grupos ésteres formados e densidade das ligações cruzadas. Quando se produz uma resina poliéster insaturada partindo-se do ácido ortoftálico (Figura 2.4), os dois radicais ácidos interferem entre si na cadeia do polímero em formação, fazendo com que essa cadeia seja mais curta. Essa interferência ocorre com o ácido ortoftálico em razão da proximidade desses radicais ácidos na molécula do material. Além disso, uma resina com presença de ácido é muito difícil de ser produzida com baixo índice de acidez, sem usar o artifício de adicionar um excesso de glicol no momento da reação. Esta adição de glicol em excesso prejudica a resistência química do polímero final em razão da afinidade que este tem pela água. A Figura 2.4 mostra a estrutura química da resina poliéster ortoftálico (Cavalcanti, 2006; Cheremisinoff, 1998; Goodman, 1998).

2.5.1 Interface matriz-fibra

A interface entre a fibra e a matriz pode ser definida como a superfície limite entre elas, por meio da qual ocorre a descontinuidade de alguns parâmetros, sendo uma região de espessura finita, que se inicia na interface fibra/matriz e se prolonga para dentro da matriz. Essa região tem gradientes nas propriedades físicas, que influenciam significativamente o desempenho do compósito final (Rezende et al; 2011).

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 o fenômeno de contração, é necessário que ocorra um molhamento perfeito do reforço pela resina (Cavalcanti, 2006).

O comportamento de diversos sistemas multicomponentes tais como materiais compósitos, blendas poliméricas e camadas pigmentadas, depende não somente da composição, morfologia e das propriedades dos constituintes, mas também da natureza da região interfacial (Shackelford, 2005; Mitchell, 2004; Hage, 1989). A interfase entre o reforço e a matriz é muito importante, sendo considerado o terceiro componente de um compósito. A boa transferência das tensões de cisalhamento é favorecida pela adequada adesão fibra-matriz polimérica, tem influencia na rigidez, tenacidade e comportamento de falha do comportamento de falha do compósito, principalmente em determinadas condições ambientais (Rezende et al; 2011).

A adesão inadequada entre as fases envolvidas poderá provocar o início de falhas interfaciais, comprometendo o desempenho do compósito (Shackelford, 2005; Mitchell, 2004).

2.2 FIBRAS VEGETAIS

2.2.1 Características gerais

As fibras vegetais são estruturas alongadas de secção transversal vazada e arredondadas, são distribuídas por o todo vegetal podendo ser classificadas de acordo com a origem anatômica como fibras de caule, fibras de folha, fibras de superfície (Vasconcelos, 2011).

As fibras vegetais, de acordo com sua natureza, e dependendo da parte e do tipo de vegetal ao qual foi extraído, podem ser classificadas como (Anunciado, 2005):

Fibras de gramíneas: Retiradas das hastes das plantas monocotiledôneas, a exemplo dos cereais (trigo, aveia, cevada, arroz e outros), junco, bambu e bagaço-de-cana.

Fibras de folhas: Retiradas ao longo do comprimento da folhas; exemplos típicos incluem o abacá, sisal e henequém.

Fibras de caule: Retirados do interior da casca (caule) de hastes de plantas, tendo como exemplos, linho, juta, cânhamo e kenaf.

Fibras de sementes e frutos: Os exemplos mais comuns são o algodão, a paina e a esponja de luffa cilíndrica.

Fibras de madeira: São fibras provenientes do xilema de vegetais (angiospermas e gimnospermas), como exemplos podemos citar os eucaliptus, abetuos, pinus, entre outros.

Botanicamente, as fibras são células vegetais esclerenquimatosas de forma tipicamente prosenquimatosas, ou seja, apresentam comprimento excessivamente maior que a largura, estes comprimentos são variados. Comercialmente, as fibras são os filamentos constituídos de feixes de fibras-celulares. As fibras-celulares individuais são unidas entre si e com as partes vizinhas da planta por pectina. Cada fibra-celular individual possui uma estrutura complexa formada por paredes celulares que circundam o lúmen. Essas paredes recebem denominações sucessivas da parte externa para interna: primária, secundária, terciária, e assim por diante. As paredes são constituídas de camadas formadas por feixes de microfibrilas que crescem no vegetal em forma de espiral, com diferentes orientações angulares. A Figura 2.5 representa uma fibra-celular, a qual pode conter regiões de seção transversal circular, oval ou achatada (Fagury, 2005).

As fibras vegetais, por serem compostas principalmente de celulose, são também chamadas de fibras celulósicas ou lignocelulósicas. O principal componente das microfibrilas é a celulose. As microfibrilas de celulose estão interligadas por uma rede de moléculas de hemicelulose. A rede celulose-hemicelulose é permeada por pectinas. Outro importante

constituente das paredes é a lignina, substância hidrofóbica impregnada principalmente nas camadas próximas à superfície, e que tem função de sustentação (Fagury, 2005).

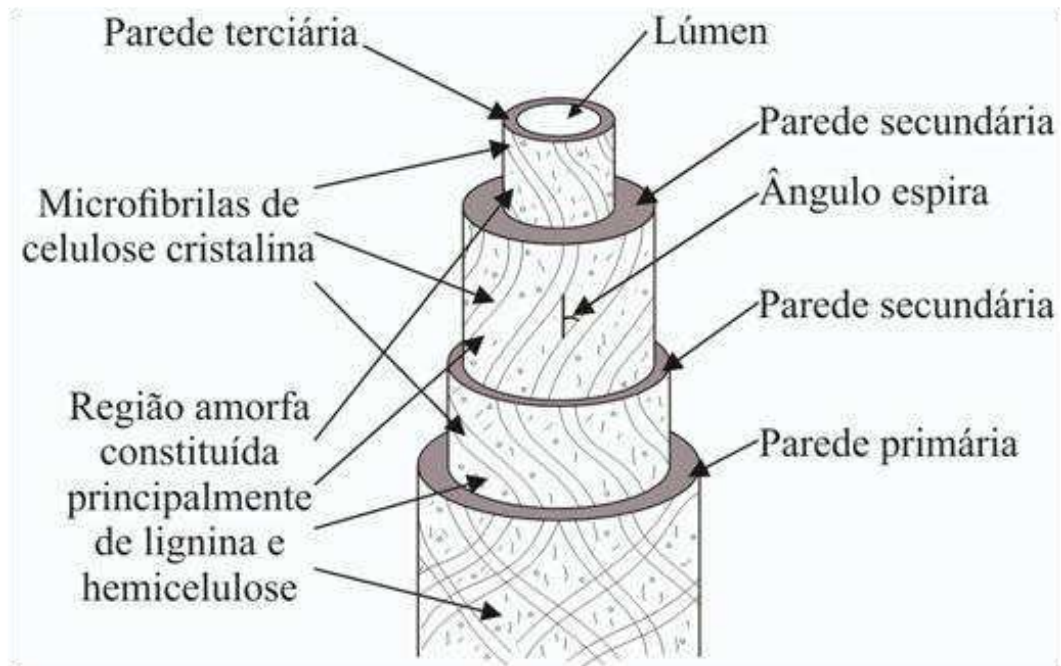


Figura 2.5 Representação de uma fibra-celular contendo as paredes primárias, secundárias, terciárias, e suas constituições: o lúmen e o ângulo espiral.

Fonte: Fagury (2005).

A celulose, considerada o principal constituinte dos organismos vivos é um polímero linear formado por unidades de celobiose (estrutura formada por moléculas de β -D-glicopirranose). Suas cadeias se juntam na constituição da estrutura vegetal formando regiões cristalinas, devido à formação de pontes de hidrogênio intra e intermoleculares (gerando rigidez e arranjo tridimensional organizado às cadeias), intercaladas por regiões amorfas. O alinhamento das moléculas leva à formação das micelas, que se unem para formar as microfibrilas. As microfibrilas se unem formando as macrofibrilas que juntas com as polioses e a lignina formam a parede celular (Vasconcelos, 2011).

As propriedades apresentadas pelas fibras vegetais são dependentes da idade da planta, tipo de solo, condições climáticas, do local e das condições de processamento, bem como de sua estrutura e composição química (Carvalho e Cavalcanti, 2006; Gowda et al., 1999).

As fibras vegetais estão em todas as partes do mundo. A disponibilidade de grandes quantidades destas fibras com propriedades bem definidas é um pré-requisito para o uso bem sucedido destes materiais. Para algumas aplicações técnicas, as fibras devem ser especialmente preparadas ou modificadas com relação a:

- Homogeneização das propriedades das fibras;
- Grau de polimerização e cristalização;
- Boa adesão entre a fibra e a matriz;
- Resistência à absorção de umidade;
- Propriedade anti-chama.

As fibras vegetais oferecem algumas vantagens sobre as fibras de vidro tais como:

- As fibras vegetais são matérias-primas renováveis e sua disponibilidade é quase ilimitada.
- Em plásticos reforçados com fibras vegetais quando sujeito ao processo de combustão, a quantidade de CO₂ liberada das fibras é neutra com respeito à quantidade absorvida durante o crescimento.
- A natureza abrasiva das fibras vegetais é muito menor quando comparada com as fibras de vidro, e conduz a vantagens com respeito à técnica, a reciclagem do material ou processo do compósito em geral.

As fibras vegetais quando introduzidas na matriz como reforço, melhoram consideravelmente as propriedades mecânicas em tração, impacto e flexão, contudo esta melhora é muito menor do que a obtida pela introdução da fibra de vidro. Portanto, as fibras vegetais podem ser usadas em compósitos poliméricos onde as propriedades mecânicas exigidas não são muito altas (Mohanty e Misra, 1995).

Em relação às fibras sintéticas, as fibras vegetais apresentam como vantagens: o baixo custo; baixa densidade; são recursos renováveis e biodegradáveis; possuem baixa

abrasividade, e apresentam boa resistência à quebra durante o processamento. Além disso, possui módulo e resistência que as tornam viáveis para reforço em matrizes poliméricas. As desvantagens observadas no uso das fibras vegetais dizem respeito à sua incompatibilidade com muitas matrizes poliméricas, elevada susceptibilidade ao ataque por fungos, baixa resistência em meios alcalinos e ácidos e à alta absorção de água (Mohanty e Misra, 1995).

A absorção de umidade por parte das fibras vegetais pode resultar em inchamento das fibras e o interesse na estabilidade dimensional dos reforços em compósitos não pode ser ignorado. No compósito, a absorção de umidade é minimizada devido ao recobrimento da fibra pelo polímero. A absorção de umidade das fibras pode ser reduzida através de modificações químicas, mas, isto implica em acréscimo no custo do produto. Uma boa adesão fibra/matriz também pode diminuir a razão e quantidade de água absorvida pelo compósito.

Outro obstáculo no uso de fibras vegetais em compósitos poliméricos está associado à baixa temperatura de processamento permitida devido à degradação da fibra lignocelulósica e/ou à possibilidade e emissões de voláteis que poderiam afetar as propriedades dos compósitos. A temperatura de processamento é, portanto, limitada a aproximadamente 200°C, embora seja possível usar altas temperaturas por períodos curtos. Isto limita o tipo de termoplástico que pode ser usado como matrizes em compósitos reforçados por fibras vegetais, de modo que, para estes compósitos, as matrizes termoplásticas mais utilizadas são: polietileno, polipropileno, poli cloreto de vinila (PVC) e poliestireno (Rowell et al., 1996).

2.5.2 Microestrutura e Composição Química das Fibras Vegetais

As fibras naturais de origem vegetal podem diferir significativamente na sua aparência física, mas possuem similaridades que as identificam como uma família. As características das fibras dependem das propriedades dos seus constituintes individuais, da estrutura fibrilar e da matriz lamelar. O composto predominante na parede da célula vegetal é a celulose, formada por cadeias de moléculas de glicose, $C_6H_{10}O_5$, unidas entre si por átomos de oxigênio. Estas cadeias são agrupadas em feixes, formando as micelas. As micelas são agregadas em unidades maiores, as microfibrilas, que possuem uma largura aproximada de

250 Å e reúnem cerca de 2000 moléculas de celulose na seção transversal. As microfibrilas agregam-se em fibrilas mais grossas, ditas macrofibrilas, com largura de 0,4 µm e 5×10^5 moléculas de celulose na seção transversal (D'Almeida, 1981).

Após a divisão celular, as células ou fibro-células, como também são chamadas, permanecem unidas por uma camada intercelular, denominada lamela média, constituída principalmente pela substância lignina. Cada fibro-célula é constituída por parede primária, parede secundária e o lúmen. Nas paredes primárias, as fibrilas apresentam uma estrutura reticulada. De acordo com a orientação das microfibrilas, a parede secundária pode ser dividida em três camadas: S1, S2 e S3. Na camada mais próxima da parede primária que é denominada S1, as microfibrilas são arranjadas em espirais formando ângulos com o eixo longitudinal da fibra e possui espessura aproximada de 2 µm. A camada seguinte, a S2, é bem mais espessa e as microfibrilas são arranjadas na forma de uma espiral mais íngreme. A camada S3 é semelhante à camada S1 e suas microfibrilas estão dispostas, aproximadamente, na direção perpendicular ao eixo da fibra e, às vezes apresenta-se revestida por outra, a camada verrugosa. O lúmen é o canal central existente na parte interna da fibra que contém resíduos do protoplasma da célula (D'Almeida, 1981).

2.5.3 Fibras de Caroá

Antes do ano de 1810, o caroá era conhecido pela sua denominação vulgar. O botânico naturalista paraibano Manuel de Arruda da Câmara foi primeiro a classificá-lo como gênero Bromélia e espécie *Variiegata*, porém sua classificação não prevaleceu. Outras classificações foram feitas depois desse período, porém a que sobressaiu entre demais e utilizada até os dias atuais foi *Neoglaziovia Variiegata*, por Karl Mez (1894). Karl Mez criou o gênero *Neoglaziovia*, contudo utilizou-se o nome específico *Variiegata* dado por Arruda Camara, devido à variação das folhas (Xavier, 1942).

O caroá (*Neoglaziovia Variiegata*) (Figura 2.6) é uma espécie vegetal do grupo das bromeliáceas, distribuída por todo o Semiárido do Nordeste brasileiro, já possuiu grande importância na economia nordestina, na primeira metade do século passado, pela produção de

fibra por indústrias têxteis, porém sua exploração foi posposto com a utilização das fibras de sisal e posteriormente pelas fibras sintéticas (Ribeiro, 2007).



Figura 2.6 Planta do Caroá (*Neoglaziovia Variegata*).

O caroá (*Neoglaziovia variegata*) possui folhas enormes com fibras bastante compridas, bordas reviradas, ciliadas, lançando do centro uma vergôntea de 66-88 cm, da qual brotam flores em cachos, de um azul purpúreo, tendo por fruto uma baga oval, medindo 27 $\frac{1}{2}$ mm a qual encerra algumas sementes (Xavier, 1942).

O ciclo de produção do caroá em fios naturais tem início aos 3 anos de vida da planta, ou quando suas folhas atingem até cerca de 140 cm de comprimento que podem resultar em fibras de 90 a 120 cm. As fibras representam apenas 4 a 5% da massa bruta da folha do sisal. As folhas são cortadas a cada 6 meses durante toda vida útil da planta que é de 6 a 7 anos. Ao final do período é gerada uma haste, a flecha, onde surgem as sementes de uma nova planta (Vasconcelos, 2011).

A celulose, principal componente da parede celular da fibra vegetal, é um polissacarídeo linear, constituído por um único tipo de unidade de açúcar (1,4-β-D-glucopyranose). As propriedades mecânicas das fibras vegetais dependem do tipo de celulose, uma vez que, cada tipo de celulose tem sua geometria celular particular e as condições geométricas é que determinam as propriedades mecânicas.

As hemiceluloses também são polissacarídeos, porém diferem da celulose por serem constituídas de vários tipos de unidades de açúcares, além de serem polímeros ramificados e de cadeias mais curtas.

A lignina é um polímero amorfo, de composição química complexa e de estrutura ainda não totalmente caracterizada; confere firmeza e solidez ao conjunto de fibras de celulose; difere dos polissacarídeos pela sua resistência à hidrólise ácida e pela sua alta reatividade com agentes oxidantes.

As fibras vegetais também contêm materiais que incluem compostos orgânicos de diversas funções químicas e compostos inorgânicos, em menor quantidade. Estes, solúveis em solventes orgânicos, em água, ou ainda em ambos, são normalmente denominados extrativos (Bledzki e Gassan, 1999; D’Almeida, 1987).

Estudos recentes mostram a composição química das fibras de caroá, onde é possível observar o baixo teor de celulose das fibras de caroá quando comparado com outras fibras vegetais (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 Análise química de fibras vegetais

Fibras	Celulose	Hemi-celulose	Lignina	Água
Sisal ¹	65,8	12,0	9,9	10,0
Juta ¹	64,4	12,0	11,8	10,0
Algodão ¹	82,7	5,7	-	10,0
Caroá²	35,5	17,9	30,1	-

Fonte: ¹ Bledzki e Gassan (1999), ² D’Almeida et al. (2006).

2.3 COMPÓSITOS REFORÇADOS POR FIBRAS VEGETAIS

2.3.1 Aspectos estruturais

Os compósitos têm capacidade de combinar as propriedades de dois ou mais polímeros com cargas sintéticas ou naturais em um único produto. Polímeros são combinados com fibras inorgânicas, derivados de carbono (nanotubos, grafeno, ou negro de carbono) ou de fibras vegetais para promover a melhoria em uma propriedade específica, como as elétricas, mecânicas ou térmicas. As fibras curauá têm atraído muita atenção da indústria de polímeros, devido ao interesse das indústrias automotivas do Brasil. Trabalhos recentes demonstraram que os compósitos constituídos por termoplástico reforçado com fibras de curauá são uma maneira eficiente de combinar as propriedades mecânicas e de baixa densidade de fibras vegetais com a estabilidade das matrizes termoplásticas. Além disso, as fibras de curauá possuem propriedades mecânicas específicas semelhantes aos compósitos de fibra de vidro e de qualidade superior a outras fibras de origem vegetal, com a vantagem de menor densidade (Araujo et al; 2013).

Questões ambientais estão assumindo cada vez mais um papel de destaque em nossa sociedade, inclusive condicionando o desenvolvimento tecnológico. Na engenharia dos materiais, este papel se traduz na maior importância atribuída aos materiais cuja fabricação envolva baixo consumo de energia, além de poderem ser renováveis e biodegradáveis. Fibras naturais, tanto de origem animal quanto de origem vegetal lignocelulósicas, atendem a estes requisitos. Ou seja, suas utilizações as caracterizam como ambientalmente corretas em comparação com as fibras sintéticas como o náilon, vidro e carbono. Por esta razão, compósitos reforçados com fibras naturais, sobretudo as lignocelulósicas facilmente cultivadas, têm sido objeto de recentes investigações (Monteiro e Lopes, 2007).

Seleção de materiais é um processo indispensável para os produtos sustentáveis de sucesso, levando em consideração a enorme necessidade e consciência do impacto ambiental, a boa compatibilidade do material do produto com o seu desempenho e capacidade de reciclagem tem recentemente maior prioridade no projeto de produto de engenharia. Devido à

relação intrínseca entre as matérias- primas e sua disponibilidade, usinabilidade, design de produto, custo, reciclagem e desempenho, sob a forma do produto final, técnicas modernas, otimizações, decisões informativos e sistemas especialistas são utilizados para acabar com as seleções de materiais adequados. Os compósitos poliméricos reforçados com fibra natural (NFRPC) tem se tornado muito valiosos, as fibras naturais (tais como cânhamo, sisal, juta, kenaf, linho, etc) são usados como materiais de reforço para matrizes à base de polímero (Al-oqla e Sapuan, 2013).

A utilização de compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais não é recente e as primeiras patentes datam da década de 60. A partir da década de 90, uma visão mais realística ou “ecológica” do processo industrial fez ressurgir o interesse em materiais renováveis, tais como as fibras e os óleos vegetais, principalmente na indústria automotiva. Associado aos aspectos ecológicos há também os aspectos tecnológicos e as vantagens econômicas no uso destes materiais. A questão social é também um forte argumento para o incentivo da produção destes compósitos, uma vez que estes materiais são geralmente oriundos de regiões economicamente pobres (Silva, 2003).

Compósitos surgiram assim como biomateriais utilizando as fibras de plantas como reforços. A consciência da à escassez de recursos não renováveis e uma demanda para a sustentabilidade ambiental têm levado a um interesse cada vez maior em biocompósitos. Fibras vegetais, como linho, sisal e bambu, oferecem diversas vantagens econômicas, técnicas e ecológicas mais do que as fibras sintéticas para reforçar compósitos poliméricos. A ampla disponibilidade, a imagem ecológica de fibras vegetais de baixo custo, baixa densidade, propriedades de alta e retratá-los como substitutos potenciais aos compósitos reforçados com fibras sintéticas, as fibras vegetais e seus compósitos têm demonstrado ser uma grande oportunidade para a captação de mercado (Shah, 2013).

As fibras vegetais mais utilizadas como material de reforço em compósitos poliméricos são as fibras de sisal, coco, juta e banana, além de fibras de madeira, bagaço e bambu (Rowell et al., 1997).

A aplicação de compósitos poliméricos reforçados com fibra natural tem crescido rapidamente em diversas áreas da engenharia, o seu desenvolvimento tem se tornado um assunto de grande interesse na ciência dos materiais. Biocompósitos são sustentáveis e biodegradáveis na natureza. O PLA é polímero a base de biomateriais, derivado a partir da fermentação de milho, batata, beterraba sacarina, e outros materiais com base de agricultura. Possui boas propriedades mecânicas e podem ser processados facilmente para várias aplicações. No entanto, ele possui algumas desvantagens como alta fragilidade, sensibilidade à água e baixa resistência impact. A adição de fibras é uma forma conveniente de adaptar e desenvolve as propriedades mecânicas, físicas e térmicas ao PLA. Três tipos diferentes de fibras naturais (urtiga, Optiva Grewia e sisal) foram incorporados ao polímero PLA para desenvolver compósitos laminados usando uma técnica de compressão a quente. Os resultados experimentais indicam que a incorporação de esteiras de fibras naturais em matriz PLA melhora significativamente em relação ao polímero puro. Havendo uma redução 10-44% no coeficiente de atrito e redução de mais de 70% na taxa de desgaste específico de compósitos desenvolvidos em relação ao PLA puro (Bajpai et al., 2012).

As propriedades mecânicas destes compósitos dependem de alguns fatores, tais como fração volumétrica, razão de aspecto, distribuição e orientação das fibras, adesão matriz-fibra e composição química da matriz polimérica e das fibras. As resinas termorrígidas mais utilizadas nestes compósitos são as fenólicas, poliésteres, epóxi e poliamidas. Dentre as resinas termoplásticas, o destaque é para o polietileno de baixa densidade e o polipropileno.

Compósitos de matriz de resina estão constantemente suscetíveis a ambiente aquoso. A água difunde para a matriz pode contribuir para o relaxamento da tensão de polimerização, em certa medida. Além disso, a água absorvida pode expandir a matriz polimérica e induzir fissuras e causar expansão higroscópica depois de ocupar os micros vazios e volume livre entre as cadeias. Isso pode aumentar o volume de massa de resina/compósitos e possivelmente diminuir lacunas marginais gerados pela contração de polimerização. Por outro lado, a água pode eluir alguns monômeros residuais e outros componentes a partir de certos compostos de resina, resultando numa maior encolhimento, menor massa, as propriedades mecânicas enfraquecidas. Portanto, a mudança dimensional de um compósito de resina imerso em água é um tanto complicada e é dependente de material (Yong-Jie et al., 2010).

As matrizes termorrígidas apresentam um enorme potencial para a utilização das fibras vegetais, pois, neste caso, podem utilizar métodos de processamento bastante simples e de baixo custo, além de utilizar com vantagem, fibras contínuas, sem a necessidade de se promover alterações nos procedimentos e/ou equipamentos de processamento. Estima-se que mais de três quartos de todas as matrizes de compósitos poliméricos sejam constituídas por polímeros termorrígidos (Mattews e Rawlings, 1994; Paiva e Frollini, 1999).

Entre outras inúmeras aplicações, os compósitos com fibras vegetais possuem um enorme potencial de aplicação estrutural e não-estrutural na indústria automotiva. A indústria automotiva europeia se destaca neste ramo, principalmente a Alemanha, que trabalha no intuito de produzir veículos com todos os componentes recicláveis ou biodegradáveis. Além dos aspectos “ecológicos”, o principal incentivo para a utilização destes compósitos é a redução de custo e peso dos veículos. Uma importante característica destes materiais é a capacidade de fraturar sob impacto sem soltar lascas. Outras vantagens são: estabilidade dimensional e resistência às intempéries ambientais (Silva, 2003; Suddell et al., 2002).

Monteiro e Lopes (2007) estudaram a resistência aos impactos de compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras de curauá (*Ananas erectifolius*). Foram produzidos corpos de prova na forma de barras e seção quadrada, com percentuais de até 40% em peso de fibras alinhadas ao longo de todo o comprimento. Os resultados mostraram que a resistência ao impacto aumentou sensivelmente com o aumento da quantidade relativa de fibra de curauá reforçando o compósito. Este desempenho pode ser diretamente associado à dificuldade de ruptura imposta pelas fibras bem como ao tipo de trincas resultantes da interação fibra de curauá/matriz de poliéster que ajudam a absorver a energia do impacto.

A decomposição dos compósitos reforçados com fibras modificadas quimicamente demonstra que suas temperaturas são superiores em relação aos compósitos reforçados com fibras não tratadas. Além disso, as resistências à tração dos compósitos de resina epóxi reforçadas podem ser aumentadas de 80% a 117%, em comparação com a da resina epóxi pura. Além disso, os compósitos reforçados com fibras de folhas de abacaxi modificados exibiram melhores propriedades térmicas do que outras amostras. A presença de grupos hidróxido e outros grupos polares nas fibras naturais conduzirem a fraca ligação interfacial

entre as fibras e polímeros relativamente hidrofóbicos; essas propriedades devem ser melhoradas por meio de tratamentos interfaciais. O custo das fibras sintéticas continua a aumentar. Por outro lado, as fibras naturais são baratas e não provocam reações alérgicas no organismo humano. Além disso, as vantagens de tais fibras mais fibras sintéticas ou artificiais incluem baixa densidade, baixo custo, capacidade de reciclagem e biodegradabilidade. Estas vantagens tornam as fibras naturais de um substituto potencial para as fibras de vidro em materiais compósitos (Yeng-Fong et al., 2012).

Lopes et al. (2007) avaliaram o efeito do tratamento de alcalinização, conhecido como mercerização, sobre o desempenho mecânico e as características de fratura de compósitos com matriz poliéster reforçada com fibras de curauá mercerizadas sob condições (tempo, concentração de NaOH) por tempos distintos. Os resultados mostraram um decréscimo da resistência dos compósitos, embora não expressivo, com a mercerização das fibras. A análise da fratura revelou que a mercerização tende a causar degradação parcial da fibra de curauá, comprometendo o desempenho mecânico do compósito. Quantidades de fibra superiores a 20% em peso compensam as trincas que causam ruptura em virtude da elevada resistência de cada fibra que, no conjunto, oferecem condição de reforço.

Monteiro e Rangel (2007) investigaram o efeito da micromorfologia da fibra de curauá (*Ananas erectifolius*), constituída de um feixe natural de filamentos paralelos, sobre as propriedades mecânicas de compósitos de matriz poliéster com fibras de curauá como reforço contínuo e alinhado. Os autores concluíram que as propriedades dos compósitos foram afetadas pela micromorfologia das fibras. Reentrâncias agudas na superfície da fibra agem como concentradores de tensão do lado da resina, reduzindo a resistência do compósito. Resultados experimentais, em confronto com a estimativa teórica baseada na Regra das Misturas, para a resistência mecânica dos compósitos mostraram reduções de até 2,1 vezes o valor experimental. Para o valor experimental esta discrepância foi interpretada como consequência da impossibilidade de se ter absoluta penetração da resina nas partes mais agudas das reentrâncias entre os filamentos da fibra de curauá.

Silva et al. (2007) realizaram um estudo comparativo das propriedades mecânicas em flexão de compósitos reforçados com fibras de vidro, fibras de curauá (*Ananas erectifolius*) e

compósito híbrido vidro/curauá. Também foram realizados ensaios de absorção de água para os três laminados e analisado a influência da absorção nas propriedades mecânicas dos compósitos. Os resultados mostraram que as propriedades do compósito híbrido foram muito próximas do compósito de fibra de vidro, enquanto que o compósito de curauá teve um desempenho bastante inferior. Nos ensaios de absorção de água, os autores observaram que a hibridização foi eficiente no sentido de diminuir a absorção de água do compósito de curauá. O compósito híbrido desenvolvido mostrou ser um promissor substituto para os laminados de fibra de vidro mesmo em aplicações de contato direto com água, como em reservatórios e tubulações.

Ishizaki et al. (2006) estudaram as propriedades mecânicas de compósitos poliméricos, com matriz de polipropileno reforçados com fibras de coco verde em diferentes proporções e obtidos em diferentes temperaturas de processamento e velocidade de rotação, assim como suas características morfológicas. A partir dos resultados obtidos, os autores concluíram que o uso da câmara de mistura Haake para a obtenção dos compósitos de polipropileno e fibra do coco verde não foi eficiente, já que o desempenho dos compósitos foi semelhante ao polipropileno puro. Dentre as condições de processamento, à temperatura de 170°C, a velocidade do rotor de 60rpm e o teor de fibra de coco verde de 30% forneceram o melhor desempenho quanto a flexão, conforme corroborado pelas análises de microscopia eletrônica de varredura.

Nóbrega et al. (2005) estudaram as propriedades mecânicas de compósitos poliméricos com matriz poliéster insaturado, reforçados por fibras curtas de caroá e macambira provenientes da região de Pocinhos - PB. Os resultados indicaram que as resistências à tração dos compósitos reforçados com fibras de caroá e macambira apresentam desempenhos superiores à da matriz para teores acima de 24% e 34%, respectivamente. Acreditam os autores que o desempenho superior apresentado pelos compósitos reforçados com fibras de Caroá em relação aos reforçados com Macambira, esteja associado tanto ao menor diâmetro médio das fibras de Caroá que promove aumento na área de contato fibra/matriz, quanto às propriedades individuais daquelas fibras. Os módulos e resistências ao impacto dos compósitos investigados foram superiores ao da matriz o que foi associado às propriedades mecânicas individuais das fibras de reforço e às suas razões de aspecto.

Silva e Frollini (2005) estudaram as propriedades de compósitos com matriz fenólica e reforçada com fibras naturais (lignocelulósicas de sisal e celulose de algodão). Os resultados mostraram que a resistência ao impacto, dos compósitos fenólicos com celulose microcristalinas e lignocelulósicas, são superiores ao da matriz termorrígida. Os autores concluíram que as fibras não agem simplesmente como carga e sim como reforço da matriz, assim como a fibra lignocelulósica também apresenta um desempenho superior ao compósito celulósico.

Razera et al. (2005) estudaram a influência da variação do comprimento e quantidade das fibras de coco e banana nas propriedades mecânicas de compósitos fenólicos reforçados com as fibras naturais. Os autores concluíram que a variação do comprimento e a quantidade de fibra nos compósitos de matriz termorrígida fenólica reforçados com fibra de banana são bastante influenciados por esses parâmetros, e exercem menor influência nos compósitos reforçados com fibra de coco. Nos ensaios de resistência ao impacto dos compósitos, fibras de coco apresentaram um desempenho inferior aos da fibra de banana, muito provavelmente devido ao maior teor de celulose desta última. As cadeias de celulose são responsáveis pela cristalinidade das fibras. O que por sua vez exerce grande influência nas propriedades mecânicas apresentadas pelas fibras e conseqüentemente pelos compósitos por elas reforçados.

A queda nas propriedades mecânicas dos compósitos baseados termocura observados em ambientes úmidos pode ser atribuída à degradação na interface matriz/reforço ou interfase. Em compósitos reforçados com fibra de vidro, a rede matricial parece estar altamente modificada ao longo de vários micrometros em volta de cada monofilamento, devido a uma cura incompleta, ou por efeitos de plastificação no tratamento de fibras. O coeficiente de difusão depende vários parâmetros (temperatura, composição da resina e agentes de cura, dentre outros). A presença de cargas modifica o comportamento de absorção de água, dependendo das propriedades da carga (aderência da resina com carga), desse modo, os valores obtidos para o coeficiente de difusão podem variar entre os vários estudos. Recentemente diversos estudos demonstram que o coeficiente de difusão não é afetado pelo uso de uma distribuição aleatória de fibra e que a distribuição da fibra tinha pequeno impacto sobre o coeficiente de difusão desde que as fibras não estejam em contato, quando isto

acontece, a cinética de difusão de água no compósito pode ser altamente modificada (Joliff et al., 2012).

Carvalho et al. (2004) investigaram o comportamento mecânico em tração de compósitos poliéster/fibras das folhas de abacaxi (*Ananas comosus*) em função do tipo e tempo de tratamento das fibras. Os resultados mostraram que as propriedades de tração foram pouco afetadas pelo tratamento com detergente e que o tratamento com solução aquosa de NaOH promoveu melhoras na resistência à tração e, principalmente, no módulo dos compósitos. A elevação das propriedades mecânicas dos compósitos com o tempo de imersão alcalina foi atribuída à melhor impregnação da fibra pela resina e, conseqüentemente, da interface fibra/matriz o que aponta para uma boa perspectiva de aplicação comercial.

Medeiros et al. (2003) estudaram o comportamento mecânico em tração de compósitos de matriz fenólica reforçado por tecidos híbridos de juta e algodão em função das características dos tecidos e da orientação das fibras para desenvolver um material que seja adequado em aplicações estruturais leves. Os autores concluíram que, dentre as propriedades medidas, a propriedade mais sensível ao ângulo de teste e ao tipo de tecido usado é a resistência à tração. Concluíram ainda que, melhores propriedades mecânicas foram obtidas na direção das fibras de juta e a caracterização por MEV das amostras possibilitou constatar que as fibras de juta possuem maior adesão com a resina fenólica do que as fibras de algodão.

Laranjeira e Carvalho (2002) investigaram o efeito do teor de fibras nas propriedades mecânicas em tração de compósitos de poliéster insaturado reforçados com fibras singelas unidirecionais de juta. Os autores concluíram que as propriedades em tração aumentam com o teor de fibras para os compósitos testados na direção das fibras e que este aumento foi bem mais significativo que os observados para compósitos semelhantes reforçados por tecidos de juta. As propriedades dos compósitos testados transversalmente às fibras foram bem inferiores às da matriz e quase que independentes do teor de fibras. A incorporação das fibras aumentou a resistência ao impacto transversal dos compósitos.

2.3.2 Efeitos da sorção de água

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; Andreopoulos e Tarantili, 1998).

Rao et al. (1981) estudaram as características de absorção umidade em compósitos de matriz poliéster e epóxi reforçados com fibras de juta. Os estudos foram conduzidos sob umidade constante e temperatura ambiente. Compósitos com fibras de juta unidirecionais não tratadas e resinas poliéster e epóxi foram fabricados usando a técnica de bobinagem. Foram curados à temperatura ambiente por 24 horas sob pressão de 40 psi (275,8 kPa), seguido de pós-cura à 100°C por 1 hora. As amostras foram cortadas e as bordas seladas e, em seguida, secas à 100°C. As amostras secas foram imersas em água à temperatura ambiente ($25 \pm 2^\circ\text{C}$), periodicamente retiradas da água, secas com tecido de baixa absorção e seu peso registrado em balanças de alta precisão. Os autores observaram que a absorção aumenta com o aumento da fração volumétrica de fibra, ao passo que o tempo necessário para atingir o equilíbrio de absorção diminuiu com o teor de fibra, o que foi atribuído ao aumento da difusividade no compósito sob tais condições.

Elzubair e Suarez (2012) verificaram que os compósitos demonstram uma mudança gradual nas propriedades mecânicas e dos 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, polar e hidrofílica, enquanto os termoplásticos são em sua grande maioria não polares e hidrofóbicas então essa falta de compatibilidade leva a má adesão, da qual, por sua vez resulta em 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 compatível com a matriz, ou através da introdução de um agente de acoplamento que adere bem em ambas, tanto nas fibras quanto a matriz. Os adesivos na parede celular da fibra (tais como lignina, pectina, e hemicelulose) são responsáveis pela ligação de microfibrilas de celulose em conjunto, bem como por se juntar fibras adjacentes em conjunto para formar feixes de fibras.

Sensarzadeh e Amiri (1985) estudaram o efeito interfacial no compósito poliéster insaturado reforçado com fibra de juta. O pré-tratamento da fibra com tetrahidrofurano, poliacetato de vinila e ácido acrílico nas propriedades de impacto, tração e absorção de água, bem como as reações químicas ocorridas no sistema, foi estudado. Os autores concluíram que o tratamento com tetrahidrofurano levou a um decréscimo nas propriedades de impacto e absorção de água. As propriedades dos compósitos pré-tratados com poliacetato de vinila tiveram uma melhora limitada, enquanto que os tratados com ácido acrílico apresentaram altas propriedades mecânicas e baixa absorção de água.

Idriss et al. (1994) estudaram as propriedades mecânicas e físicas de filmes curados com radiação ultra-violeta, produzidos a partir de formulações com acrilato de uretano em combinações com monômeros, fotoiniciador e plastificantes. Seis formulações foram preparadas com acrilato de uretano e os aditivos, para cobrir os tecidos de juta e curá-los com radiação Ultra-Violeta. Os filmes preparados com essas formulações foram caracterizados para se determinar as formulações capazes de melhorar as propriedades da juta. Os autores concluíram que a resistência tênil aumentou em torno de 80%, a elongação mais de 300% e a redução da absorção de água ficou em torno de 60%.

Tran et al.(2013) investigaram uma abordagem integrada micromecânica físico - químico é aplicado para investigar a compatibilidade interfacial fibra - matriz e adesão de compósitos de fibra de coco naturais. Medições de molhagem das fibras e as matrizes foram realizadas para obter os seus ângulos de contato com equilíbrio estático em vários líquidos, utilizados para estimar as energias de superfície que compreendem diversos componentes. A adesão foi calculada para cada sistema composto, em conformidade. Além disso, a química de superfície da fibra é analisada por espectroscopia de fotoelétrons de raios-X (XPS) para obter mais informações sobre os grupos funcionais na superfície da fibra, auxiliando na compreensão sobre interações nas interfaces compostas. Os resultados sugerem que a adesão interfacial maior de fibras de coco e com fluoreto de polivinilideno comparado com polipropileno pode ser atribuída a uma interação físico-química mais elevada da fibra-matriz correspondente com o trabalho de aderência. Embora a melhoria da adesão interfacial de fibras de coco, com anidrido maleico enxertado em polipropileno em comparação com o polipropileno pode provavelmente ser atribuída a um mecanismo de adesão química. De acordo com as

avaliações de interface, a resistência à flexão no sentido longitudinal dos compósitos é amplamente correlacionada com a sua adesão interfacial.

Marcovich et al. (1999) investigaram a difusão de umidade em compósitos de matriz poliéster insaturado e pó de madeira exposto em ambiente mantido a temperatura ambiente e diferentes umidades relativas. Equações obtidas pelo balanço de massa microscópico para difusão de vapor em sólidos foram usadas para determinar o coeficiente de difusão efetivo no pó de serra, resina pura e dos compósitos. Os autores também investigaram o efeito do tamanho e forma das amostras dos compósitos no teor de umidade final. Diferentes modelos foram usados para prever o coeficiente de difusão efetivo em função da concentração dos enchimentos. Os autores concluíram que os teores de umidade no equilíbrio dos componentes estudados foram dependentes do tamanho e forma das amostras testadas. Este é um aspecto importante a ser levado em conta quando a aplicação prática destes materiais está sendo considerada. Os autores também concluíram que o coeficiente de difusão dos enchimentos foi aproximadamente 3 ordens de grandeza menor do que a difusividade na matriz. Este comportamento foi atribuído à formação de pontes de hidrogênio entre grupos polares do pó de serra e as moléculas de água, que retardam a difusão dentro das partículas de madeira.

Xie et al. (2011) verificaram o comportamento higroscópico como sendo uma característica inerente das fibras naturais que podem influenciar as suas aplicações como tecidos e reforços em compósitos. A cinética de sorção de vapor de água no algodão, filtro de papel, o linho, cânhamo, juta, fibras de sisal, foram determinados utilizando um aparelho de sorção de vapor dinâmico e os resultados foram analisados através do uso paralelo de um modelo cinético exponencial (PEK). O modelo PEK, que é constituído por componentes de sorção rápidas e lentas, exibiu histerese em termos de massa para ambos os processos entre a adsorção e dessorção. A histerese derivado do processo de sorção lenta era menos do que a partir do processo rápido para todas as fibras testadas. O modelo PEK pode ser usado para ajustar com precisão as medidas experimentais. As curvas de cinética de sorção de água mostraram ser lentas tanto quanto rápidas na parede celular da fibra exibindo histerese entre a adsorção e dessorção. Onde, as diferentes fibras naturais exibiram uma dinâmica variável de comportamento de sorção de vapor de água.

Sreekala et al. (2002) estudaram a cinética de sorção de compósitos de fenol-formaldeído reforçado por fibras de palma e nos híbridos fenol-formaldeído/palma/fibra de vidro em função do teor e do tratamento superficial das fibras e da variação da temperatura (30, 50 e 70°C). As amostras foram tratadas superficialmente com uma solução de hidróxido de sódio (5% por 48h, à temperatura ambiente) e com agentes de acoplamento do tipo silano e isocianato. De acordo com os resultados verificou-se que o valor máximo de sorção foi para o compósito com fibras não tratadas e no teor de 10%, e submetidas à temperatura de 30°C. O tratamento alcalino diminuiu a sorção de água dos compósitos, o que foi atribuído a uma reação química entre os grupos hidroxilas da celulose e da lignina com as fibras tratadas, reduzindo seu caráter hidrofílico devido a diminuição de umidade das mesmas. O tratamento com os agentes de acoplamento aumentou a sorção de água nos compósitos, tendo em vista que não houve uma boa interação fibra-matriz. Dessa forma os autores concluíram que a sorção de água depende não só da estrutura da fibra e do polímero, mas também da interação entre a fibra e matriz.

Srihari et al. (2002) estudaram o comportamento da absorção de umidade de amostras de compósitos epóxi/vidro e de resina epóxi imersas em água do mar preparadas artificialmente (segundo norma ASTM D1141) e água destilada mantida à 333 K. Os resultados mostraram que tanto a absorção de umidade no equilíbrio quanto a taxa de difusão foram mais altas nas amostras imersas em água destilada do que os da água do mar artificial. Tanto as amostras de compósitos quanto de resina pura imersas em água destilada e em água do mar artificial exibiram comportamento Fickiano. Também foi observado que o tempo de saturação para as amostras imersas em água do mar foi mais alto do que das imersas em água destilada, confirmando que o processo de difusão é mais lento para amostras imersas em água do mar. A regra das misturas para estimar a absorção de umidade foi verificada para ambos ambientes de imersão. O desvio entre os valores obtidos experimentalmente foi de 4% mais baixo do que os valores calculados teoricamente para imersão em água destilada e de 7% mais alto do que os valores calculados teoricamente para imersão em água do mar.

Thwe e Liao (2002) estudaram o efeito do teor de fibra, comprimento da fibra e do polipropileno anidrido maléico (PPAM) como agente compatibilizante nas propriedades tenséis e de flexão de compósitos de polipropileno reforçado com fibras curtas de bambu e

compósitos híbridos de polipropileno reforçado por fibra de vidro-bambu, sendo ambos os sistemas fabricados pelo método de moldagem por compressão. O comportamento de sorção e efeito do envelhecimento ambiental nas propriedades tênses de ambos os sistemas foram estudados em amostras imersas em água à 25°C por 1200 h. Os autores concluíram que um aumento de até 40% (em peso) no teor de fibra de bambu no compósito polipropileno reforçado com fibra de bambu resultou no aumento de 60% no módulo de flexão. Segundo os autores, depois do envelhecimento em água por 1200 h, a redução nas propriedades do sistema híbrido foi quase 2 vezes menor do que o sistema não híbrido. Também foi observado, que o agente compatibilizante (PPMA) usado na resina de polipropileno resultou no decréscimo do nível de absorção na saturação e melhorou as propriedades mecânicas de ambos os sistemas, e que o envelhecimento em água a 25°C causou degradação nas propriedades mecânicas de ambos os sistemas, degradação da fibra de bambu e da adesão interfacial. Em geral, foi mostrado que a hibridização com fibra sintética tanto melhorou as propriedades mecânicas e o comportamento de resistência à umidade, como também aumentou a durabilidade do compósito com fibra vegetal.

Pavlidou e Papaspyrides (2003) estudaram a absorção e reabsorção de água em compósito poliéster insaturado e tecido de vidro caracterizado por diferentes resistências interfaciais, usando teste de cisalhamento para indicar a degradação interfacial e conseqüentemente a contribuição interfacial durante a absorção. Os resultados mostraram que uma interface forte conduz a um comportamento de absorção dominado pela matriz onde, em cada sucessiva etapa de sorção, o material absorve grande quantidade de água. Isto é atribuído a danos na matriz decorrentes de absorção de água de ciclos anteriores. Por outro lado, a interface fraca, muitas vezes, facilita o caminho de penetração de água nos compósitos. Deste modo, a absorção é dominada pela interface, fenômeno mais reversível, já que neste caso, a matriz contribui menos no processo de absorção.

Pegoretti e Penati (2004) estudaram o efeito do envelhecimento higrotérmico em água a 70°C e 80% de umidade relativa, na massa molar e nas propriedades térmicas de compósitos de polietileno tereftalato (PET) e fibras curtas de vidro. Os autores observaram que durante o período inicial de exposição, a absorção de água aumenta linearmente com a raiz quadrada do tempo e a difusividade aparente diminui com o aumento do teor de fibra e com o decréscimo

da umidade relativa. Compósitos absorvem mais água do que o esperado considerando somente difusão dentro da matriz polimérica. Os autores sugeriram que outros mecanismos, como capilaridade e/ou transporte por microtrincas, ficam ativos quando os compósitos são imersos em água.

Kumosa et al. (2004) investigaram a absorção de água em compósitos unidirecionais a base de fibra de vidro com poliéster modificado, epóxi e resina vinil éster a serem usados como isolantes de alta voltagem. Os compósitos foram expostos em ambiente úmido com umidade relativa de 80% a 50°C, e sua resistência à absorção de umidade ao que se refere à taxa de absorção de umidade, teor de umidade máximo e difusividade aparente, foram determinados. Neste trabalho foi utilizada a técnica de elementos finitos para estudar numericamente a absorção de água. Os autores encontraram uma diferença significativa na propriedade de absorção de umidade dos compósitos, indicando que o efeito da umidade nas propriedades mecânicas e elétricas dos isolantes depende do tipo de compósito usado. Os resultados evidenciaram que materiais a base de vinil éster apresentaram difusão de umidade mais favorável para o uso em compósitos isolantes de alta voltagem e que os compósitos a base de poliéster modificado exibiram uma menor absorção de umidade. Os compósitos à base de epóxi apresentaram taxas de absorção adequadas, porém, estes materiais não alcançaram o equilíbrio e continuaram absorver mais umidade de maneira não-Fickiana.

Espert et al. (2004) reportam os efeitos da sorção de água em compósitos com matriz polipropileno reforçados com fibras vegetais de sisal, polpa de celulose e esponja (Luffa sponge). Os estudos da sorção de água foram realizados em diferentes temperaturas 23, 50 e 70°C e diferentes composições. A cinética de sorção de água foi determinada pela teoria de Fick e os coeficientes de difusão calculados pela equação de Arrhenius. Os resultados mostraram que as propriedades mecânicas dos compósitos são drasticamente afetadas pela sorção de água e pelo teor de reforço. A resistência à tração e o módulo de elasticidade apresentaram queda mais significativa para teores acima de 20% de fibras. A difusão de água no compósito é rápida nas primeiras 50 horas de processo, reduzindo sua velocidade para tempos maiores.

Rouison et al. (2005) determinaram a absorção de água de compósitos poliéster insaturado/fibra de cânhamo por imersão de amostras em água ou por exposição ao ar com uma umidade relativa de 94%. Foi encontrado que a absorção de água aumenta com o aumento do teor de fibra, mas o processo de absorção de água foi relativamente lento e a saturação foi alcançada somente após muitos meses de imersão. O sistema de ressonância magnética por imagem confirma que o processo de absorção de água é governado por difusão. O coeficiente de difusão da água nas amostras aumentou com o aumento do teor de fibra. Os autores observaram também que o tratamento com agentes químicos não melhoraram significativamente a resistência a água dos compósitos investigados. Foi observado que a melhor maneira de reduzir a taxa de absorção de água é mantendo as fibras corretamente seladas dentro da matriz.

Wan et al. (2005) estudaram o comportamento de absorção e dessorção de umidade, como também a degradação mecânica de compósitos tridimensionais de epoxi e fibras trançadas de carbono. Foi realizado também um estudo comparativo com compósitos unidirecionais de epóxi e fibra de carbono para avaliar a influência da arquitetura da fibra. Os autores concluíram que, tal como nos compósitos unidirecionais, os compósitos 3D exibiram comportamento de difusão Fickiana durante o processo de absorção e dessorção. A semelhança entre os compósitos 3D e unidirecional sugere que a estrutura complexa do tecido 3D não alterou a difusão de umidade padrão. Comparada aos compósitos unidirecionais, porém, os compósitos 3D mostraram uma menor taxa de difusão, sugerindo que a estrutura da fibra afeta a absorção de umidade. Durante a dessorção, a estrutura da fibra não mostrou efeitos evidentes no comportamento da difusão. Os autores observaram uma redução nas propriedades mecânicas dos compósitos 3D e unidirecionais após absorção de umidade. Os compósitos 3D demonstraram menores perdas nas propriedades mecânicas do que compósitos unidirecionais após alcançar a saturação, indicando que os compósitos 3D foram menos sensíveis ao ataque de umidade. As perdas de propriedades mecânicas foram dominadas principalmente por falha na interface.

Cavalcanti et al. (2005) estudaram a difusão de água em compósitos de matriz poliéster reforçado com tecidos híbridos de fibras juta e vidro. Os autores aplicaram uma modelagem matemática tridimensional transiente para prever a transferência de massa durante a

absorção de água pelo compósito. A formulação matemática foi resolvida numericamente utilizando o método dos volumes finitos e o esquema de interpolação totalmente implícito. Os resultados, da evolução da umidade média dentro do material foram comparados com dados experimentais e analisados. Os autores concluíram que a modelagem matemática utilizada para a obtenção da solução numérica foi adequada e que a difusão de água no interior do sólido é rápida nas primeiras 50h de processo, reduzindo sua velocidade para tempos posteriores. A técnica de volumes finitos mostrou-se eficiente para discretizar a equação de difusão no sistema de coordenadas cartesianas para um sólido paralelepípedo, possibilitando a análise de fenômenos difusivos transientes nestes sólidos. O coeficiente de difusão mostrou-se dependente do teor de umidade do compósito estudado variando de 22×10^{-13} à $14,86 \times 10^{-13}$ m^2/s , para uma variação de teor de umidade de 0 a 0,0934 kg de água /kg de matéria seca.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

3.1 TEÓRICA

3.1.1 Modelagem Matemática

Esta pesquisa esta centrada na avaliação da absorção de água em compósitos poliméricos reforçados por fibras vegetais de caroá. O compósito estudado está totalmente imerso num meio puramente aquoso, de tal forma que a água penetra no sólido por todos os lados de forma uniforme, a formulação mais comumente utilizada para a modelagem da difusão é descrita pela 2^a lei de Fick, que é baseada no princípio de que o fluxo de umidade é proporcional ao gradiente de concentração (Rezende et al., 2011).

Nesta pesquisa, a geometria do problema que descreve o fenômeno de difusão será representada por um paralelepípedo sólido de dimensões $R_1 \times R_2 \times R_3$, como ilustrado na Figura 3.1:

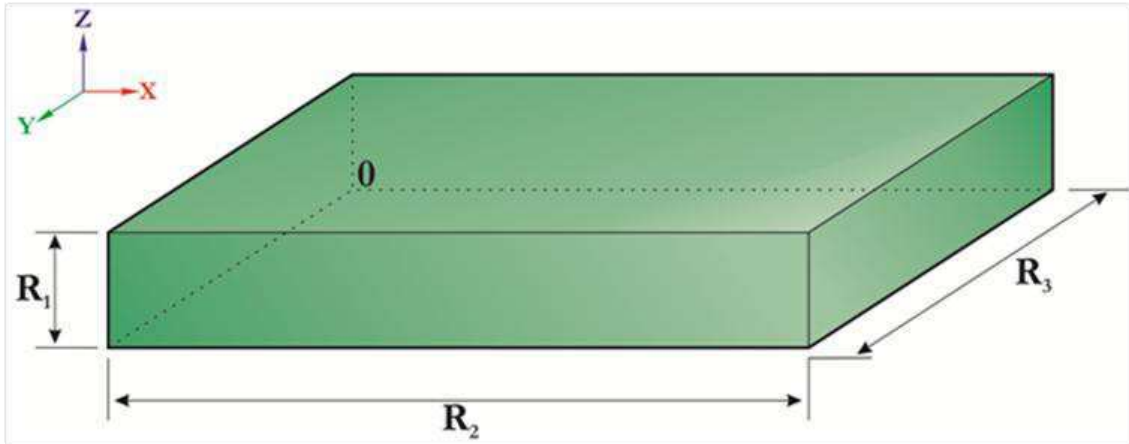


Figura 3.1 Configuração geométrica do problema físico.

Fonte: Autoria própria.

O modelo matemático consiste da equação de difusão de água em três dimensões. A equação geral utilizada pelo *software* ANSYS CFX[®] para o cálculo de uma grandeza é dado pela seguinte equação:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\lambda\Phi) = \nabla \cdot (\Gamma^{\Phi}\nabla\Phi) + S^{\Phi} \quad (1)$$

Onde:

$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t}$ representa o termo de acúmulo.

$\nabla \cdot (\Gamma^{\Phi}\nabla\Phi)$ representa o termo difusivo.

S^{Φ} representa o termo fonte.

Considerando: $\lambda = \rho$, a densidade (massa por unidade de volume); $\Phi = M$, a concentração por unidade de massa ($\frac{\Phi}{\rho}$); $\Gamma^{\Phi} = D_{\Phi}$; a difusividade cinemática para o escalar, e $S^{\Phi} = S_M$, a geração de massa.

então, a equação de difusão de água em materiais compósitos (Lei de Fick) assume a seguinte forma:

$$\frac{\partial(\rho M)}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho D_{\Phi} \nabla M) + S_M \quad (2)$$

Para o modelo matemático da transferência de umidade em materiais compósitos reforçado com fibra vegetal de caroá foram assumidas as seguintes hipóteses:

- a) Sólido homogêneo e isotrópico;
- b) O mecanismo de transporte de umidade no interior do compósito reforçado com fibra de caroá é apenas por difusão líquida;
- c) Efeito de capilaridade desprezível;
- d) Sólido totalmente seco no início do processo;
- e) Coeficiente de difusão variável durante todo o processo de difusão;
- f) Densidade do sólido seco constante;
- g) Nenhuma geração de massa de água ocorre no interior do sólido;
- h) Condição de contorno de equilíbrio com o meio exterior na superfície do sólido.

Sendo assim, desde que não há geração de massa, portanto, o termo fonte é igual a zero, e que as propriedades do compósito reforçado com fibra de caroá são constantes, pode-se escrever a equação (2), como segue:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla M) \quad (3)$$

Em coordenadas cartesianas a equação diferencial parcial geral (3) que governa um fenômeno difusivo aplicada ao compósito assume a seguinte forma:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial M}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial M}{\partial z} \right) \quad (4)$$

A equação tridimensional transiente (equação 4) necessita atender algumas condições de contorno na posição e no tempo. Para isto considerou-se o volume total do sólido, e as seguintes condições inicial e de contorno:

- Condição inicial:

$$M(x, y, z, t=0) = 0 \quad (5)$$

Isto quer dizer que o compósito está totalmente seco no início do processo.

- Condições de contorno na superfície:

$$\begin{aligned} M(x=R_1, y, z, t) = M(x, y=R_2, z, t) = M(x, y, z=R_3, t) = M_e, \\ M(x=0, y, z, t) = M(x, y=0, z, t) = M(x, y, z=0, t) = M_e, \quad t > 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Isto significa que o compósito entra em equilíbrio com o meio externo imediatamente.

Um dado importante no estudo de sorção de água é quanto de água o material está absorvendo ao longo do tempo, em média. Neste caso, o teor de umidade médio é dado por (Whitaker, 1980):

$$\bar{M} = \frac{1}{V} \int_V M dV \quad (7)$$

3.1.2 Geração da Malha do Compósito

Para a construção da geometria e geração da malha, foi utilizado o software Ansys ICEM CFD[®] 12.01. A construção da malha será descrita a seguir utilizando as dimensões 20 x 20 x 3 mm³ correspondentes ao compósito com espessura de 3 mm. Para o compósito com espessura de 6 mm, o procedimento utilizado é o mesmo, modificando-se apenas a espessura da geometria a ser gerada. A seguir listam-se os passos a serem seguidos para confecção da malha.

a) Abrir o programa ICEM CFD® 12.01. Inicialmente, selecione o ícone File (Arquivo) e selecione Save Project As (Salvar projeto como). Ao selecionar esta opção, aparecerá uma janela onde poderá ser definido o local onde serão salvos todos os arquivos, inclusive o arquivo da malha (Figura 3.2).

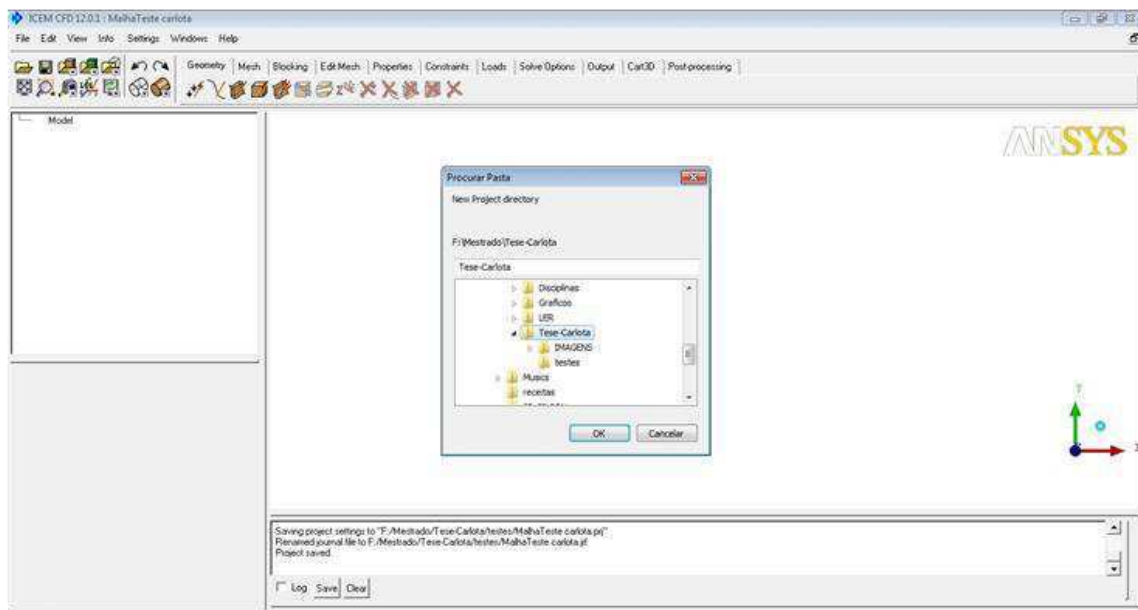


Figura 3.2 Janela principal do ICEM CFD® versão 12.01.

Fonte: Autoria própria.

b) Clica-se no ícone ICEM CFX 12.01 e aparecerá uma janela. Nela, deve-se selecionar, File, e a opção New Project. Na janela denominada New Project, um nome para o arquivo de malha deverá ser criado. Após a definição do nome para este arquivo, clica-se então em OK para prosseguir (Figura 3.3).

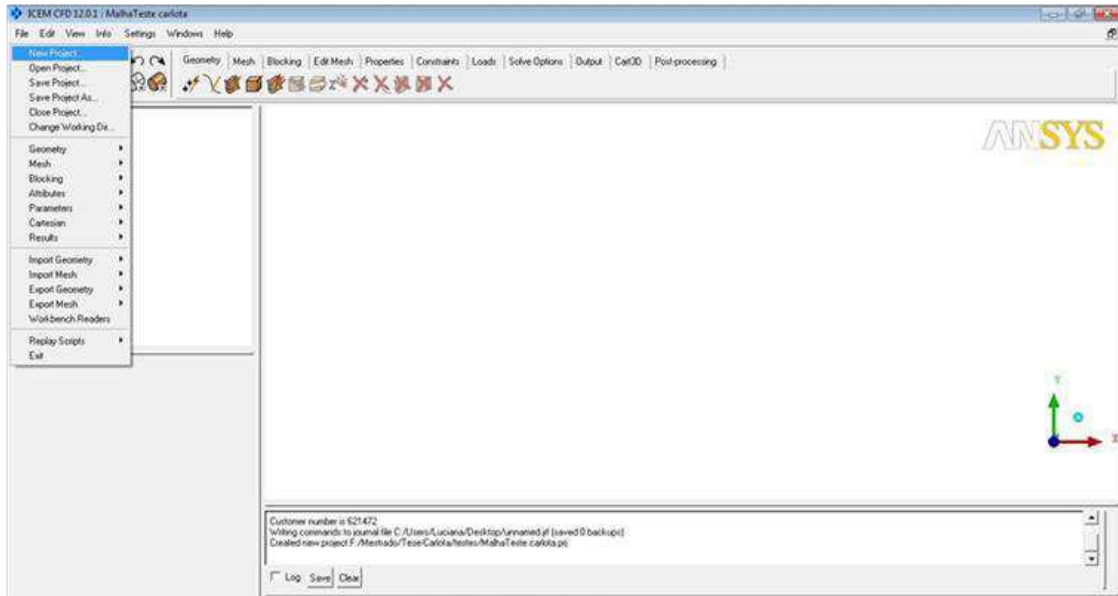


Figura 3.3 Janela de definição do nome da malha.

Fonte: Autoria própria.

c) Após salvo o arquivo a ser trabalhado, deve-se selecionar o eixo de coordenadas a ser utilizado na geração da malha clicando no eixo das abscissas. Logo em seguida, clica-se com o botão direito em Model, devendo-se selecionar a opção Geometry Units. Nessa janela será escolhida a unidade de medida a ser utilizada no CFX[®]. Nesta pesquisa a unidade a ser utilizada será milímetros (mm) (Figura 3.4).

d) Antes de iniciarmos a construção da geometria, seleciona-se o ícone Settings e em seguida seleciona-se selection. Deve-se desabilitar a opção Auto Pick Mode, em seguida clicar em Apply, por fim clica-se em Ok. No menu superior aciona-se o ícone Geometry, seleciona-se o ícone Create Point, em seguida o ícone Explicit Coordinates para determinar o ponto 1 (0, 0, 0), finalmente clica-se em Apply. Seguindo o mesmo princípio para criação do primeiro ponto, determinam-se os demais pontos: ponto 2 (0, 0, 3), ponto 3 (20, 0, 3), ponto 4 (20, 0, 0) e ponto 5 (0, 20, 0) (Figura 3.5).

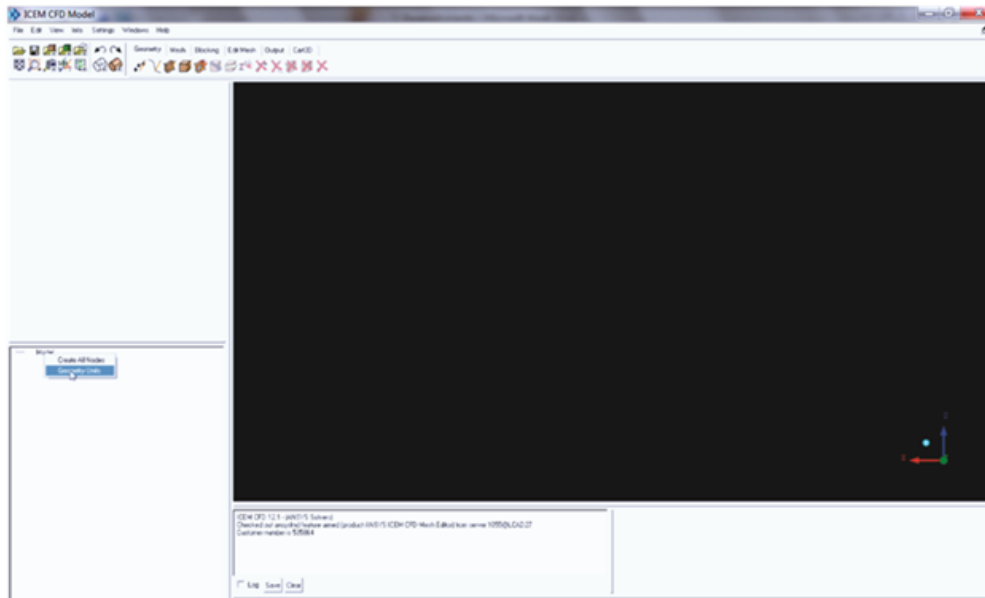


Figura 3.4 Janela de definição da dimensão.

Fonte: Autoria própria.

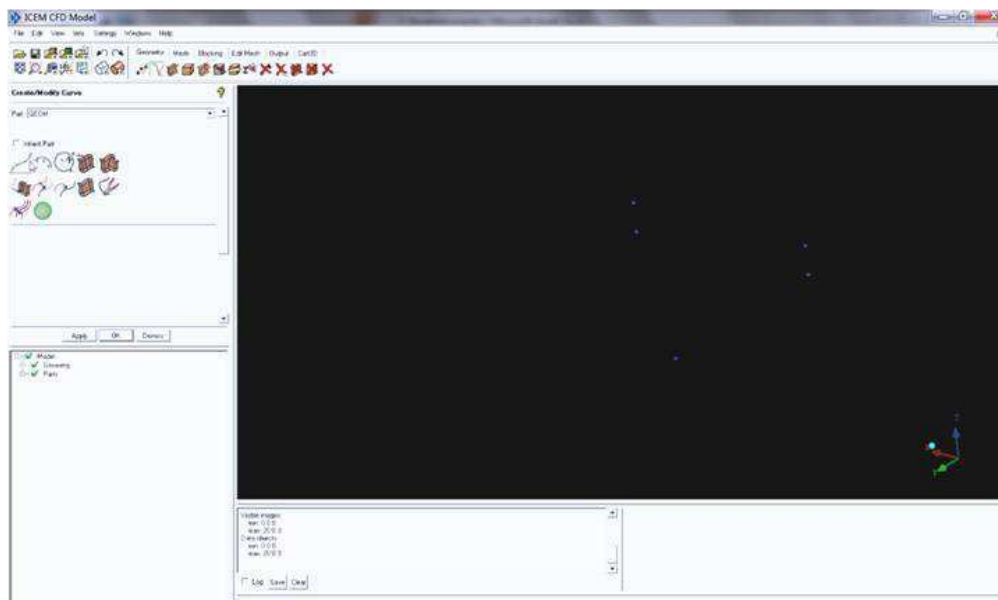


Figura 3.5 Criação dos pontos da geometria.

Fonte: Autoria própria.

e) Após criados os pontos deve-se interligá-los. Desse modo, ainda no ícone Geometry seleciona-se Create/ Modify Curve. Seleciona-se o ícone From Points e com auxílio da seta deve-se unir o ponto 1 ao ponto 2, e clicar em Apply. Deve-se repetir o procedimento unindo o ponto 2 ao ponto 3, ponto 3 ao ponto 4 e o ponto 4 ao ponto 5 (Figura 3.6).

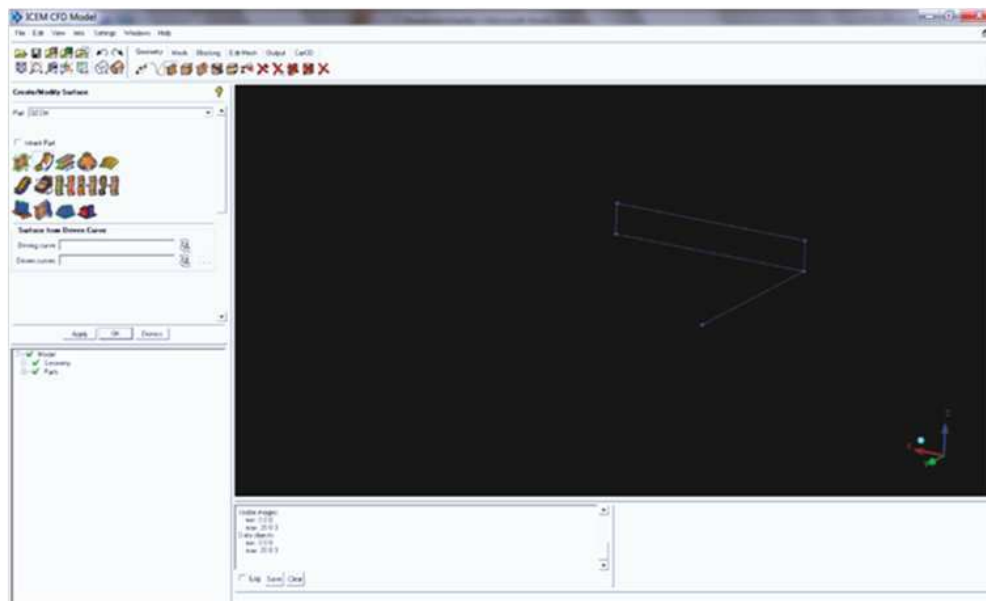


Figura 3.6 Criação das curvas da geometria.

Fonte: Autoria própria.

f) O próximo passo será criar uma superfície que irá corresponder às superfícies do compósito. Em Geometry seleciona-se Create/ Modify Surface, em Driving Curve seleciona-se a curva 4 e em Driven Curves seleciona-se as demais Curvas, por fim deve-se clicar em Apply, e assim, completar todas as superfícies do sólido (Figura 3.7).

g) O próximo passo será remover os pontos e as linhas da geometria, preservando apenas o sólido gerado. Em Parts, seleciona-se Geom e clica-se na opção Delete Point e seleciona-se todos os pontos, por fim clica-se em Apply. Repetir-se o procedimento, clicando em Delete Curve e seleciona-se todas as curvas, por fim clica-se em Apply (Figura 3.8).

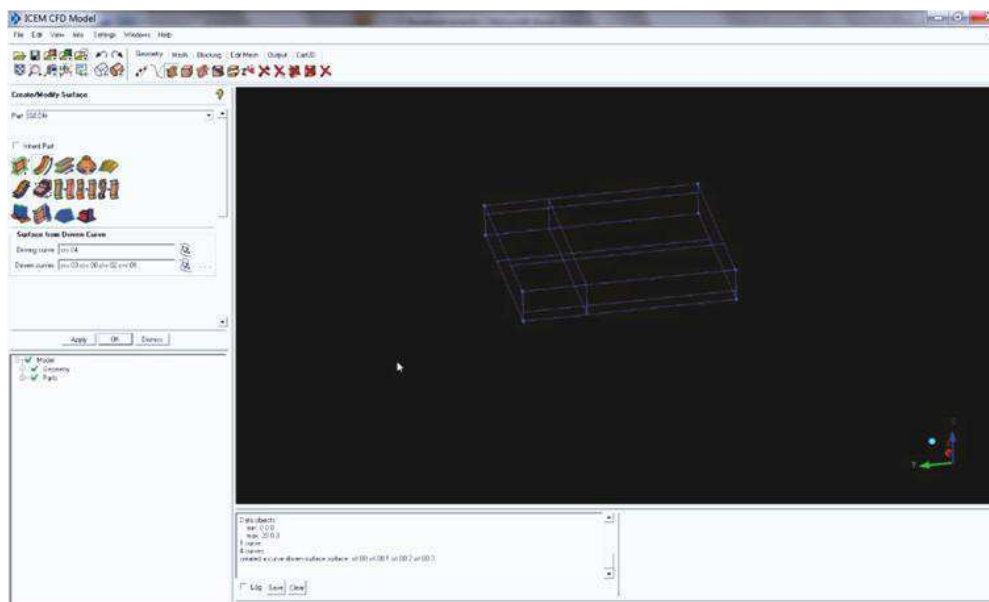


Figura 3.7 Criação das superfícies da geometria.

Fonte: Autoria própria.

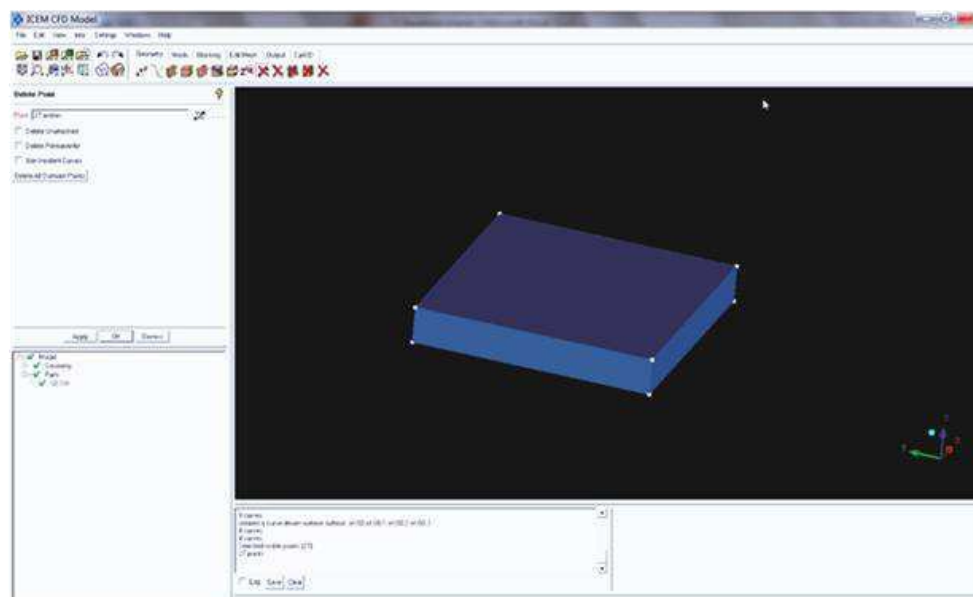


Figura 3.8 Deletando pontos e curvas da geometria.

Fonte: Autoria própria.

h) Em Geometry, deve-se clicar no ícone Repair Geometry. Será aberta uma nova janela, da qual deve-se em Build Topology, modificar a tolerância para o CFX. Sendo assim, clica-se em Tolerance digita-se o valor 0.001, e por fim clica-se em Apply. (Figura 3.9).

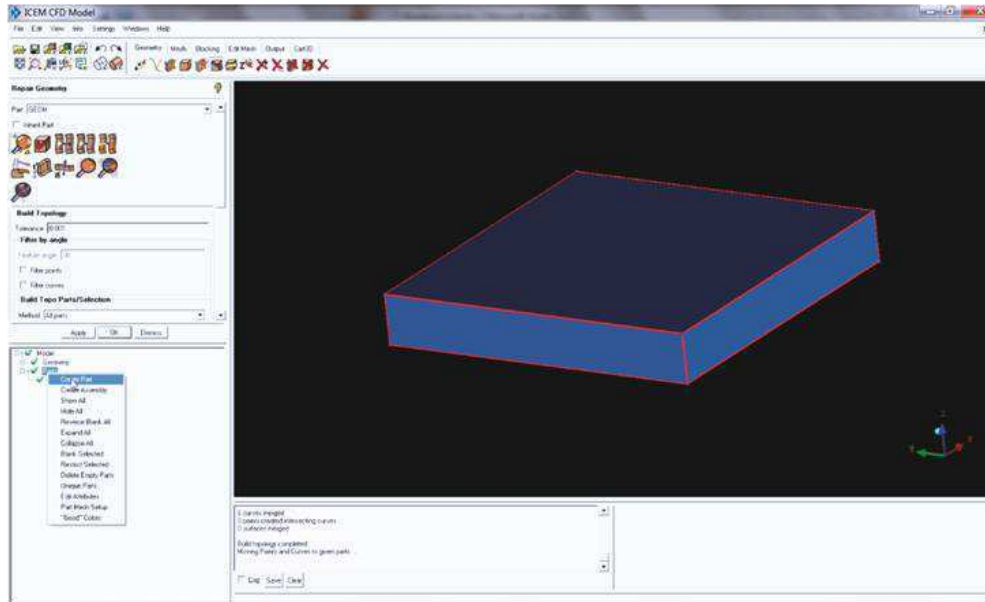


Figura 3.9 Reparando a geometria modificando a tolerância.

Fonte: Autoria própria.

i) Para criar as regiões de contorno da geometria, deve-se clicar com o botão direito do mouse em Parts. Em seguida, selecionar Create Part, e nomear a primeira região como Parede. Posteriormente seleciona-se, no sólido, a região correspondente na geometria, e por fim clica-se em Apply. Deve-se criar duas outras regiões, a Saída e Entrada, e seguir o mesmo o mesmo procedimento (Figura 3.10).

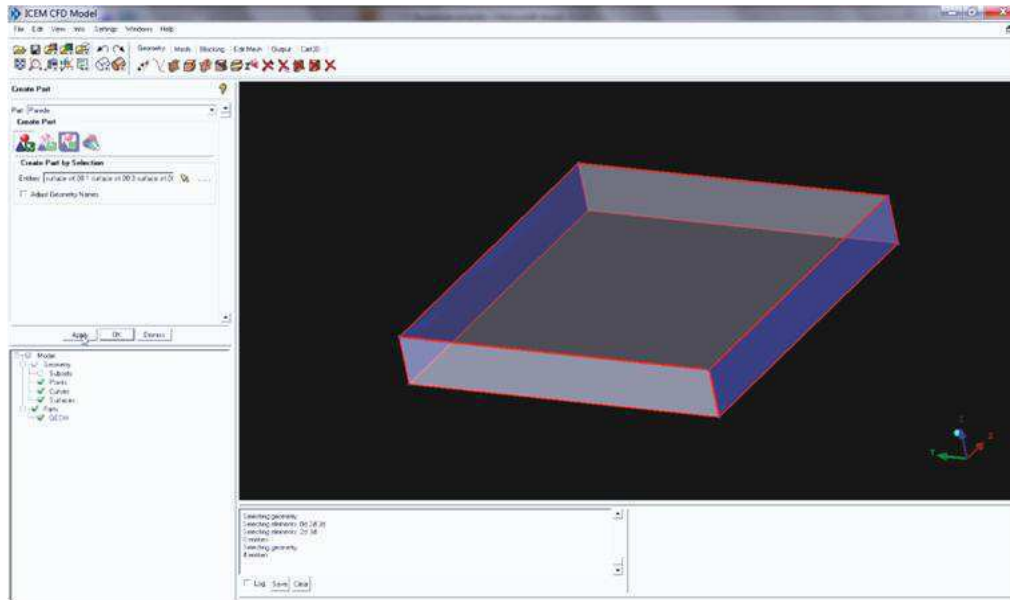


Figura 3.10 Nomeando as superfícies de contorno.

Fonte: Autoria própria.

j) Para completar a geometria, o próximo passo será criar um sólido a partir do conjunto das superfícies obtidas. Em Blocking seleciona-se Create Block e em Initialize Blocks, seleciona-se todas as superfícies. Por fim, clica-se em Apply e o sólido será gerado (Figura 3.11).

k) A obtenção da região 3D será obtida da seguinte maneira: em Blocking seleciona-se Associate Edge to Curve. Em seguida, deve-se selecionar as Edges (s) e Curves (s) da geometria, e por fim clicar Apply (Figura 3.12).

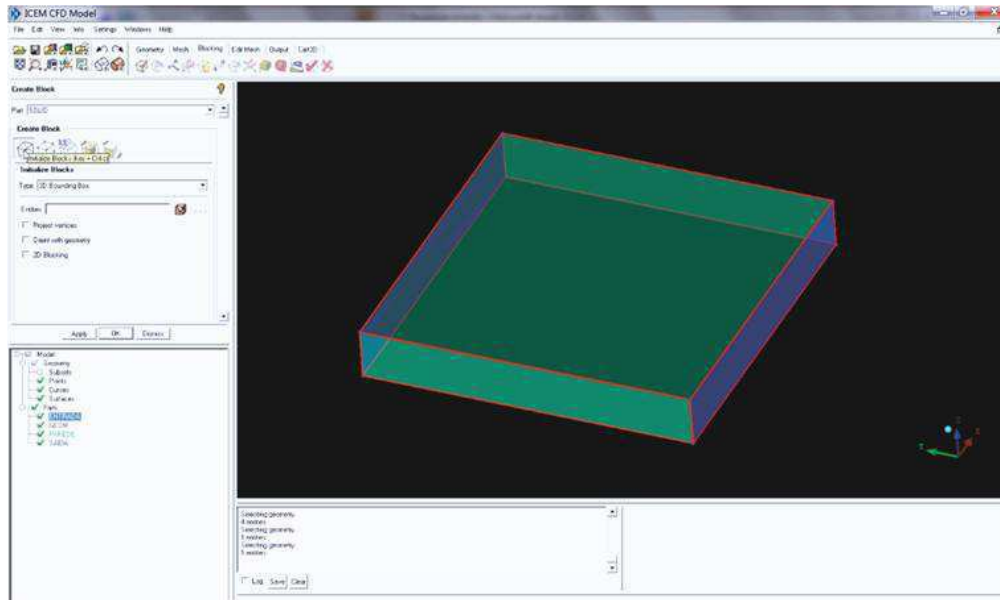


Figura 3.11 Criação do sólido a partir do conjunto das superfícies obtidas.

Fonte: Autoria própria.

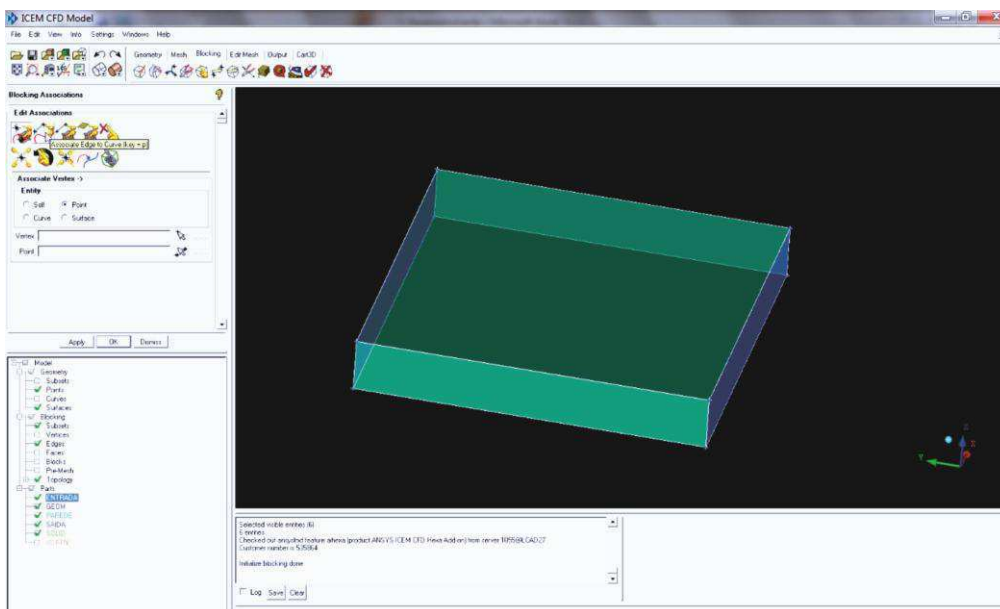


Figura 3.12 Obtenção da região 3D.

Fonte: Autoria própria.

1) Deve-se selecionar a opção Mesh. Nessa função será criada a malha da geometria obtida nos passos anteriores. Em seguida, selecionar Global Mesh Setup onde serão definidos alguns parâmetros da malha a ser criada. Para obter uma melhor solução e evitar erros nas resoluções das equações, a malha que representa o domínio deve estar bem refinada. Uma forma de ajustar esse parâmetro é definir o máximo comprimento da aresta do seu volume de controle. Desse modo, deve-se modificar Scale Factor e Max Element para 1.0, e clicar em Apply.

Em seguida, deve-se selecionar a opção Blocking e em Pre-Mesh Params, deve-se selecionar arestas para que se possam determinar o número de nós que a malha terá, primeiramente seleciona-se as arestas com dimensões de 20 mm, na opção Edge e em Nodes, deve-se determinar o número de nós para essas arestas que será 50. Para espessura do material, onde a dimensão é de 3mm foram utilizados 15 nós, e por fim clica-se em Apply.

Logo após, devemos selecionar a opção Pre-mesh, clicar no botão direito do mouse e selecionar Convert to Unstruct Mesh para visualizarmos o resultado da geração da malha construída (Figura 3.13).

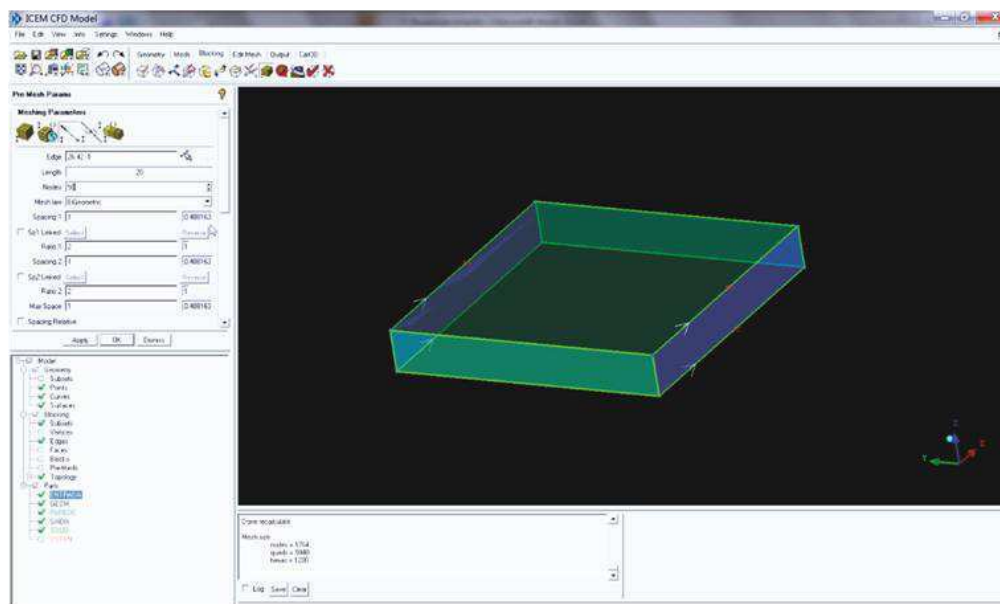


Figura 3.13 Criação da malha da geometria obtida.

Fonte: Autoria própria.

m) Por fim, o CFX[®] deverá escrever o arquivo de malha. Isso será feito selecionando Output e em Output to Ansys será aberta uma janela, da qual deve-se nomear a malha e clicar Salvar. Em seguida, será aberta outra janela da qual deve-se nomeá-la novamente contendo o nome da malha com a extensão msh. Esse será o nome do arquivo de malha gerado (Figura 3.14).

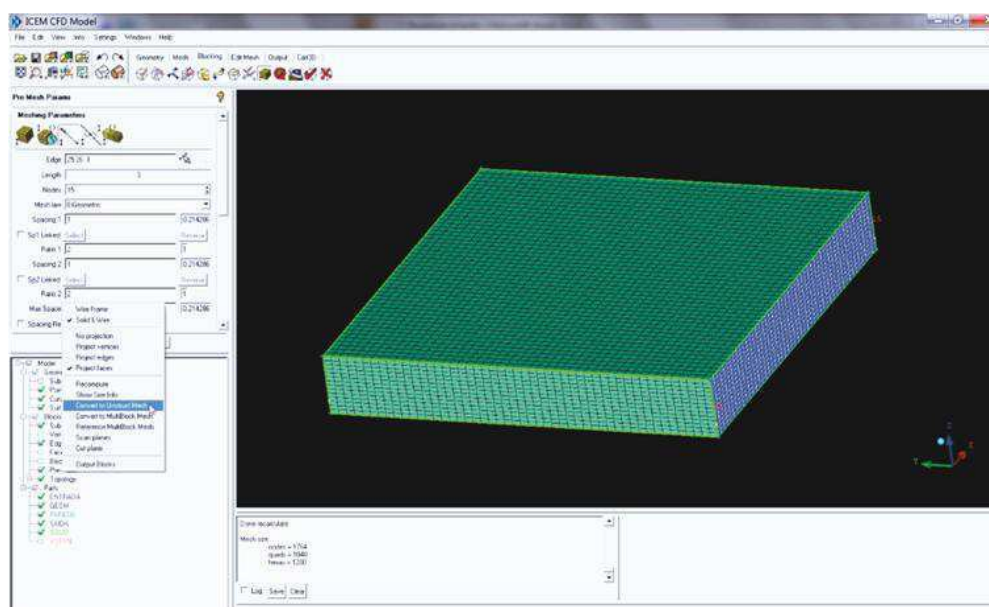


Figura 3.14 Malha criada no software CFX[®].

Fonte: Autoria própria.

3.1.3 Malha numérica

A geração da malha é necessária para permitir a solução das equações que compõem o modelo utilizando uma metodologia numérica. Para isto, o domínio de estudo é dividido em vários subdomínios, e os valores das grandezas de interesse são obtidos discretamente no espaço e no tempo, gerando assim um campo da variável de interesse.

A malha gerada a partir do software ANSYS ICEM[®] da geometria com dimensões 20 x 20 x 3 mm³, é formada por 37500 elementos hexaédricos e 33614 nós para malha. A Figura 3.15 ilustra a geometria, a malha numérica e o detalhamento das regiões próximas da superfície.

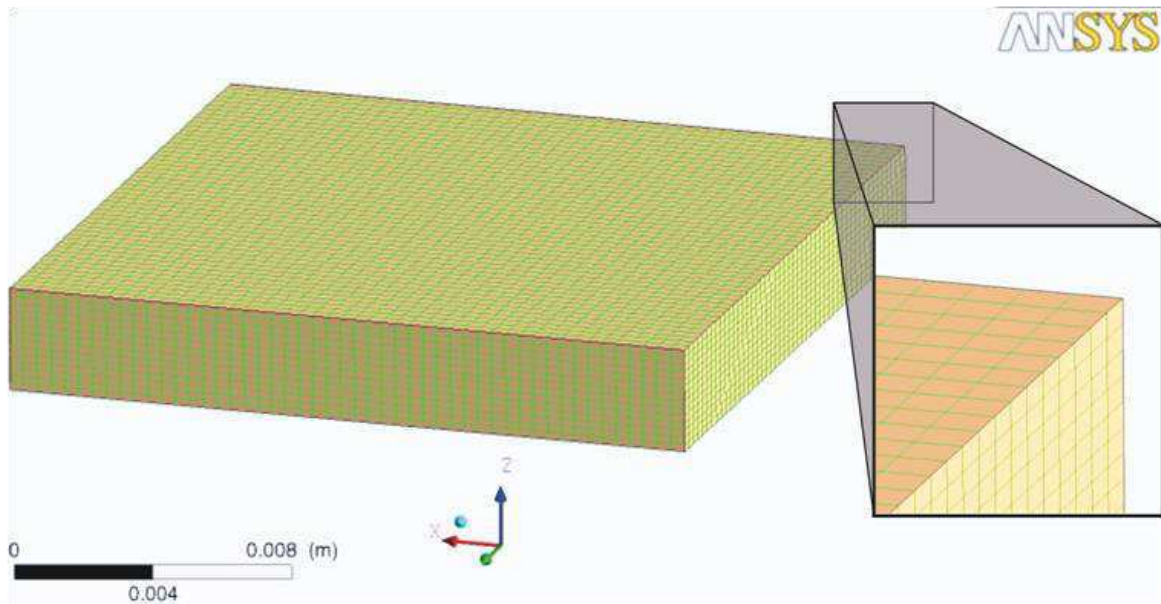


Figura 3.15 Malha numérica da geometria do compósito reforçado com fibra de caroá com 3 mm de espessura.

Fonte: Autoria própria.

A malha gerada a partir do software ANSYS ICEM[®] da geometria com dimensões 20 x 20 x 6 mm³ é formada por 60623 elementos hexaédricos e 75000 nós para malha.. A Figura 3.16 ilustra a geometria, a malha numérica e o detalhamento das regiões próximas da superfície.

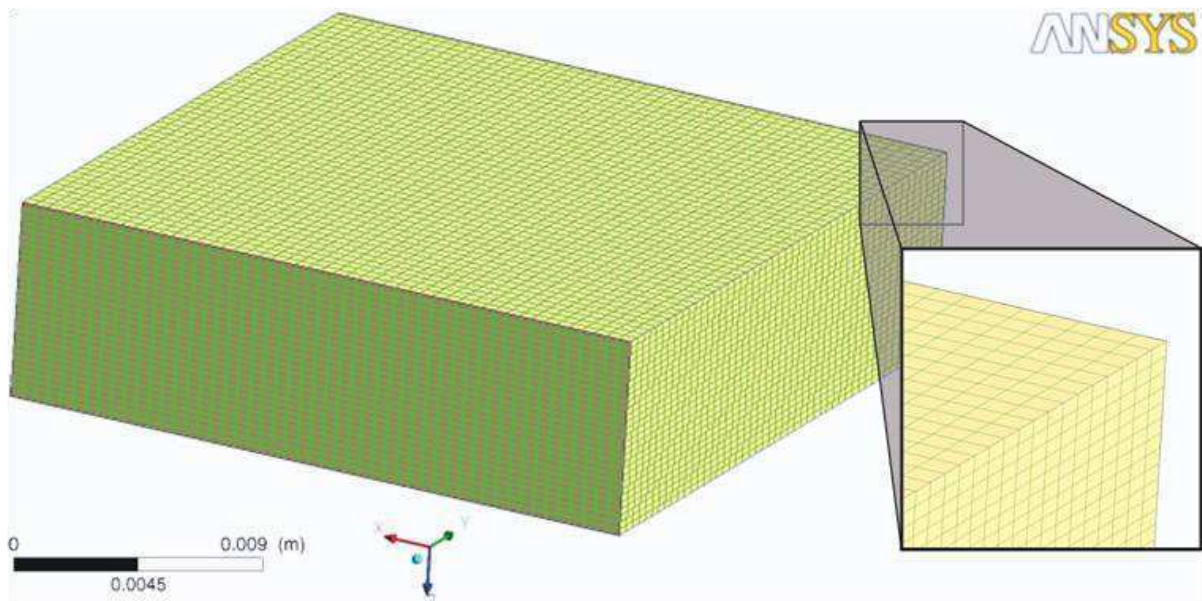


Figura 3.16 Malha numérica da geometria para o compósito reforçado com fibra de Caroá com 6 mm de espessura. Fonte: Autoria própria.

3.2 EXPERIMENTAL

Os dados experimentais levantados para o estudo de absorção de água e a distribuição de umidade no interior do compósito ao longo do processo feito por Nóbrega (2007), reproduzido para compreensão dos procedimentos experimentais. Estes dados experimentais serão comparados com os resultados numéricos de sorção de água para a validação da metodologia numérica utilizada e determinar os coeficientes de transporte. A seguir apresentam-se informações referentes aos procedimentos experimentais realizado por Nóbrega (2007).

3.2.1 Preparação dos compósitos

Para o estudo da absorção de água, os compósitos foram confeccionados com 30% de fibra de caroá e com 70% de resina de poliéster insaturado. As fibras de caroá (Figura 3.17) foram obtidas pelo método tradicional de extração de fibras, utilizando uma máquina desfibradeira. As fibras foram entendidas em varais para secarem em temperatura ambiente e cortadas em tamanhos de aproximadamente 3 cm, pesadas para a confecção das mantas e pressionadas com auxílio de uma espátula para garantir a sua impregnação pelo método de compressão.



Figura 3.17 Fibras de caroá obtidas de forma tradicional.

Fonte: Nobrega (2007).

O molde foi untado com cera para auxiliar na desmoldagem. Na preparação da matriz foi utilizada a resina poliéster insaturado e o catalisador (MEK) devidamente misturados, sendo em seguida inseridos dentro do molde juntamente com as mantas de fibra de caroá em camadas alternadas (onde a primeira e a ultima camada são da matriz) e moldados por compressão 8ton/8horas na temperatura ambiente para a obtenção das placas. Em seguida, as placas foram submetidas um período pós-cura por 48 horas à 50°C. Após este período foi efetuada a desmoldagem, o material foi medido e cortado em dimensões pré-determinadas para os ensaios de sorção de água (Figura 3.18).



Figura 3.18 Compósito no molde; medição e preparação do corpo de prova.

Fonte: Nobrega (2007).

3.2.2 Ensaio de sorção de água

Os ensaios de sorção de água foram feitos com compósito de 70% de resina insaturada e com 30% de fibras de caroá, devido este teor apresentar o melhor conjunto de propriedades mecânicas do compósito. Corpos de prova medindo 20,0 x 20,0 mm e com espessuras variando de 3,00 e 6,00 mm, foram usinados a partir das placas moldadas por compressão e preparados para o ensaio de sorção. As bordas das amostras foram seladas, isto é, foram recobertas por resina para evitar o contato direto da água com as fibras e, portanto, sorção por capilaridade e o processo de sorção de água ser uniforme em todas as faces do corpo de prova (Figura 3.19).

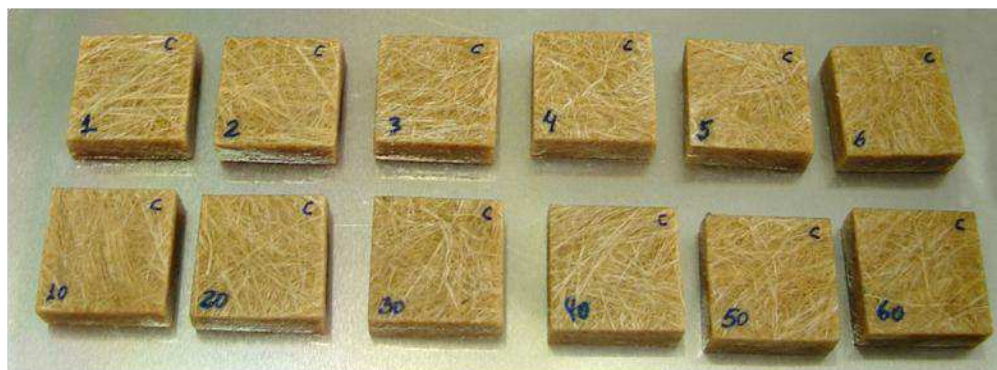
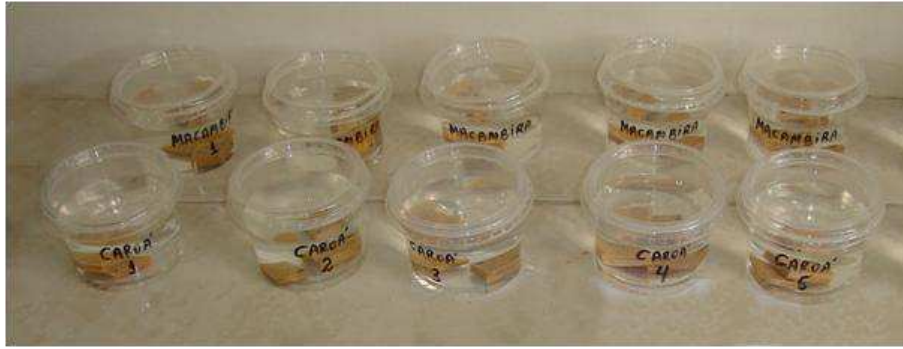


Figura 3.19 Corpos de prova para ensaio de sorção de água, com 3 e 6 mm de espessura.

Fonte: Nobrega (2007).

No ensaio de sorção de água, os corpos-de-prova foram inicialmente colocados em estufa a 105°C por 24 horas para que o teor de umidade do material fosse 0% no início do processo. Imediatamente após a secagem, as amostras foram pesadas e, em seguida, imersas em água destilada às temperaturas de 25°, 50° e 70°C (Figura 3.20 a-c). Em tempos pré-determinados as amostras eram retiradas da água, secas rapidamente com papel ou tecido de baixa absorção e pesadas em balança analítica, com precisão de $\pm 0,1$ mg para medir o ganho de massa do material; esse procedimento foi repetido diversas vezes até o material atingir o grau de saturação.

A Tabela 3.1 apresenta as características, tipo de material, condições de umidificação, composição, dimensões, das amostras para cada experimento.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.20 Corpos de prova imersos em água.

Fonte: Nobrega (2007).

Tabela 3.1 Condições de umidificação, composição e dimensões das amostras usadas para cada experimento

Amostras	T (°C)	Composição	R ₁ (mm)	R ₂ (mm)	R ₃ (mm)
Poliéster	Ambiente	100% Poliéster	3,00	20,00	20,00
Compositos	25°	30% Caroá + 70% Poliéster	3,00	20,00	20,00
	25°		6,00	20,00	20,00
	50°		3,00	20,00	20,00
	50°		6,00	20,00	20,00
	70°		3,00	20,00	20,00
	70°		6,00	20,00	20,00

Fonte: Nóbrega (2007)

Para validar a metodologia da absorção de água nos corpos de prova com espessura de 3 e 6 mm, imerso em banho de água nas temperaturas de ensaio de 25, 50 e 70°C, os resultados numéricos obtidos via software ANSYS CFX[®] para o teor de umidade médio foram comparados com os dados experimentais relatados por Nóbrega (2007). Os dados experimentais foram obtidos a partir de uma equação que se ajustou aos dados experimentais a partir de uma distribuição uniforme de pontos ao longo do processo. Esta é uma equação exponencial a 3 termos e 6 parâmetros, como sugere:

$$\frac{\bar{M}-M_e}{M_o-M_e} = A_1 \exp(-K_1 t) + A_2 \exp(-K_2 t) + A_3 \exp(-K_3 t) \quad (8)$$

onde t o tempo, dado em horas. A estimação não-linear dos parâmetros da equação (8), realizada por Nóbrega (2007) foi realizada utilizando o Software Statística[®] e o método numérico de Hooke-Jeeves e quasi-Newton, com critério de convergência de 0,00001.

A Tabela 3.2 apresenta os valores dos parâmetros obtidos bem como os coeficientes de correlação para todos os testes realizados. É evidente, a excelente concordância entre os pontos preditos e experimentais caracterizados pelos altos valores coeficientes de correlação e a variância encontrada.

Nóbrega (2007), a partir do uso da equação (8) e dos dados obtidos pelo modelo proposto por ele, determinou coeficiente de difusão de massa para cada caso apresentado na Tabela 3.1.

A partir desde estudo Nóbrega (2007) propôs a seguinte equação para o coeficiente de difusão:

$$D = D_0 \text{Exp}(\eta \bar{M}) \quad (9)$$

A Tabela 3.3 apresenta os valores dos parâmetros obtidos bem como os coeficientes de correlação para todos os testes realizados. É evidente, a excelente concordância entre os pontos preditos e experimentais caracterizados pelos altos valores coeficientes de correlação e a variância encontrada.

Tabela 3.2 Parâmetros da Equação (8) ajustados aos dados experimentais

Amostras	Parâmetros							
	A ₁	K ₁	A ₂	K ₂	A ₃	K ₃	S ²	R
Poliéster	0,289245	-0,007461	0,318749	-0,007527	0,388658	-0,184294	0,99909	0,99955
25°C/ 3mm	0,136647	-1,054260	0,683182	-0,015922	0,166545	-0,004012	0,99929	0,99965
25°C/ 6mm	0,134804	-0,016241	0,792025	-0,004098	0,062458	-0,362017	0,99953	0,99977
50°C/ 3mm	0,173886	-4,32548	0,091752	-0,003373	0,734562	-0,047492	0,99810	0,99905
50°C/ 6mm	0,190745	-0,151645	0,105855	-0,003126	0,673530	-0,016301	0,99937	0,99968
70°C/ 3mm	0,174880	-2,19235	0,752789	-0,091170	0,072562	-0,003706	0,99979	0,99990
70°C/ 6mm	0,106218	-1,68255	0,600263	-0,070373	0,293022	-0,013598	0,99937	0,99968

Fonte: Nóbrega (2007)

Tabela 3.3 Coeficiente de difusão e teores de umidade

Amostras	D ₀ x 10 ¹² m ² /s	η	Me (%) ¹	Tempo (horas)
Poliéster	2,8	-26,0	1,255	600
25°C/ 3mm	2,2	-0,4	14,488	1100
25°C/ 6mm	2,3	-0,1	14,810	1623
50°C/ 3mm	8,0	-0,4	15,162	1022
50°C/ 6mm	8,5	-0,1	16,067	1022
70°C/ 3mm	15,0	-0,4	15,609	796
70°C/ 6mm	21,0	-0,1	16,523	796

Fonte: Nóbrega (2007)

Esta equação (9) foi usada nesta pesquisa para obter os dados cinéticos de absorção de água e a distribuição de umidade no interior do material ao longo do tempo. Tendo em vista que as amostras do compósito têm forma paralelepípedo, a área superficial e volume deste sólido foram obtidos como sugere:

$$S = 2(R_1R_2 + R_2R_3 + R_1R_3) \quad (10)$$

$$V = R_1 R_2 R_3 \quad (11)$$

Para solução transiente foi utilizado em passo de tempo de 60 s e um critério de convergência de 1×10^{-08} .

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Estudos sobre o uso de fibras naturais na substituição das fibras sintéticas como reforço em compósitos têm aumentado consideravelmente nos últimos anos, devido às diversas vantagens quando comparadas as fibras sintéticas e pela constante busca por materiais ecologicamente corretos para minimizar os problemas ambientais, incorporando aos produtos industriais conceitos de sustentabilidade e de melhoria de vida para as futuras gerações, ocasionando a concepção de modos de produção menos poluentes e impactantes. Essas fibras apresentam uma boa razão custo/ benefício para serem usadas como reforço em matrizes poliméricas (Rouison et al., 2005; Nóbrega, 2007; Fotan Jr. et al., 2010).

A Tabela 4.1 apresenta as características, tipo de material, composição, condições de umidificação, teor de umidade de equilíbrio (material na saturação), área, volume, relação área/volume e tempo total de absorção de água, para cada experimento. Já a Figura 4.1 representa a curva de sorção de água em função do tempo para amostra da matriz de poliéster

insaturado. Nela observa-se uma comparação entre os dados experimentais reportados por Nóbrega (2007) com os numéricos obtidos com o Ansys CFX[®].

Tabela 4.1 Teores de umidade, dados geométricos e tempo final de absorção de cada amostra

Amostras	Me (%) ¹	S ₀ x 10 ³ (m ²)	V ₀ x 10 ⁶ (m ³)	S ₀ / V ₀ (m ² / m ³)	Tempo (horas)
Poliéster	1,255	1,04	1,20	866,66	600
25°C/ 3mm	14,488	1,04	1,20	866,66	1100
25°C/ 6mm	14,810	1,28	2,40	533,33	1623
50°C/ 3mm	15,162	1,04	1,20	866,66	1022
50°C/ 6mm	16,067	1,28	2,40	533,33	1022
70°C/ 3mm	15,609	1,04	1,20	866,66	796
70°C/ 6mm	16,523	1,28	2,40	533,33	796

1 Define-se teor de umidade em base seca como sendo a relação entre a massa de água absorvida e a massa do compósito totalmente seco.

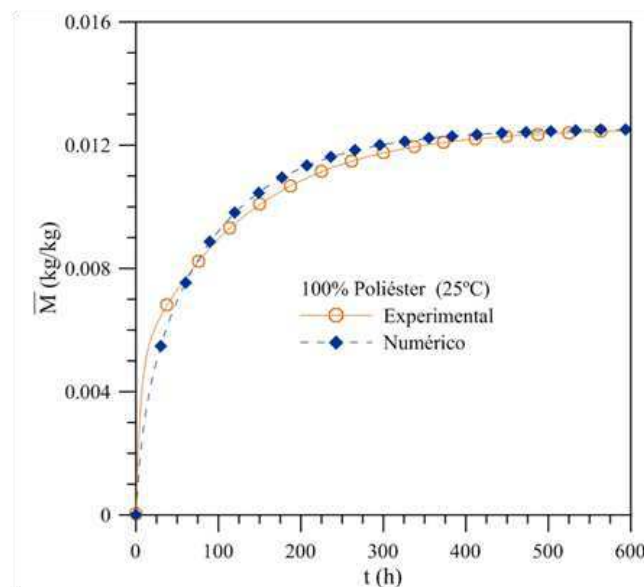


Figura 4.1 Comparação entre teores de umidade médios da matriz, experimental (Nóbrega, 2007) e numérico (Ansys CFX[®]).

As Figuras 4.2 a 4.7 representam as curvas de sorção de água em função do tempo e nas temperaturas de 25, 50 e 70°C, para amostras de compósitos de matriz poliéster insaturadas reforçadas por 30% de fibras de caroá. Verifica-se, em todos os casos avaliados, uma excelente concordância com os dados experimentais. Observa-se ainda que, a sorção de água é rápida nos estágios iniciais (nas primeiras 50 horas), tendendo a diminuir para tempos de exposição longos até atingir o equilíbrio. Este efeito é mais pronunciado para temperaturas mais elevadas ($T= 70^{\circ}\text{C}$). Neste caso, a sorção de água é dominada por efeitos térmicos, implicando que o coeficiente de difusão de massa no interior do material depende fortemente da temperatura e do teor de umidade. Comparando-se com a matriz polimérica, verifica-se que sorção de água é mais elevada nos compósitos. O aumento do teor de umidade destes materiais compósitos reforçados com fibra natural (caroá), quando comparado com a resina pura (poliéster insaturado) ao longo do tempo, resulta do fato das fibras de caroá como qualquer outra fibra vegetal, ter natureza hidrofílica.

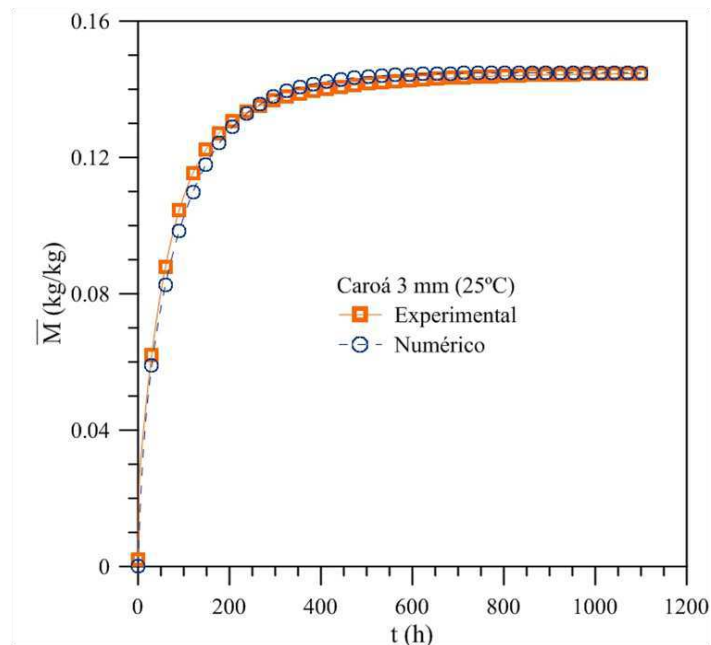


Figura 4.2 Comparação entre teores de umidade experimental (Nóbrega, 2007) e numérico (Ansys CFX[®]), para compósito reforçado com 30% de fibras de caroá, 3 mm de espessura e temperatura de 25°C.

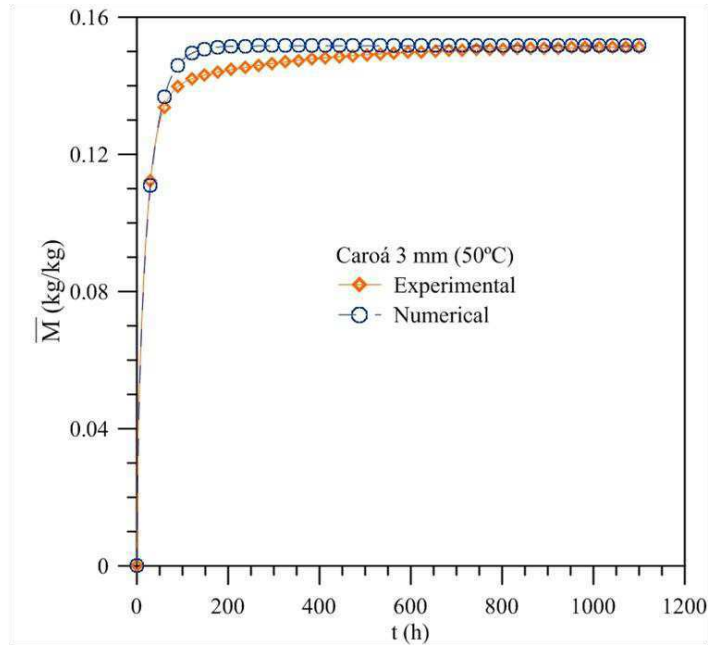


Figura 4.3 Comparação entre teores de umidade experimental (Nóbrega, 2007) e numérico (Ansys CFX[®]), para compósito reforçado com 30% de fibras de caroá, 3 mm de espessura e temperatura de 50°C.

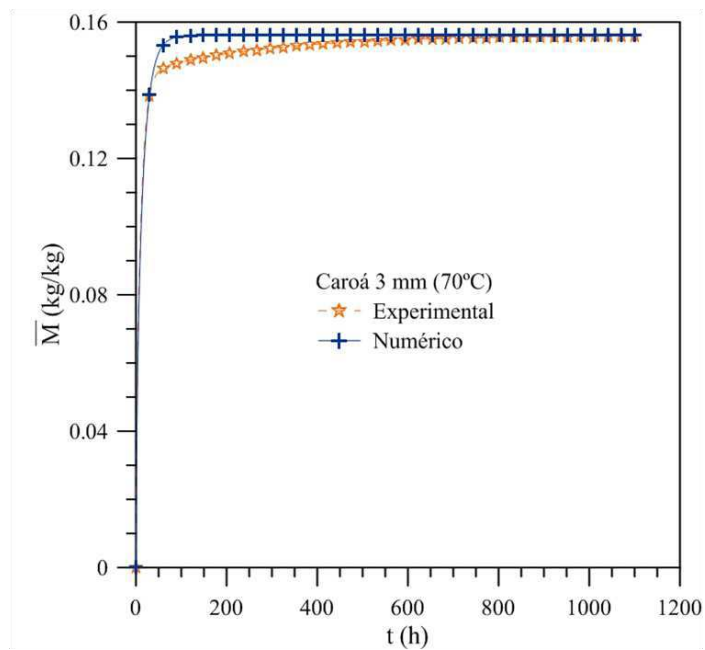


Figura 4.4 Comparação entre teores de umidade experimental (Nóbrega, 2007) e numérico (Ansys CFX[®]), para compósito reforçado com 30% de fibras de caroá, 3 mm de espessura e temperatura de 70°C.

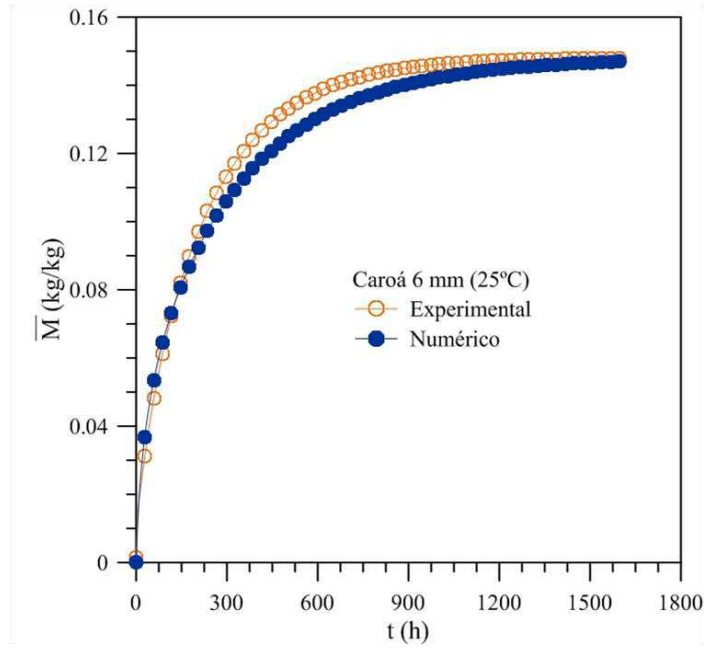


Figura 4.5 Comparação entre teores de umidade experimental (Nóbrega, 2007) e numérico (Ansys CFX[®]), para compósito reforçado com 30% de fibras de caroá, 6 mm de espessura e temperatura de 25°C.

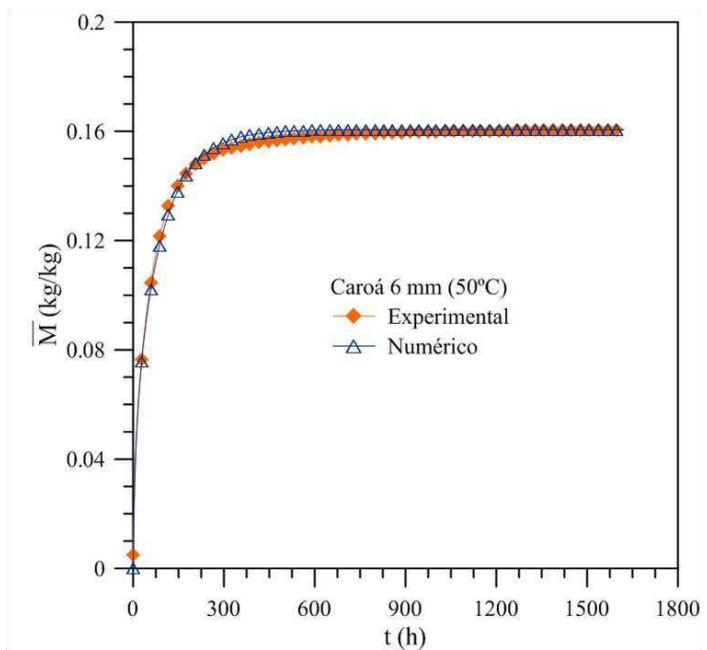


Figura 4.6 Comparação entre teores de umidade experimental (Nóbrega, 2007) e numérico (Ansys CFX[®]), para compósito reforçado com 30% de fibras de caroá, 6 mm de espessura e temperatura de 50°C.

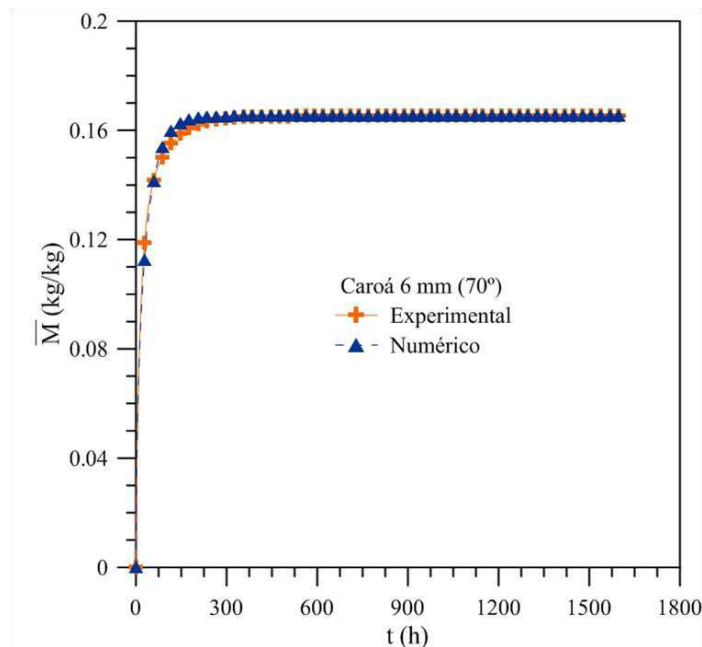


Figura 4.7 Comparação entre teores de umidade experimental (Nóbrega, 2007) e numérico (Ansys CFX[®]), para compósito reforçado com 30% de fibras de caroá, 6 mm de espessura e temperatura de 70°C.

Os resultados numéricos obtidos dependem muito das condições de contorno, propriedades termo-físicas e geometria do produto analisado. Discrepâncias observadas entre resultados experimentais e numéricos, muitas vezes estão concentradas na falta de condições de contorno adequadas para o modelo. No entanto, analisando as Figuras 4.2 a 4.7, observa-se a adequação do modelo matemático à curva experimental obtida a partir da umidificação do poliéster insaturado (Figura 4.1), e do compósito de poliéster insaturado reforçado por fibras de Caroá (Figuras 4.2 a 4.7). Desse modo, pode-se afirmar que o modelo matemático usado descreve adequadamente o processo de difusão de água no interior do compósito, comprovado em prévios trabalhos (Cavalcanti, 2006; Nóbrega, 2007; Cruz, 2011).

As Figuras 4.8 a 4.10 mostram as comparações de sorção de água para diferentes espessuras de corpo de prova e temperaturas de processo. Avaliando todas as figuras conjuntamente, observa-se que a sorção de água ocorre mais rapidamente em corpos de prova com maior relação área/volume, tendendo para o equilíbrio em tempos longos. Este efeito é mais pronunciado em temperaturas mais baixas. Para temperaturas elevadas, a cinética de sorção de água é dominada por efeitos térmicos apenas, implicando que o coeficiente de difusão de massa no interior do material é fortemente dependente da temperatura. Verifica-se

ainda que, a temperatura ambiente a umidade de equilíbrio dos compósitos com 3 e 6 mm de espessura são aproximadamente iguais. Contudo, em temperaturas mais elevadas a umidade de equilíbrio dos compósitos com 6 mm de espessura foi mais elevada.

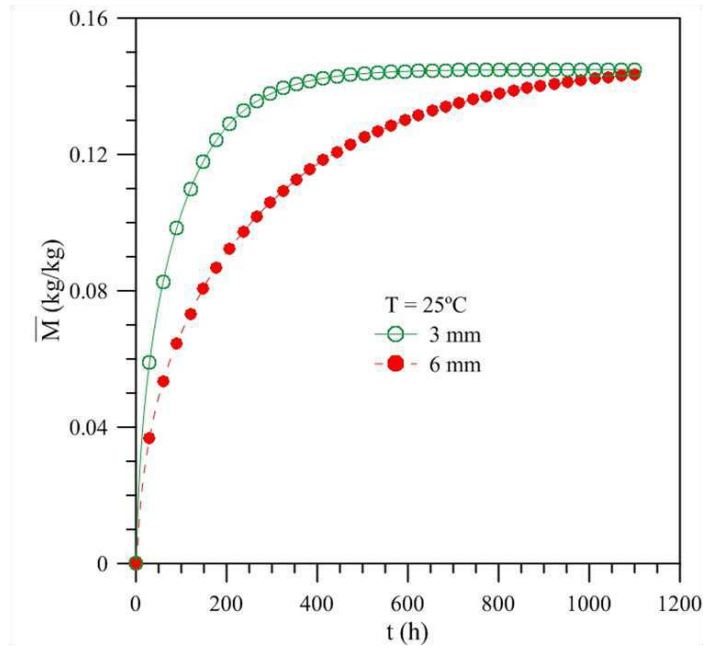


Figura 4.8 Cinéticas de sorção de água dos compósitos reforçados com 30% de fibras de Caroá nas espessuras de 3 e 6 mm, temperatura de ensaio de 25°C, obtidos com o Ansys CFX®.

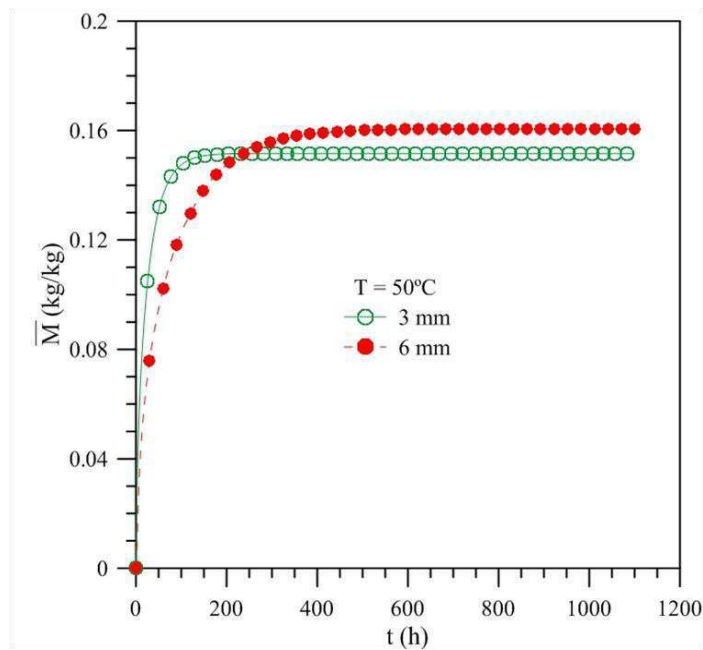


Figura 4.9 Cinéticas de sorção de água dos compósitos reforçados com 30% de fibras de Caroá nas espessuras de 3 e 6 mm, temperatura de ensaio de 50°C, obtidos com o Ansys CFX®.

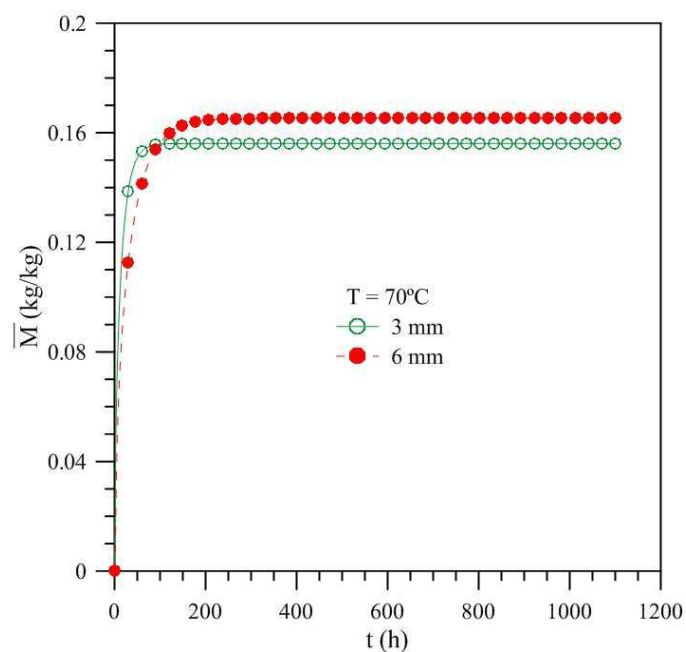


Figura 4.10 Cinéticas de sorção de água dos compostos reforçados com 30% de fibras de Caroá nas espessuras de 3 e 6 mm, temperatura de ensaio de 70°C, obtidos com o Ansys CFX®.

As Figuras 4.11 e 4.12 mostram as comparações de sorção de água para diferentes temperaturas e mesmo volume de corpo de prova, para as espessuras de 3mm e 6mm, respectivamente. Observa-se que a sorção de água ocorre mais rapidamente em temperaturas elevadas, tendendo para o equilíbrio em tempos longos. O valor máximo do teor de água no compósito atingiu 16,523% na condição de T=70°C e espessura de 6 mm, enquanto que em T=25°C e espessura do corpo de prova de 3 mm, este valor atingiu 14,488%. A umidade de equilíbrio da matriz pura (100% poliéster) foi de 1,255%. Todos os valores estão em base seca (Tabela 4.1).

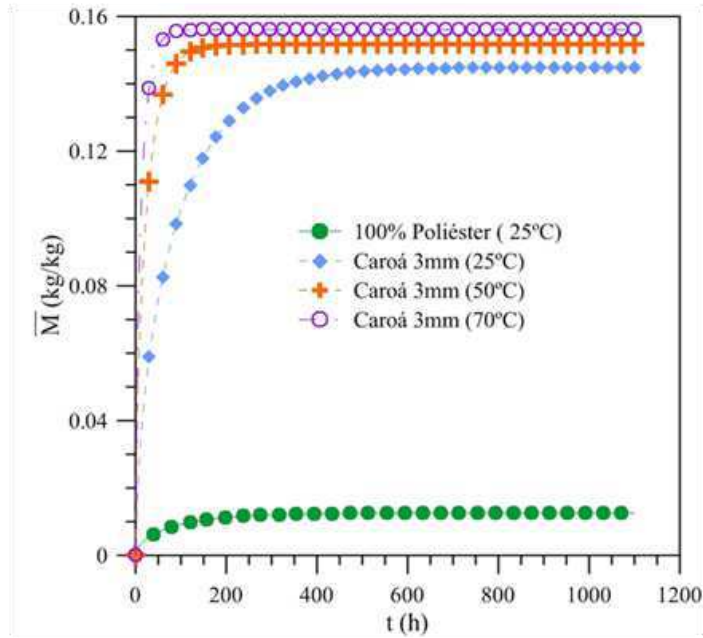


Figura 4.11 Cinéticas de sorção de água dos compósitos reforçados com 30% de fibras de caroá com 3 mm de espessura nas temperaturas de ensaios 25, 50 e 70°C, obtidos com o Ansys CFX®.

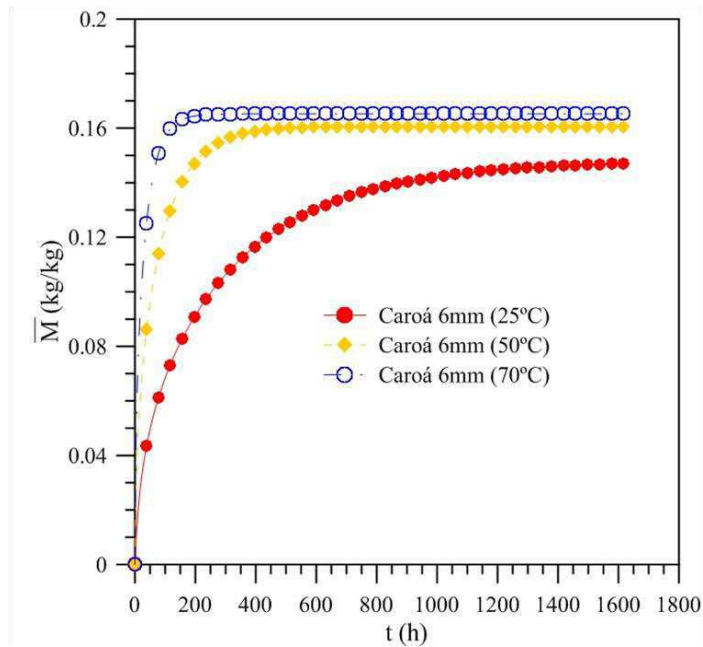


Figura 4.12 Cinéticas de sorção de água dos compósitos reforçados com 30% de fibras de caroá com 6 mm de espessura nas temperaturas de ensaios 25, 50 e 70°C, obtidos com o Ansys CFX®.

A distribuição do teor de umidade do poliéster insaturado, e do compósito poliéster insaturado reforçados com 30% de fibras de Caroá, para as espessuras de 3 e 6 mm e temperaturas de ensaio de 25, 50 e 70°C, nos planos $(x=0, y, z)$, $(x, y=0, z)$ e $(x, y, z=0)$ nos tempos de 4, 20, 44, 133 e 208 horas de processo estão representados nas Figuras 4.13 à 4.19. A partir da análise destas figuras pode-se observar a existência de elevados gradientes de umidade na região próxima ao vértice do sólido e que distribuição do teor de umidade não é uniforme com tempo de imersão. Nas regiões próximas aos pontos $(z =R_1, x=R_2, y=R_3)$ a absorção de água é mais rápida, porque elas estão em contato direto com a água, numa área mais elevada. Esta água penetra no compósito e gera um gradiente hídrico mais acentuado no interior do sólido, diminuindo com o aumento do tempo de imersão. Assim, em qualquer ponto no interior do sólido, o teor de umidade aumenta com tempo até atingir o estado de equilíbrio, ou seja, o sólido está saturado com água.

Comparando a distribuição de umidade dentro dos compósitos de matriz poliéster insaturado reforçado com fibras de caroá, com diferentes espessuras e temperatura de ensaios, verifica-se que o processo de umidificação é mais acelerado nos compósitos reforçados com fibras, e mais ainda, quando o processo ocorre em temperaturas elevadas e com compósitos de menor espessura.

Analisando as Figuras 4.14 a 4.19 observa-se um aumento no gradiente de umidade com o tempo, em elevada temperatura de ensaio e relação área/volume dos corpos de prova. Este fato pode ser atribuído à diminuição da densidade e viscosidade da água, com a temperatura assim como a dilatação térmica sofrida pela matriz, o que favorece a penetração de água no compósito.

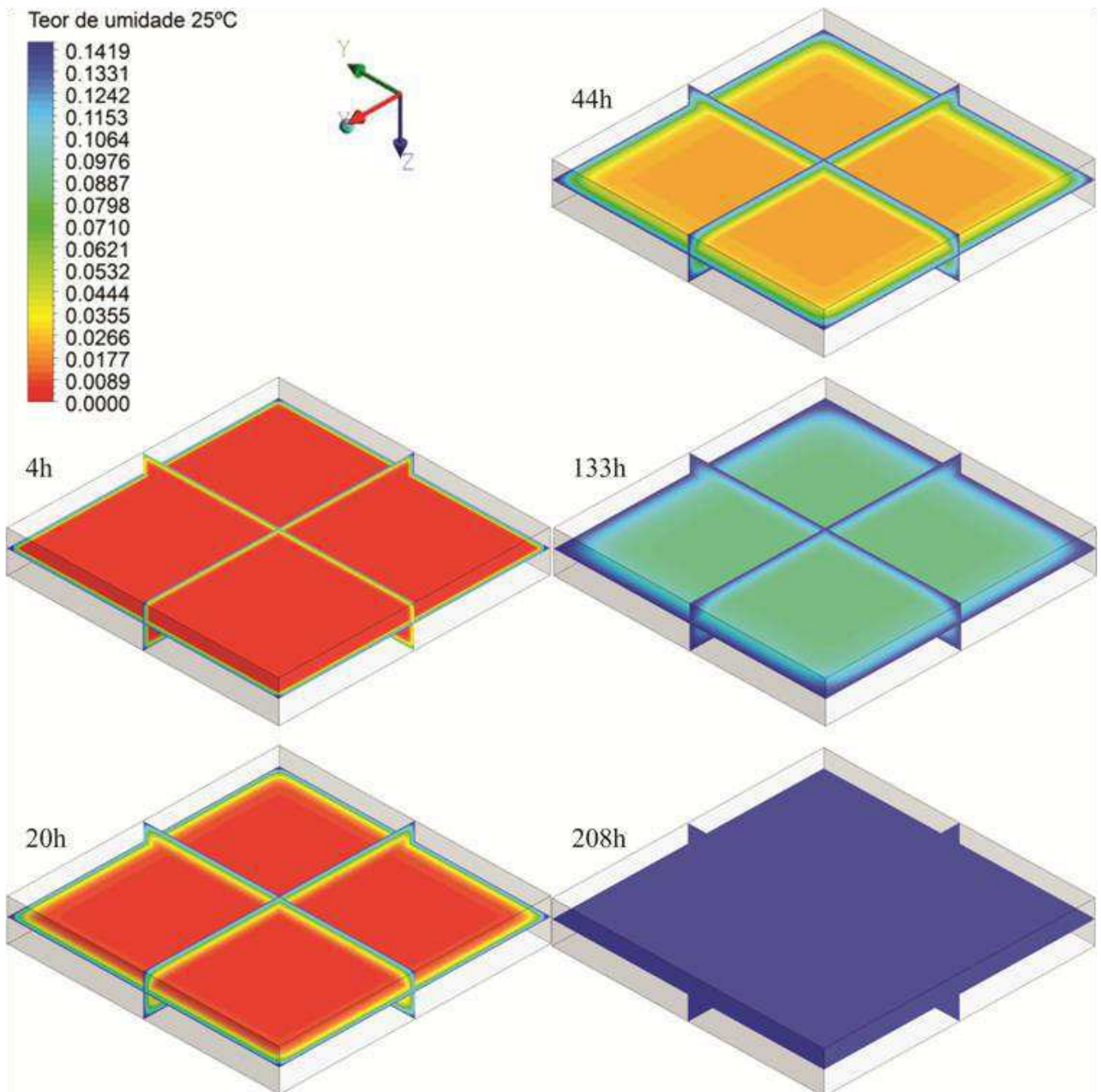


Figura 4.13 Distribuição do teor de umidade no interior do poliéster insaturado, na temperatura de 25°C e espessura de 3 mm nos planos $(x=0, y, z)$, $(x, y=0, z)$ e $(x, y, z=0)$ em tempos variados.

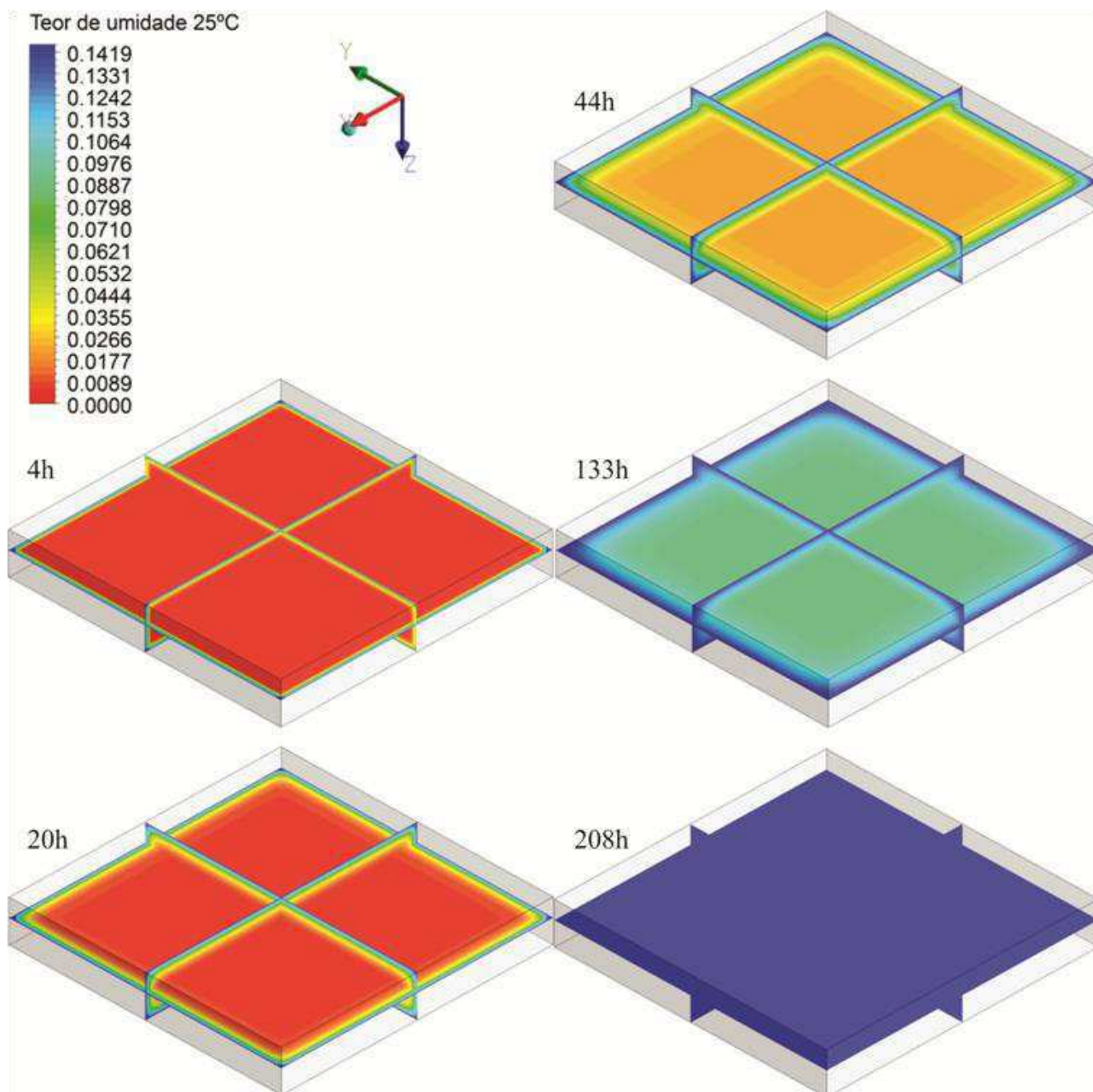


Figura 4.14 Distribuição do teor de umidade no interior do compósito com reforço de fibra de carbono, na temperatura de 25°C e espessura de 3 mm nos planos ($x=0, y, z$), ($x, y=0, z$) e ($x, y, z=0$) em tempos variados.

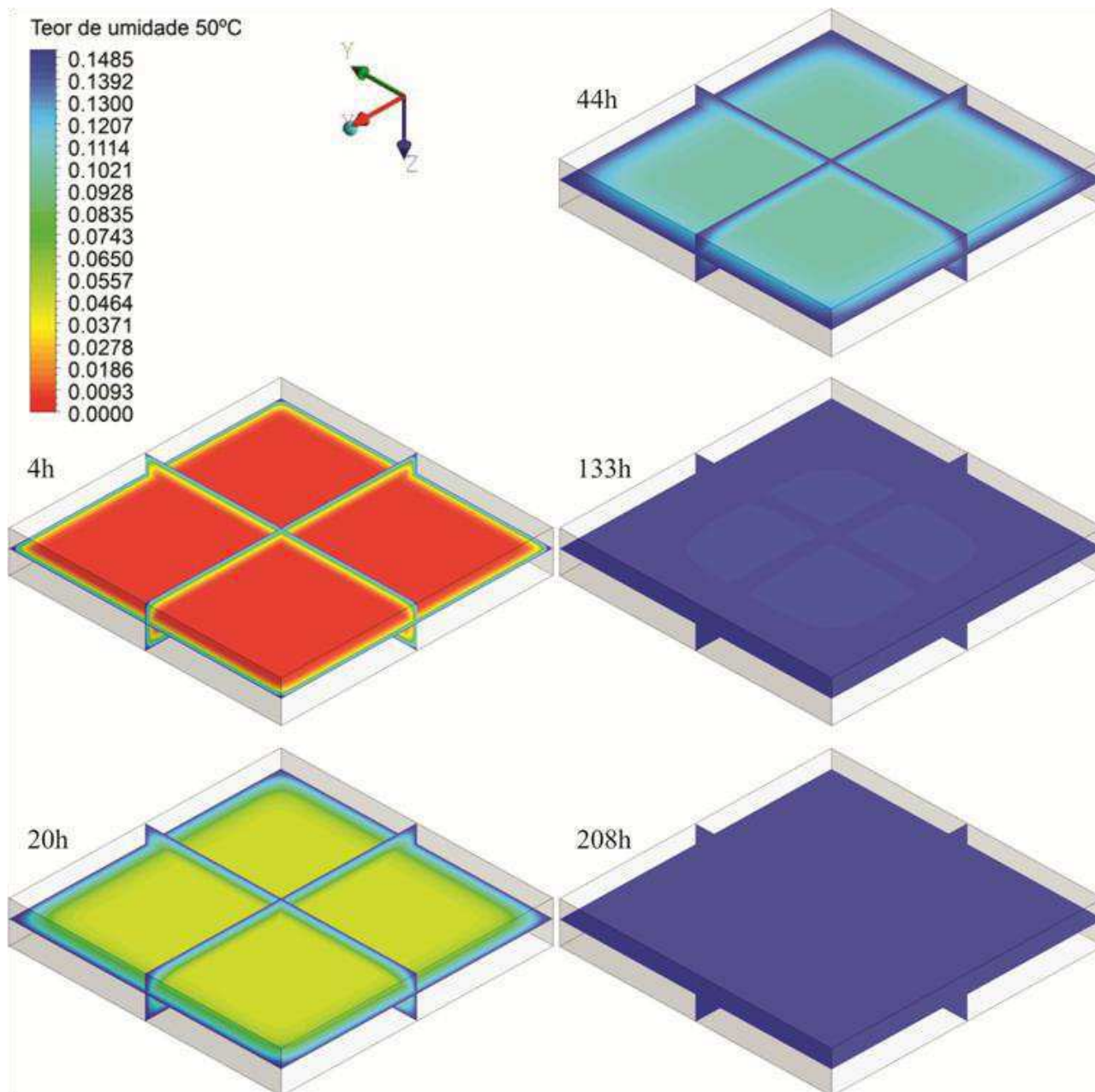


Figura 4.15 Distribuição do teor de umidade no interior do compósito com reforço de fibra de caroá, na temperatura de 50°C e espessura de 3 mm nos planos $(x=0, y, z)$, $(x, y=0, z)$ e $(x, y, z=0)$ em tempos variados.

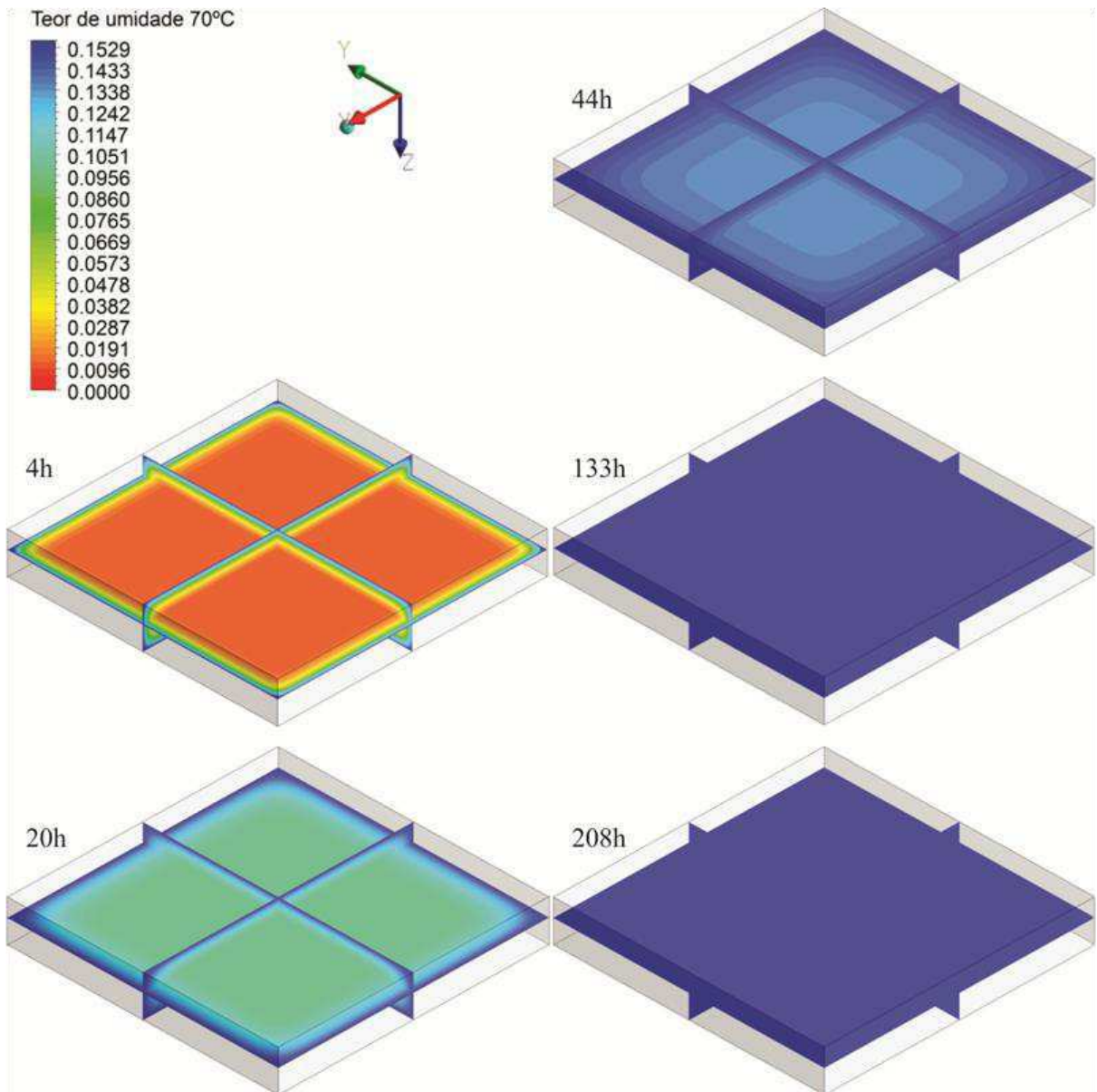


Figura 4.16 Distribuição do teor de umidade no interior do compósito com reforço de fibra de caroá, na temperatura de 70°C e espessura de 3 mm nos planos ($x=0, y, z$), ($x, y=0, z$) e ($x, y, z=0$) em tempos variados.

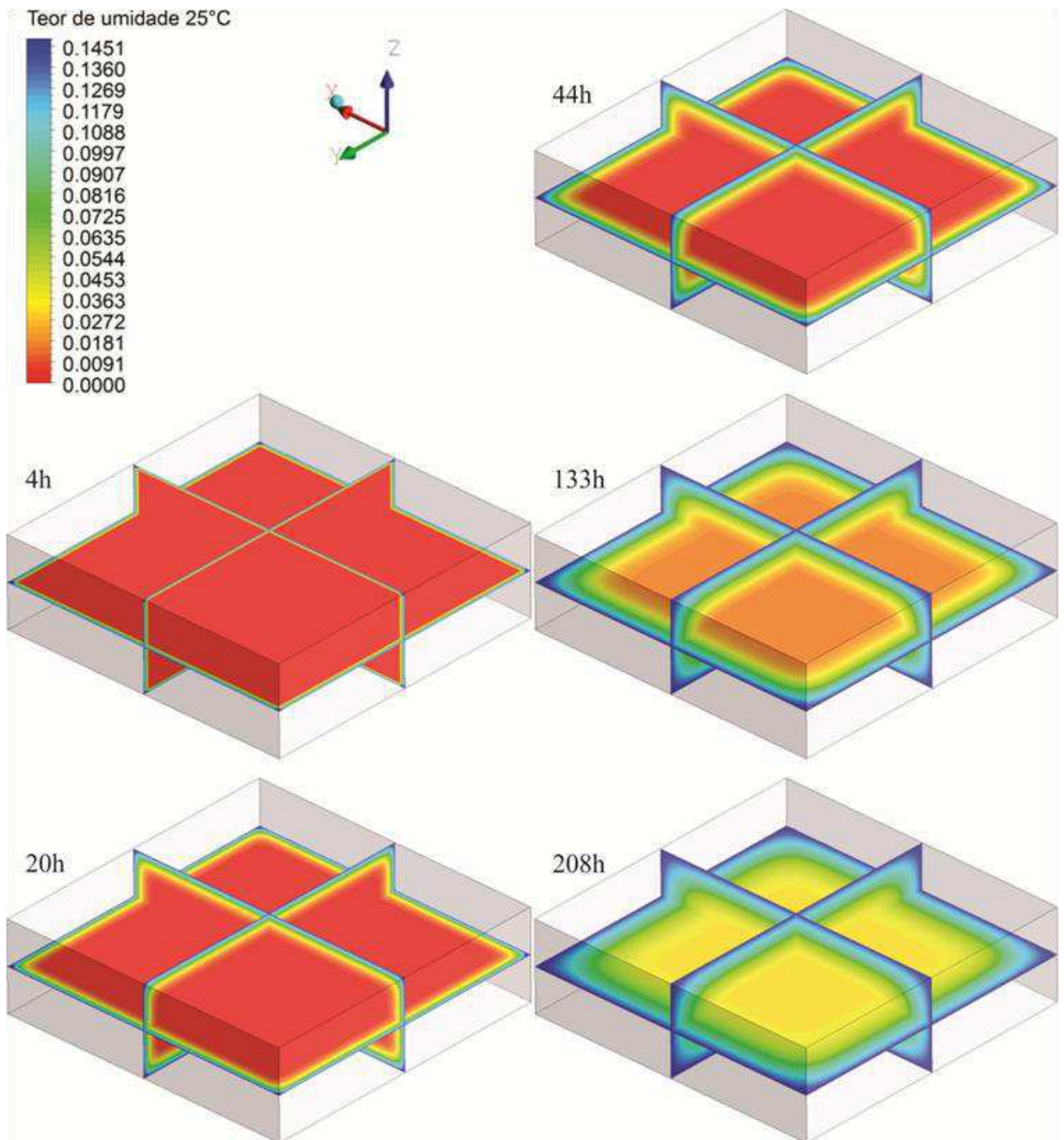


Figura 4.17 Distribuição do teor de umidade no interior do compósito com reforço de fibra de caroá, na temperatura de 25°C e espessura de 6 mm nos planos $(x=0, y, z)$, $(x, y=0, z)$ e $(x, y, z=0)$ em tempos variados.

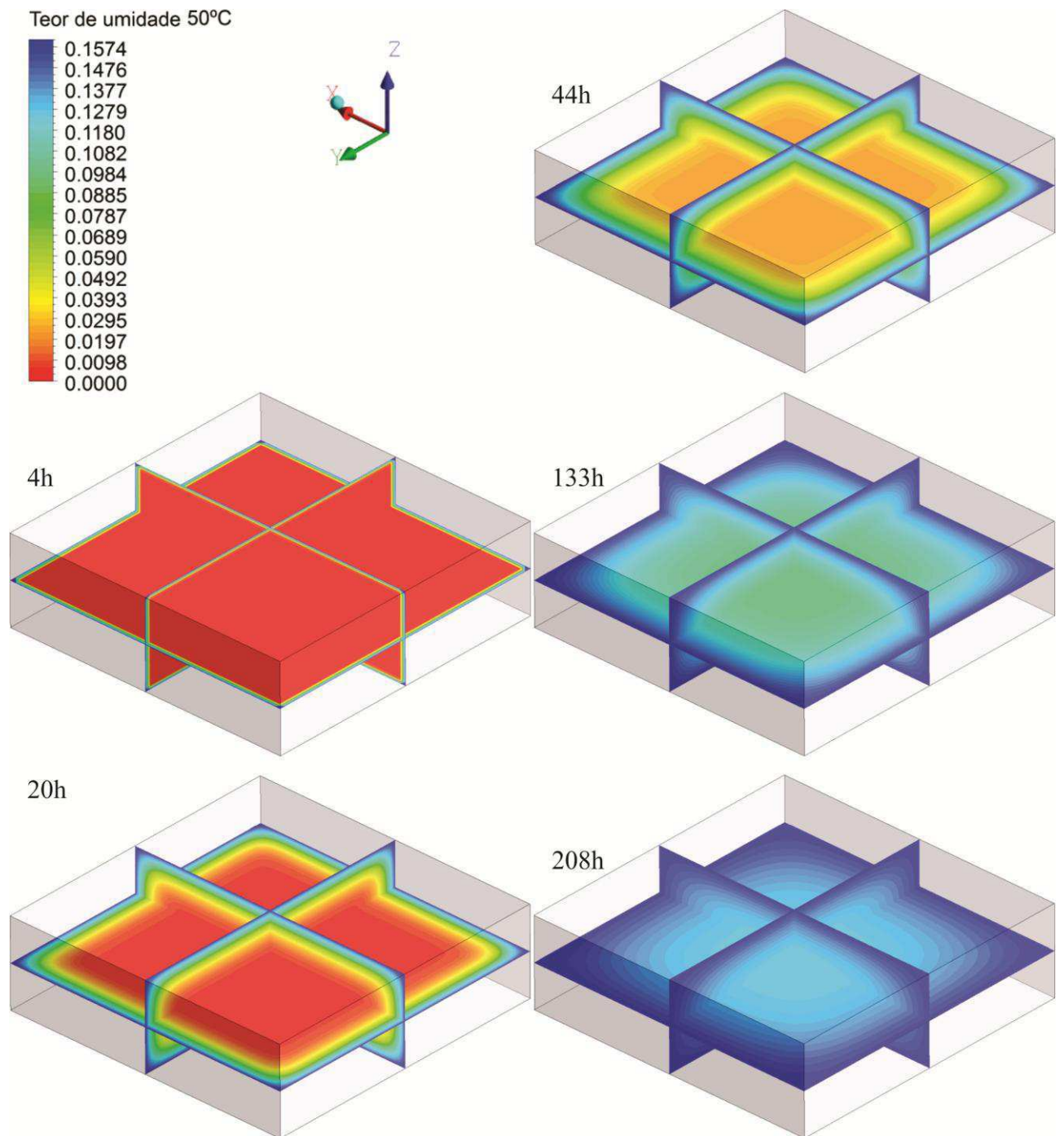


Figura 4.18 Distribuição do teor de umidade no interior do compósito com reforço de fibra de caroá, na temperatura de 50°C e espessura de 6 mm nos planos $(x=0, y, z)$, $(x, y=0, z)$ e $(x, y, z=0)$ em tempos variados.

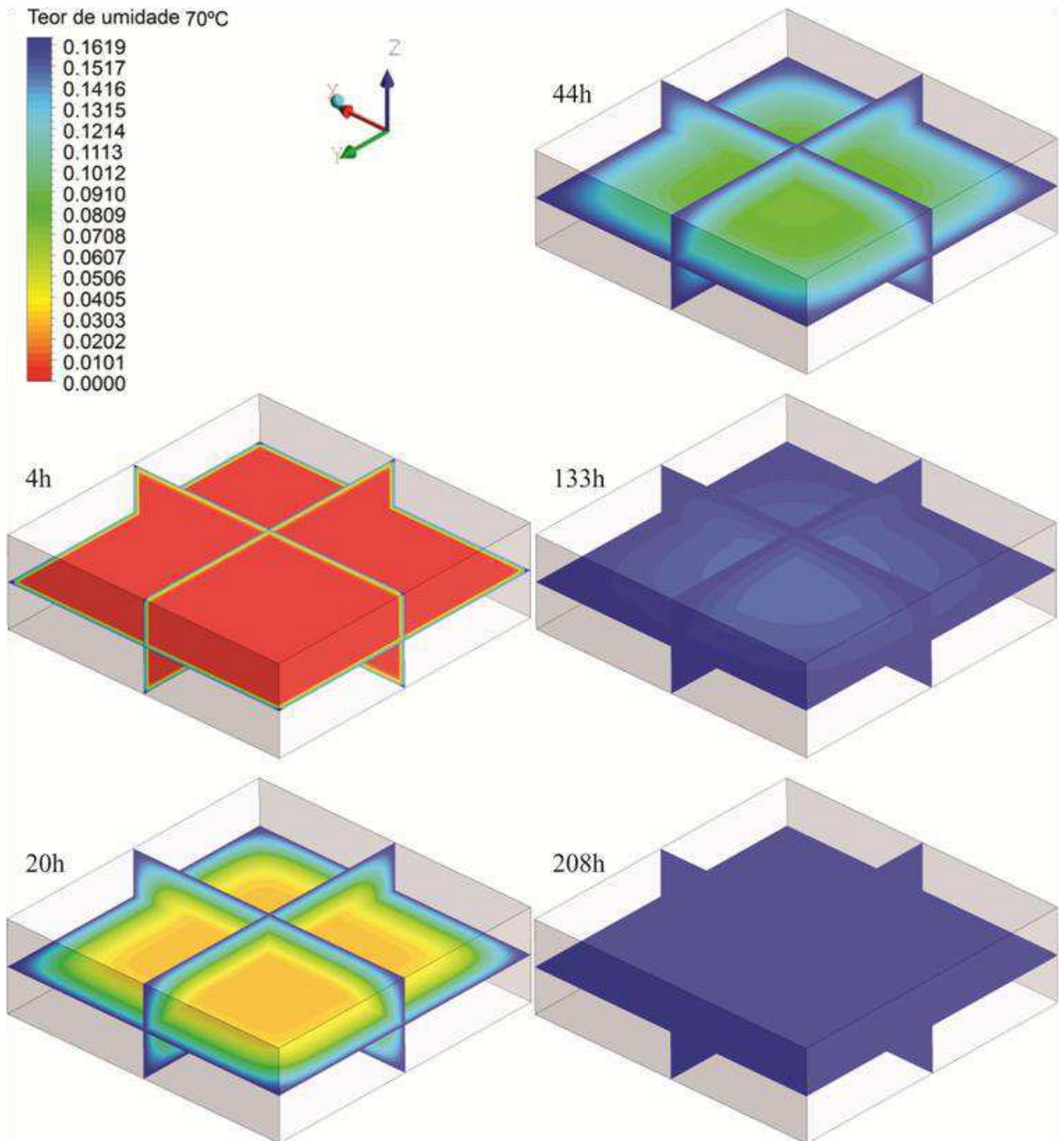


Figura 4.19 Distribuição do teor de umidade no interior do compósito com reforço de fibra de caroá, na temperatura de 70°C e espessura de 6 mm nos planos ($x=0, y, z$), ($x, y=0, z$) e ($x, y, z=0$) em tempos variados.

O CFX[®] é um software de CFD integrado, no qual é possível construir a geometria, fazer a malha numérica, ajustar os parâmetros da simulação, resolver e analisar posteriormente, sendo utilizado para a simulação e análise de diversos tipos de problemas físicos em níveis de investigação científica e, atualmente, como uma ferramenta poderosa para a solução de importantes problemas aplicados da engenharia. A utilização desse software possibilita solucionar problemas físicos de forma rápida e eficiente, construindo geometrias simples a modelos complexos com extrema praticidade, incorporando os parâmetros de simulação do problema, podemos delimitar as condições iniciais e parâmetros para solucioná-lo de maneira econômica e um curto espaço de tempo sem a necessidade de aguardar longos períodos de tempo para obter resultados, mesmo se tratando sorção de água em materiais compósitos para períodos longos. Outra vantagem do software oferecer a possibilidade de poder modificar o material em estudo, e utilizar a mesma geometria, fator que otimiza tempo e custos.

Os métodos analíticos e os numéricos formam a classe dos métodos teóricos, pois ambos objetivam resolver equações diferenciais. A diferença está apenas na complexidade das equações que cada método poderá resolver. Os métodos analíticos têm a desvantagem de ser aplicável apenas em problemas cujas hipóteses simplificadas os desviam demasiadamente do fenômeno físico, sendo aplicado, normalmente, a geometrias e condições de contorno simples.

Os métodos numéricos, por sua vez, praticamente não apresentam restrições, podendo resolver problemas com complicadas condições de contorno, definidos em geometrias arbitrárias e apresentando resultados com boa rapidez. Entretanto, existem dois tipos de erros que podem ocorrer na solução numérica quando os resultados são comparados com a realidade de um problema físico: Erros numéricos (má solução das equações diferenciais) e uso de equações diferenciais que não representam adequadamente o fenômeno. Logo, a ferramenta numérica é adequada e confiável quando se está de posse de um método numérico que resolva corretamente as equações diferenciais, e de um modelo matemático que represente com fidelidade o fenômeno físico.

Nesta pesquisa, podem-se definir as seguintes vantagens e limitações do modelo utilizado. Vantagens: Rapidez na obtenção dos dados comparados com o tempo para se realizar um experimento de absorção de água; Flexibilidade para se utilizar em qualquer material

independente da natureza (compósito, cerâmico, madeira, et.) e com diferentes dimensões; possibilidade de visualizar a penetração de água em qualquer tempo de processo e em qualquer posição dentro do material. As desvantagens são a impossibilidade de visualização da estrutura interna do compósito, a fibra e a dispersão da água dentro do material.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo teórico sobre a sorção de água em compósito reforçado com fibras de caroá em matriz poliéster insaturado via software ANSYS CFX[®]. Os experimentos de sorção de água deste compósito foram realizadas para uma composição de 30% de reforço e 70% de matriz, poliéster, nas temperaturas de 25, 50 e 70°C. Foi apresentada uma modelagem matemática tridimensional transiente para prever a transferência de massa durante a absorção de água. Os dados preditos pelo modelo numérico, foram comparados com os dados experimentais fornecidos por Nóbrega (2007).

Considerando os resultados obtidos verifica-se que:

- a) A modelagem matemática utilizada para a obtenção da solução numérica de sorção de água em compósitos de poliéster insaturado reforçados por fibras de caroá de 20,00 x 20,00 mm e espessura 3 e 6 mm foi adequada;
- b) A cinética de sorção de água nos compósitos reforçados com fibras de caroá mostrou ser influenciada pela relação área/volume. Pôde-se observar que em tempos curtos, aproximadamente 50 horas, os corpos com menor relação área/volume apresentam uma maior velocidade de sorção. Em tempos longos os compósitos com maior relação área/volume apresentam maiores teores de água sorvida;
- c) A cinética de sorção de água é fortemente influenciada pela temperatura, sendo mais acentuada em temperaturas mais elevadas;
- d) O teor de umidade de equilíbrio (saturado em água) dos compósitos com 30% de fibras de caroá apresentaram valores de 14,48% a 25°C e 16,52% a 70°C, para as espessuras de 3 e 6 mm, respectivamente;
- e) Os gradientes de umidade são maiores nos planos superficiais e, principalmente nos vértices do sólido, que estão em contato diretos com a água, numa maior área;
- f) O coeficiente de difusão do compósito com 30% de fibra de caroá mostrou-se ser dependente do teor de umidade e da temperatura para espessura de 3 e 6 mm.

5.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Como sugestões para futuras pesquisas, pode-se citar:

- ✓ Aplicar os modelos apresentados neste trabalho à umidificação de outros sistemas, compósitos;

- ✓ Estudar a difusão de água nos compósitos com fibras vegetais levando em consideração a variação dimensional das fibras, isto é, o aumento da espessura do compósito durante o processo;
- ✓ Estudar o efeito da sorção de água nas propriedades mecânicas de compósitos poliéster/fibra vegetal e aplicar modelagem e simulação na sorção de água;
- ✓ Desenvolver e aplicar modelo matemático de sorção que incorpore a porosidade dos compósitos;
- ✓ Estudar o processo simultâneo de sorção de água e transferência de calor em compósitos reforçados por fibras vegetais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-OQLA, F. M.; SAPUAN, S.M. Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 66, n. 1, p. 347-354, 2013.

ANDREOPOULOS, A.G.; TARANTILI, P.A., Water sorption characteristics of epoxy resin – UHMPE fibers composites, **Journal Applied Polymer Science**, v.70, n. 4, p. 747-755, 1998.

ANNUCIADO, T. L. **Estudo da Chorisia speciosa e outras fibras vegetais como sorventes para o setor do petróleo**. Dissertação de Mestrado. (Mestrado em Engenharia Química) Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

ARAÚJO, G. T. **Estudo Químico e Físico-Químico da Mimosa *hostilis*Benth.**. Tese de Doutorado. (Doutorado em Engenharia Química) USP/ São Carlos. São Carlos, 2000.

ARAUJO, J. R.; ADAMO, C. B., SILVA, C. M. V.; PAOLI, M. A. Antistatic-Reinforced Biocomposites of Polyamide-6 and Polyaniline-Coated Curauá Fibers Prepared on a Pilot Plant Scale. **Polymer Composites.**, v. 34, n. 7, p. 1081–1090, 2013.

BAJPAI, P. K.; SINGH, I.; MADAAN, J. Tribological behavior of natural fiber reinforced PLA composites. **Wear** , v. 297, n. 1-2, p. 829–840, 2012.

BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. Composite reinforced with cellulose based fiber. **Progress in Polymer Science**, Pittsburgk. v.24, :n.2, p.221-274, 1999.

BRYDSON, J. A., **Plastics Materials**, Butterworth-Heinemann,7^aed. London, UK, 1999.

CALLISTER Jr, W. D. **Materials Science and Engineering: an Introduction**. 6.ed. Nova Jessy, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2003.

CALLISTER Jr, W.D.; RETHWISCH, D.G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CARVALHO, LAURA H.; CAVALCANTI, WILMA S. Propriedades Mecânicas de Tração de compósitos poliéster/tecidos híbridos sisal/vidro. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 16, n. 1, p. 33-37, 2006.

CARVALHO, L. H.; LADCHUMANANANDASIVAM, R.; ALEXANDRE, M. E.O.; CAVALCANTI, W. S. **Propriedades de Compósitos Poliéster/Fibra da Folha do Abacaxi**. Congresso em Ciência de Materiais do Mercosul. Joinville/SC – BRASIL, 2004.

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.; CARVALHO, L.H.; LIMA, A.G.B de. Difusão de Água em compósitos poliéster insaturado reforçados por tecido híbrido de juta-vidro: Modelagem e Simulação. **Revista Matéria**, v. 10, n.1, p. 479-488, 2005.

CAVALCANTI, W. S., CARVALHO, L.H., ALSINA, O.L.S. LIMA, A.G.B. DE. **Sorção de Água de Compósito Poliéster Insaturado Reforçados por Tecido de Juta e Tecido Híbrido Juta/Vidro**. XVI CBECIMAT, Porto Alegre, 2004.

CHEREMISINOFF, Nicholas P., **Advanced Polymer Processing Operations**. Noyes Publications. New Jersey. USA, 1998.

CRAWFORD, R.J., **Plastics Engineering**. 3a ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, UK, 1999.

CRUZ, V.C.A.; NÓBREGA, W.P.S.; CARVALHO, L.H.; LIMA, A.G.B. An Experimental Study of Water Absorption in Polyester Composites reinforced with Macambira Natural Fiber. **Wiley-VCH Verlag Gmbh & Co**. v.42, n.11, 2011.

D'ALMEIDA, M. L. O. **Tecnologia de Fabricação da Pasta Celulósica**, SENAI, IPT, v. 1, São Paulo, 1981.

D'ALMEIDA, J. R. M., Propriedades Mecânicas de Fibras de Juta, **Ciência e Cultura**, São Paulo. v. 39, n.4, p.1025-1032, 1987.

D'ALMEIDA, A.L.F.S.; CARVALHO, L.H.; D'ALMEIDA, J.R.M. Characterization of caroá (*Neoglaziovia variegata*) fibers. WORLD POLYMER CONGRESS – 41st International Symposium on Macromolecules. Proceedings. Rio de Janeiro – Brazil, 2006.

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

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**. v.35, n. 11, p.1267–1276, 2004.

FAGURY, R. V. G. **Avaliação de Fibras Naturais para a Fabricação de Compósitos: Açaí, Coco e Juta**. Dissertação de Mestrado. (Mestrado em Engenharia de Materiais) UFPA/ Belém. Belém, 2005.

FLINN, R.; TROJAN, P., **Engineering Materials and their Applications**, Houghton Mifflin Company, Boston, 1981.

FOTAN Jr, O.; OLIVEIRA, F. S.; SILVA, D. A. K., Caracterização mecânica, térmica e perfil de absorção de água de compósitos híbridos d fibra de vidro/fibra de pupunheira em matriz poliéster insaturado. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.5: n. 01-09, 2010.

GASSAN, J. A Study of fibre and interface parameters affecting the fatigue behaviour of natural fibre composites, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 33, n. 3, p. 369-374, 2002.

GOODMAN, S. H. **Handbook of Thermoset Plastics**. Noyes Publications. New Jersey. USA,1998.

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

HULL, D.; CLYNE, T. W. **An Introduction to Composite Materials, Cambridge Solid State Science Series**, Second Edition, Cambridge, 1996.

IDRISS ALI, K. M.; UDDIN, M. K.; BHUTYAN, M. I. U. & KHAN, M. A. Improvement of Jute fiber through ultraviolet-cured film of urethane acrylate, **Journal of Applied Polymer Science**, v.54, n.3, p.303-308, 1994.

ISHIZAKI, M.H.; LEILA L. Y. VISCONTE; CRISTINA R. G. FURTADO; MÁRCIA C. A. M.; LEITE JEAN L. LEBLANC. 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.

JOLIFF, Y.; BELEC, L.; CHAILAN, J.F. Modified water diffusion kinetics in an unidirectional glass/fibre composite due to the interphase area: Experimental, analytical and numerical and numerical approach. **Composite Structures**, v. 97, p. 296–303, 2012.

KUMOSA, L.; BENEDIKT, B.; ARMENTROUT, D.; KUMOSA, M. Moisture absorption properties of unidirectional glass/polymer composites used in composite (non-ceramic) insulators, **Composites Part: A**, v. 35, n.9, p. 1049-1063, 2004.

LARANJEIRA, E. e CARVALHO, L. H. Compósito Poliéster/Fibras Unidirecionais de Juta. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS. p. 1637-1643. Natal – RN, 2002.

LARANJEIRA, E., **Propriedades de Compósitos Poliéster/Juta. Influência da Adição de Carga Mineral Nanoparticulada e Sistema Antichama**. 159f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande. Paraíba. 2004.

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.

LOPES, F. P.D.; SANTOS, L. F.L.; MONTEIRO, S. N. Efeito do Tratamento das Fibras de Carauá nas Propriedades Mecânicas de Compósitos com Matriz Poliéster. p.861-870. 62º Congresso Anual da ABM / 62nd ABM International Annual Congress. Vitória – ES, 2007.

MARCOVICH, N. E.; REBOREDO, M. M.; ARANGUREN, M. I. Moisture diffusion in Polyester – Wood flour Composites. **Polymer**, v. 40, p. 7313 – 7320, 1999.

MARTINS, G. S.; IOZZI, M. A.; MARTINS, M. A.; MATTOSO, L. H. C.; FERREIRA, F. C. Caracterização mecânica e térmica de compósitos de Poli (Cloro de Vinila) reforçados com fibras de sisal. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 14, n.5, p. 326-333, 2004.

MATTHEWS, F.L.; RAWLINGS, R.D. **Composite Materials: Engineering and Science**. Chapman & Hall. London, 1994.

MARINUCCI, G. **Materiais Compósitos Poliméricos**. São Paulo, Artliber Editora, 2011, p. 22 – 75.

MARCOVICH, N. E.; REBOREDO, M. M.; E ARANGUREN, M. I., Moisture Diffusion in Polyester - Woodflour Composites. **Polymer**, v.40, p. 7313-7320, 1999.

MEDEIROS, E.S.; AGNELLI, J.A.M.; JOSEPH, K.; CARVALHO, L.H.; MATTOSO, L.H.C.; **Journal Applied Polymer Science**., v. 90, n.6, p.1678, 2003.

MITCHELL, BRIAN S. **An Introduction to Materials Engineering and Science**. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. USA, 2004.

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

MOTHÉ, C. G.; ARAUJO, C. R. Caracterização térmica e mecânica de compósitos de poliuretano com fibras de Curauá. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol. 14, n. 4, p. 274-278, 2004.

MONTEIRO, S. N.; LOPES, F. P.D. Ensaio em Compósitos Poliméricos reforçados com Fibras. p. 871-879. 62º Congresso Anual da ABM / 62nd ABM International Annual Congress. Vitória – ES, 2007.

MONTEIRO, S. N.; RANGEL, J. J.A. Efeito da Micromorfologia das Fibras de Carauá como Reforço em Compósitos de Matriz Polimérica. p.748-756. 62º Congresso Anual da ABM / 62nd ABM International Annual Congress. Vitória – ES, 2007.

NASCIMENTO, J. J. S. **Fenômenos de Difusão Transiente em Sólidos Paralelepípedos. Estudo de caso: Secagem de Materiais Cerâmicos.** 2002. 207f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, PB.

NÓBREGA, M.M.S., BRAZ, C.J.F., ALVES, T.S., FONSECA, V.M., CARVALHO, L.H. Tensile and Impact Properties of Macambira and Caroá fiber reinforced Unsaturated Polyester Composites. **International Conference on Science & Technology for Sustainable Development.** New Delhi, 2006.

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. p.1231-1232. Águas de Lindóia – São Paulo, 2005.

NÓBREGA, M. M. S. **Propriedades mecânicas de compósitos de matriz poliéster reforçados por tecidos híbridos juta/vidro.** 2000. 68f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Paraíba.

NÓBREGA, M. M. S. **Compósitos de matriz poliéster com fibras de caroá Neoglaziovia variegata: Caracterização mecânica e sorção de água.** Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, 123f, 2007.

NÓBREGA, M. M. S.; CAVALCANTI, W. S.; CARVALHO, L. H.; LIMA, A. G. B. Water absorption in unsaturated polyester composites reinforced with caroá fiber fabrics: modeling and simulation. **Materialwissenschaft und werkstofftechnik**, v.41, n.5, p.300 – 305, 2010.

PAIVA, J. M .F.; FROLLINI, E. Matriz Termofixa Fenólica em Compósitos Reforçados com Fibras de Bagaço de Cana-de-açúcar. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, n.2, p.78-87, abr./jun. 1999.

PAVLIDOU, S.; PAPASPYRIDES, C. D., The effect of hygrothermal history on water sorption and interlaminar shear strength of glass/polyester composites with different interfacial strength, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 34, n.11, p. 1117- 1124, 2003.

PEGORETTI, A.; PENATI, A., Effects of hygrothermal aging on the molar mass and thermal properties of recycled poly (ethylene terephthalate) and its short glass fibre composites. **Polymer Degradation and Stability**, v.86, n. 2, p. 233-243, Nov. 2004.

KAW, A. K. **Mechanics Composite Materials**. 2^a ed. Taylor & Francis Group, LLC, New York, 2006.

RAZERA, I.A.T.; PARDINI, L.C.; FROLLINI, E. Influência da Variação da Porcentagem e Comprimento de Fibras nas Propriedades Mecânicas de Compósitos reforçados com Fibras de Côco e Banana. 8º Congresso Brasileiro de Polímeros, **Anais...** p.1186-1187. Águas de Lindóia – São Paulo, 2005.

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.

REZENDE, M. C.; COSTA, M. L.; BOTELHO, E. C. **Compósitos estruturais: Tecnologia e prática**. São Paulo: Artliber Editora, 2011, p. 22 – 75.

RIBEIRO, M. B. Fibrocultura: o Semi-Árido é o paraíso das fibras vegetais. In: RIBEIRO, M. B. (Ed.). **A potencialidade do semi-árido brasileiro**. Brasília: Revan, 2007. p. 121 – 136.

RICHARDSON, H., **Polymer Engineering Composites**, Applied Science Publishers, London, 1997.

ROUISSON, D.; COUTURIER, M.; SAIN, M.; MACMILLAN, B.; BALCON, B.J. Water absorption of hemp fiber/unsaturated polyester composites. **Polymer Composites**, v. 26, n. 4, p.510-524, 2005.

ROWELL, R. M.; SANADI, A. R.; CAULFIELD, D.F.; JACOBSON, R.E. Utilization of natural fibers in plastic composites: Problems and opportunities. 1^a International Lignocellulosics Plastics Composites. São Paulo, p.23-51, 1996.

SAIKIA, D. Studies of Water Absorption Behavior of Plant Fibers at Different Temperatures. **International Journal of Thermophysics**: v.31, n.4-5, p.1020-1026, 2010.

SHAH, D.U. Developing plant fibre composites for structural applications by optimising composite parameters: a critical review. **Springer Science+Business Media**, v.48, n. 18, pag. 6083–6107, Sep. 2013.

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, n.3, p. 763-777, Jun. 2002.

SRIHARI, S; REVATHI, A.; RAO, R. M. V. G. K. Hygrothermal effects on RT-cured glass-epoxy composites in immersion environments. Part A: Moisture absorption characteristics. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v.21, n.11, p. 983-991, 2002.

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

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. p.613-

620. 62º CONGRESSO ANUAL DA ABM / 62nd ABM International Annual Congress. Vitória, ES, **Anais...** Vitoria, p. 613-620, 2007.

SILVA, R. V.; FROLLINI, E. Propriedades de Compósitos de Matriz Termorrígida Fenólica Reforçada com Material de Origem Natural. 8º Congresso Brasileiro de Polímeros, **Anais...** Águas de Lindóia – São Paulo, 2005.

SILVA, R. V, **Compósito de Resina Poliuretana Derivada de óleo de Mamona e Fibras Vegetais**. 2003. 157f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo. São Carlos – SP.

SHACKELFORD, J. F. **Materials Science for Engineers**. 6.ed. Pearson Prentice Hall. New Jersey – USA, 2005.

SUDDLELL, B. C.; EVANS, W. J.; ISAAC, D. H.; CROSKY, A. A. Survey into the application of natural fibre composites in the automotive industry. In: International Symposium on Natural Polymer and Composites. p. 455-460. São Carlos, 2002.

TANG, X.; WHITCOMB, J. D.; LI, Y.; SUE, H. J. Micromechanics modeling of moisture diffusion in woven composites. **Composites Science and Technology**, v.65, n. 6, p. 817-826, 2005.

TANOBE, V. O. A.; AMICO, S. C.; SYDENSTRICKER, T. H. D. **Caracterização de Compósitos de matriz poliéster por fibras de luffa cilíndrica**. 2º COBEF – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO. Uberlândia – MG, 2003.

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, n.1, p.43-52, 2002.

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.

WAN, Y. Z.; WANG, L. Y.; HUANG, Y.; ZHOU, F.G., He, B. M.; CHEN, G. C.; HAN, K. Y., Moisture sorption and mechanical degradation of VARTMed three-dimensional braided carbon-epoxi composites. **Composites Science and Technology**, v.65, n.7-8, p. 1237-1243, Jun, 2005.

WANG, W.; SAIN, M.; COOPER, P. A. Study of moisture absorption in natural fiber plastic composites. **Composites Science and Technology**, v. 66, n.3, p.379-386, 2005.

WAMBUA, P.; IVENS, J.; VERPOEST, I. Natural Fibres: Can They Replace Glass in Fibre Reinforced Plastics? **Composites Science and Technology**, v. 63, n.9, p. 1259-1264, Jul. 2003.

WOLLERDORFER, M.; BADER, H. Influence of natural fibers properties of biodegradable Polymers. **Industrial Crops and Products**, v. 8, n.2, p.105-112, 1998.

VASCONCELOS, R. F. **Estudo da Cinética de deslignificação organossolve do Caroá (Neoglaziovia Variegata (Arr. Cam.) Mez.)**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2011.

XAVIER, P. L. O caroá: **História, Cultura e Distribuição Geográfica**. Serviço de informação agrícola, Ministério da agricultura. Rio de Janeiro, 1942. p. 24 – 56.

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.

YENG-FONG, S.; JI-XUAN, K. C.; CHING-SAN, H. Plant fibers and wasted fiber/epoxy green composites. **Composites: Part B**, v. 43, n. 7, p. 2817–2821, 2012.

YONG-JIE, W.; SILIKAS, N.; ZHEN-TING, Z.; WATTS, D. C. Hygroscopic dimensional changes of self-adhering and new resin-matrix composites during water sorption/desorption cycles. **dental materials**, v.27, n. 3, p. 259–266, 2010.