



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS**



**TESE**

**COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIÉSTER COM FIBRAS DE MACAMBIRA  
(Bromélia laciniosa): MODELAGEM, SIMULAÇÃO e EXPERIMENTAÇÃO.**

**ALUNO: Valério Carlos de Almeida Cruz**

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

**Dra. Laura Hecker de Carvalho**

Campina Grande, fevereiro de 2013

PB – Brasil

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS**

**COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIÉSTER COM FIBRAS DE MACAMBIRA  
(Bromélia laciniosa): MODELAGEM, SIMULAÇÃO e EXPERIMENTAÇÃO.**

**AUTOR: Valério Carlos de Almeida Cruz**

**ORIENTADORES: Prof.Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima**

**Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup> Laura Hecker de Carvalho**

**Curso: Doutorado em Engenharia de processos**

**Área de concentração: Desenvolvimento e Processos**

**Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de processos, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Processos.**

Campina Grande, fevereiro de 2013.

PB - Brasil

## FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

C957c Cruz, Valério Carlos de Almeida.  
Compósitos de matriz poliéster com fibras de macambira (Bromélia laciniosa) : modelagem, simulação e experimentação / Valério Carlos de Almeida Cruz. – Campina Grande, 2013.  
84 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2013.

"Orientação: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, Profa. Dra. Laura Hecker de Carvalho".

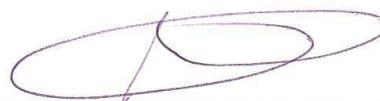
Referências.

1. Compósito Polimérico 2. Sorção de Água. 3. Fibras Vegetais. 4. Macambira 5. Método Numérico. I. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. II. Carvalho, Laura Hecker de. III. Título.

CDU 678.7(043)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE VALÉRIO CARLOS DE ALMEIDA CRUZ APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE.

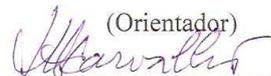
Tese de Doutorado **Aprovada** em 28 de Fevereiro de 2013.



Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

UAEM/CCT/UFCG

(Orientador)

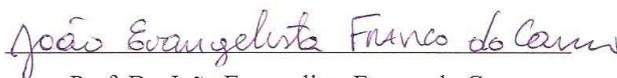


Prof. Dra. Laura Hecker de Carvalho

UAEMa/CCT/UFCG

(Orientadora)

**BANCA  
EXAMINADORA**



Prof. Dr. João Evangelista Franco do Carmo

UAF/CCT/UFCG

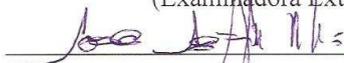
(Examinador Externo)



Prof. Dra. Wilma Sales Cavalcanti

UAEMa/CCT/UFCG

(Examinadora Externa)



Prof. Dr. José Jefferson da Silva Nascimento

UAEMa/CCT/UFCG

(Examinador Externo)



Prof. Dr. Enivaldo Santos Barbosa

UAEM/CCT/UFCG

(Examinador Externo)

*“A possibilidade de realizarmos um sonho é o que torna a vida interessante”.*

*Paulo Coelho.*

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, pela orientação, dedicação e principalmente pelo apoio para realização deste trabalho.

A professora Dra. Laura Hecker de Carvalho, pela orientação e pelos conhecimentos transmitidos por toda esta jornada.

Ao professor Dr. José Jéfferson da Silva Nascimento pelas valiosas contribuições e sugestões.

Ao professor Dr. João Evangelista Franco do Carmo pelas contribuições prestadas a este trabalho.

Ao professor Dr. Enivaldo Santos Barbosa pelas significativas contribuições a este trabalho.

A Dra. Wilma Sales Cavalcanti um agradecimento especial pela contribuição efetiva e decisiva na preparação deste trabalho, assim como a amizade e companheirismo nestes vários anos de convivência.

Ao meu pai Inácio de Almeida Cruz (In memoriam), e a minha mãe Osmarina Almeida Cruz (In memoriam).

A minha esposa Maria Ângela pela contribuição, companheirismo e apoio.

A Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UFCG) pelo uso de seus laboratórios e equipamentos.

Aos meus colegas do doutorado: Augusto, Aguinaldo, Brauner, Chico, Clenilson, Evaldo, Vieira, Fernando, Flavia, Ivonete, João Carlos, João Paulo, Jobsan, José Carlos, Josedite, Marcos Assis, Paulo Moraes e Vitoria.

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

Agradecimento especial a CAPES pelos recursos disponibilizados através da bolsa de estudo cedida para a execução deste trabalho.

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

## SUMÁRIO

<b>CAPITULO I</b> .....	01
1.0 INTRODUÇÃO.....	01
1.1 Informações gerais e relevância do tema.....	01
1.2 Objetivos.....	03
<b>CAPITULO II</b> .....	04
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	04
2.1 Compósitos .....	04
2.1.1 Características Gerais .....	04
2.1.2 Compósitos Fibrosos .....	05
2.1.3 Classificação dos Compósitos .....	05
2.2 Reforço .....	07
2.3 Matriz Polimétrica .....	08
2.3.1 Resina Poliéster .....	08
2.3.2 Estrutura do Poliéster insaturado .....	09
2.3.3 Poliéster Ortoftálico.....	10
2.4 Fibras Vegetais .....	10
2.4.1 Características Gerais .....	10
2.4.2 Microestrutura, composição química e propriedades das fibras vegetais .....	12
2.4.3 Fibras de Macambira .....	14
2.5 Compósitos reforçados por fibras vegetais.....	17
2.6 Sorção de água.....	23
<b>CAPITULO III</b> .....	27
3.0 MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1 Materiais .....	27
3.1.1 Matriz polimétrica .....	27
3.1.2 Descrição da Macambira usada nos experimentos .....	27

3.2 - Métodos experimental .....	28
3.2.1 Caracterização morfológica das fibras .....	28
3.2.3.1- Preparação dos compósitos .....	28
3.2.3.2 Ensaio de sorção de água .....	30
3.3 Método matemático .....	32
3.3.1 - O modelo de difusão de massa ( absorção de água ).....	32
3.3.2 Solução numérica do modelo .....	34
3.3.2.1 Informações gerais.....	34
3.3.2.2 Discretização da equação de difusão .....	35
3.3.2.3 Geração da malha .....	39
3.3.2.4 Estimativa dos pontos de simetria .....	40
3.3.2.5 Tratamento estatístico dos dados .....	41
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	44
4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	44
4.1. Experimental.....	44
4.1.1 Morfologia das fibras de macambira .....	44
4.1.2 Ensaio de sorção de água .....	45
4.2 Teórico.....	49
4.2.1 Estimativa não-linear dos parâmetros .....	49
4.2.2 Aplicação do modelo numérico.....	54
4.2.2.1 Cinética de sorção.....	54
4.2.3 Estimativa do coeficiente de difusão da massa.....	66
<b>CAPÍTULO V</b> .....	75
5.0 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	75
5.1 Conclusões.....	75
5.2 Sugestões para futuros trabalhos .....	76
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	77

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Compósitos reforçados .....	04
Figura 2.2 – Compósitos com diferentes reforços.....	06
Figura 2.3 – Representação da Reação de Obtenção do Poliéster Insaturado.....	09
Figura 2.4 – Estrutura química do ácido ortofitálico .....	10
Figura 2.5 – Composição da parede celular na fibra vegetal .....	12
Figura 2.6 – Estrutura da Parede Celular .....	13
Figura 2.7 – Estrutura da Celulose .....	13
Figura 3.1 – a) Macambira (bromélia laciniosa) .....	27
Figura 3.1 – b) Planta e Fruto.....	27
Figura 3.2 – a) Macambira desfibrada manualmente .....	28
Figura 3.2 – b) Penteadada manualmente, tamanho 3 cm .....	28
Figura 3.3 – Compósito reforçado com fibras de macambira .....	29
Figura 3.4 – Corpos de prova para ensaio de sorção de água, com 3 e 6 mm de espessura .....	30
Figura 3.5 – Corpos de prova imersos em água nos recipientes .....	31
Figura 3.6 – Configuração geométrica do problema físico .....	32
Figura 3.7 – Volume de controle diferencial usado na solução numérica .....	36
Figura 3.8 – Posição da interface $i$ entre os pontos P e E .....	38
Figura 4.1 – Micrografias de fibra de Macambira não-tratada 200x e 480x.....	44
Figure 4.2 – Micrografias da fibra de macambira não-tratada 2400x .....	45
Figura 4.3 – Cinética de sorção de água dos compósitos reforçados com 30% de fibras curtas de macambira. Temperaturas do ensaio de 25°C, 50°C e 70°C e espessura do corpo de prova de 3mm.....	47
Figura 4.4 – Cinética de sorção de água dos compósitos reforçados com 30% de fibras curtas de macambira. Temperatura do ensaio de 25°C,50°C e 70°C e espessura do corpo de prova de 6mm.....	47
Figura 4.5 Cinética de sorção de água dos compósitos reforçados com 30% de fibras curtas de macambira. Temperatura do ensaio de 25°C e espessuras do corpo de prova de 3mm e 6mm .....	48
Figura 4.6 – Cinética de sorção de água dos compósitos reforçados com 30% de fibras curtas de macambira. Temperatura do ensaio 50°C e espessuras do corpo de prova de 3 e 6mm .....	48

Figura 4.7 – Cinética de sorção de água dos compósitos reforçados com 30% de fibras curtas de macambira. Temperatura do ensaio 70°C e espessuras do corpo de prova de 3 e 6mm.....	49
Figura 4.8 – Comparação entre teores de umidade médios de matriz, experimental e predito pela equação (3.21) .....	50
Figura 4.9 – Comparação entre teores de umidade experimental e predito pela equação (3.22), para compósito reforçado com 30% de fibras de macambira, 3mm de espessura e temperatura de 25°C .....	51
Figura 4.10 – Comparação entre teores de umidade experimental e predito pela equação (3.22), para compósito reforçado com 30% de fibras de macambira, 6mm de espessura e temperatura de 25 °C.....	51
Figura 4.11 – Comparação entre teores de umidade experimental e predito pela equação (3.22), para compósito reforçado com 30% de fibras de macambira, 3mm de espessura e temperatura de 50°C .....	52
Figura 4.12 – Comparação entre teores de umidade experimental e predito pela equação (3.22), para compósito reforçado com 30% de fibras de macambira, 6mm de espessura e temperatura de 50°C .....	52
Figura 4.13 – Comparação entre teores de umidade experimental e predito pela equação (3.22), para compósito reforçado com 30% de fibras de macambira, 3mm de espessura e temperatura de 70°C .....	53
Figura 4.14 – Comparação entre teores de umidade experimental e predito pela equação (3.22), para compósito reforçado com 30% de fibras de macambira, 6mm de espessura e temperatura de 70°C .....	53
Figura 4.15 – Comparação entre os resultados teóricos (modelo proposto) e experimental do teor de umidade médio adimensional, durante umidificação do compósito poliéster insaturado reforçado com 30% de fibras de macambira, 3mm de espessura e temperatura de 25°C.....	54
Figura 4.16 – Comparação entre os resultados teóricos (modelo proposto) e experimental do teor de umidade médio adimensional, durante umidificação do compósito poliéster insaturado reforçado com 30% de fibras de macambira, 3mm de espessura e temperatura de 50°C.....	55
Figura 4.17 – Comparação entre os resultados teóricos (modelo proposto) e experimental do teor de umidade médio adimensional, durante umidificação do compósito	

poliéster insaturado reforçado com 30% de fibras de macambira, 3mm de espessura e temperatura de 70°C.....	55
Figura 4.18 – Comparação entre os resultados teóricos (modelo proposto) e experimental do teor de umidade médio adimensional, durante umidificação do compósito poliéster insaturado reforçado com 30% de fibras de macambira,3mm de espessura e temperatura de 25°C.....	56
Figura 4.19 – Comparação entre os resultados teóricos (modelo proposto) e experimental do teor de umidade médio adimensional, durante umidificação do compósito poliéster insaturado reforçado com 30% de fibras de macambira,6mm de espessura e temperatura de 50°C.....	56
Figura 4.20 – Comparação entre os resultados teóricos (modelo proposto) e experimental do teor de umidade médio adimensional, durante umidificação do compósito poliéster insaturado reforçado com 30% de fibras de macambira,6mm de espessura e temperatura de 70°C.....	57
Figura 4.21 – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito, com reforço de 30% de fibra de macambira, à temperatura de 25°C e espessura de 3mm, no plano $x^*=x/R=0,5$ em tempos variados .....	58
Figura 4.22 – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito, com reforço de 30% de fibra de macambira, à temperatura de 25°C e espessura de 3mm,no plano $x^*=x/R=0,5$ em tempos variados .....	59
Figura 4.23 – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito, com reforço de 30% de fibra de macambira à temperatura de 50°C e espessura de 3 mm,no plano $x^*=x/R=0,5$ em tempos variados .....	60
Figura 4.24 – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito, com reforço de 30% de fibra de macambira à temperatura de 50°C e espessura de 6mm, no plano $x^*=x/R=0,5$ em tempos variados .....	61
Figura 4.25 – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito, com reforço de 30% de fibra de macambira à temperatura de 70°C e espessura de 6mm, no plano $x^*=x/R=0,5$ em tempos variados .....	62
Figura 4.26 – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito, com reforço de 30% de fibra de macambira à temperatura de 70°C e espessura de 6 mm,no plano $x^*=x/R=0,5$ em tempos variados .....	63

- Figura 4.27 – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito, com reforço de 30% de fibra de macambira nas temperaturas de 25, 50e 70°C na espessura de 3 mm,no plano  $x^*=x/R=0,5$  em tempos variados no tempo de 2640 minutos.....64
- Figura 4.28 – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito, com reforço de 30% de fibra de macambira nas temperaturas de 25, 50e 70°C na espessura de 6 mm,no plano  $x^*=x/R=0,5$  em tempos variados no tempo de 2640 minutos.....65
- Figura 4.29 – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito, com reforço de 30% de fibra de macambira na temperatura na 70°C nas espessuras de 3 e 6 mm,no plano  $x^*=x/R=0,5$  em tempos variados no tempo de 2640 minutos.....65
- Figura 4.30 – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito, com reforço de 30% de fibra de macambira na temperatura na 50°C nas espessuras de 3 e 6 mm,no plano  $x^*=x/R=0,5$  em tempos variados no tempo de 2640 minutos.....66
- Figura 4.31 – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito, com reforço de 30% de fibra de macambira na temperatura na 25°C nas espessuras de 3 e 6 mm,no plano  $x^*=x/R=0,5$  em tempos variados no tempo de 2640 minutos.....66
- Figura 4.32 – Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do compósito reforçado com 30% de fibras, 3mm de espessura e temperatura de 25°C...69
- Figura 4.33 – Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do compósito reforçado com 30% de fibras, 6mm de espessura e temperatura de 25°C...70
- Figura 4.34 – Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do compósito reforçado com 30% de fibras, 3mm de espessura e temperatura de 50°C...70
- Figura 4.35 – Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do compósito reforçado com 30% de fibras, 6mm de espessura e temperatura de 50°C...71
- Figura 4.36 – Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do compósito reforçado com 30% de fibras, 3mm de espessura e temperatura de 70°C...71
- Figura 4.37 – Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do compósito reforçado com 30% de fibras, 6mm de espessura e temperatura de 70°C...72

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 – Composição química de fibras naturais.....	14
Tabela 2.2 – A análise química de algumas fibras vegetais.....	14
Tabela 4.1 – A apresentação das condições de umidificação, composição e dimensões das amostras usadas para cada experimento.....	46
Tabela 4.2 – A apresentação dos teores de umidade.....	46
Tabela 4.3 – Parâmetros da Equação (3.22) ajustados aos dados experimentais.....	50
Tabela 4.4 – Parâmetros estimados pelo modelo numérico, erro, variância, tempo total de processos .....	67
Tabela 4.5 – Dados obtidos do coeficiente de difusão e teores de umidade inicial e final .....	68
Tabela 4.6 – Coeficiente de difusão em função do teor de umidade e temperatura para o compósito com 3 e 6mm de espessura .....	73
Tabela 4.7 – Parâmetros da Equação ajustados aos dados experimentais .....	73

## NOMENCLATURA

### Letras Latinas

$A_i$ – Constantes $i = 1, 2, n$	[-]
$A_i$ – Constantes $i = 0, 1, 2$ .	[-]
$A_{ij}$ – Constantes determinadas pela condição inicial e a propriedade de ortogonalidade das funções trigonométricas	[-]
$A_E, A_W, A_N, A_S, A_T, A_F, A_P^\circ$ - constante	[-]
$B_n$ – Constante	[-]
$D$ – Coeficiente de difusão efetivo	$[m^2/s]$
$dM/dt$ – Taxa de difusão	$[1/s]$
$dM/dy$ – Gradiente de concentração medido normalmente a seção $[(kg/kg)/m]$	
$AM/at$ – Taxa de difusão	$[1/s]$
ERMQ – Erro médio quadrático	$[(kg(kg))^2]$
E, W, N, S, F, T – Pontos nodais	[-]
e, w, s, n, f, t – Faces dos pontos nodais	[-]
exp – Exponencial	
$f_i$ – Fator de interpolação	[-]
$i, j$ – Posição do ponto nodal na malha	[-]
m – Massa	$[kg]$
M – Teor de umidade em base seca	$[kg/kg]$
$M^*$ - Razão de umidade	[-]
$M^\circ$ - 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)	$[m]$
$L/d$ – Relação Comprimento/ Diâmetro da fibra	$[m/m]$
t – Tempo	$[s]$
V – Volume	$[m^3]$
x, y, z – Coordenadas cartesianas	$[m]$

### Letras Gregas

$\rho$ – Densidade – (massa específica)	$[kg/m^3]$
$\nabla$ - Operador nabla	[-]
$\Gamma^\Phi$ - Propriedade do material	[-]
$\zeta = \rho$ – Densidade do sólido seco	$[kg/m^3]$
$\sigma$ – Tensão	$[MPa]$
$\delta$ - Deformação	$[\%]$

**Sobrescritos**

- \* Adimensional
- Anterior

**Subscrito**

- e – Equilíbrio
- e, w, n, s, f, t – Faces dos pontos nodais
- i – Material i
- o – Inicial
- P – Ponto nodal P
- t – Tempo
- m – matriz
- b.s – base seca

**Abreviações**

- Exp – Experimental
- Num – Numérico
- ASTM – American Standards for Testing and Materials
- FNV – Fibras Naturais Vegetais
- MPa – Mega Pascal
- GPa – Giga Pascal
- MEK – Metil Etil Cetona
- mm – Milímetro
- MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

## RESUMO

Cruz, Valério Carlos de Almeida. **Compósitos de Matriz Poliéster com Fibras de Macambira (Bromélia Laciniosa): Modelagem, Simulação e Experimentação.** Campina Grande, Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande – 2013 – Tese (Doutorado).

O presente trabalho tem como objetivo o estudo teórico/experimental da sorção de água em compósitos poliméricos reforçados com fibras de macambira (Bromélia Laciniosa). Foi utilizado como matriz polimérica uma resina de poliéster insaturado e fibras de Macambira originárias do cariri paraibano. Os compósitos foram confeccionados com 70% de poliéster e 30% de fibras cortadas em tamanhos de aproximadamente 3 cm. Os ensaios de sorção de água foram realizados com amostras de 3 mm e 6 mm de espessura nas temperaturas de 25, 50 e 70°C. Uma modelagem matemática tridimensional transiente foi usada para prever a transferência de massa durante a sorção de água destes compósitos. A cinética de sorção de água nos compósitos mostrou ser influenciada pela sua relação área/volume. Verificou-se que em tempos curtos, aproximadamente 50 horas, e temperatura de processo mais elevadas, os corpos com maior relação área/volume apresentam uma maior velocidade de sorção. Em tempos longos, os compósitos com maior relação área/volume e maior temperatura de processo apresentam maiores teores de água sorvida. O teor de umidade de equilíbrio dos compósitos com 30% de fibras de Macambira apresentaram valores de 16,8%, a 25°C, 17,00% a 50°C e 19,10% a 70°C, para as espessuras de 3 mm, e de 12,5% a 25°C, 15,8% a 50°C e 14,8% a 70°C, para a espessura de 6 mm. Resultados teóricos do teor de umidade médio dos compósitos foram comparados com dados experimentais e um bom ajuste foi obtido. Desta comparação, os coeficientes de difusão de massa foram obtidos para cada condição experimental.

**Palavras-chave:** compósito polimérico; sorção de água; fibras vegetais; Macambira; método numérico.

## ABSTRACT

Cruz, Valério Carlos de Almeida. **Polyester matrix composite with macambira fiber (BroméliaLaciniosa): Modeling, Simulation and Experimentation.** Campina Grande, Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande – 2013 – Tese (Doutorado).

This research aims to study theoretically and experimentally water absorption in polymer composites reinforced with macambira fiber (BromeliaLaciniosa). As polymer matrix was used unsaturated polyester resin and macambira fiber from cariri region of the Paraíba state. The composite samples were manufactured with 70% polyester resin and 30% macambira fiber (3cm length). Experiments were carried out in samples with 3 and 6 mm thickness at the temperatures 25, 50 and 70°C. A transient 3D mathematical model was used to predict mass transfer during water sorption of the composites. It was verified that the water sorption kinetic is affected by area /volume relationships. For short time, approximately 50 h, the sample with lower area/volume relationships and higher process temperature presents a larger water absorption velocity, and for long times, these samples presents higher equilibrium water content. Equilibrium moisture content of the samples were 16.8% at 25°C, 17.00% at 50°C and 19.10% at 70°C, for 3 mm thickness, and 12.5% at 25°C, 15.8% at 50°C and 14.8% at 70 °C, for 6 mm thickness. Predicted results of the moisture content of the composites were compared with experimental data, and a good agreement was verified. From this comparison diffusion coefficients were obtained for different experimental conditions.

**Keywords:** polymer composite; water sorption; vegetal fiber; macambira; numerical method.

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

### 1.1– Informações gerais e relevância do tema

A busca por materiais ecologicamente correto 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 (ISHIZAKI et al., 2006; D'ALMEIDA et al., 2006).

Além da grande importância sócio-econômica, ligada à cultura de fibras vegetais no Brasil, tais como o sisal, juta e macambira existem outros fatores que motivam os estudos visando à aplicação destas fibras. Dentro da visão ecológica, a utilização de fibras vegetais como reforço em lugar das fibras sintéticas tem despertado grande interesse da indústria de produtos ecologicamente corretos bem como reflete 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 (TANOBE et al., 2003; MARTINS et al., 2004).

O desenvolvimento de materiais adequados de maneira ecológica e a melhor adequação dos processos tem sido uma necessidade para minimizar os problemas ambientais no mundo. 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. As fibras naturais apresentam um grande potencial de aplicação na indústria. Nos últimos anos, o uso de fibras naturais como curauá, côco, sisal, rami, bagaço de cana-de-açúcar, juta, abacaxi, dentre outras, como reforço em materiais poliméricos teve um acelerado crescimento. O uso de fibras vegetais como reforço em compósitos poliméricos com o objetivo de substituir total ou parcialmente as fibras sintéticas tem recebido muita atenção dos pesquisadores. Isto porque as fibras vegetais apresentam importantes vantagens como:

baixo custo, baixa densidade, resistência, baixa abrasividade aos equipamentos de processo, são biodegradáveis e não são tóxicas ou poluentes, diminuindo assim problemas ambientais, (BLEDZKI e GASSAN, 1999; MEDEIROS et al., 2003; NÓBREGA et al., 2005; CAVALCANTI et al., 2004; MOTHÉ et al., 2004).

As principais desvantagens no emprego fibras vegetais em compósitos poliméricos são relacionadas à natureza polar e hidrofílica bem como à susceptibilidade destas 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. A qualidade da interface fibra-matriz é significativa para a aplicação de fibras vegetais como reforço para plásticos (BLEDZKI e GASSAN, 1999; MEDEIROS et al., 2003; CARVALHO et al., 2006; NÓBREGA et al., 2006).

A alta absorção de umidade das fibras vegetais é outro obstáculo considerável. A 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 por fibra não tratada a adesão é insuficiente entre matriz polimérica hidrofóbica e fibra hidrofílica, tanto diminui as propriedades mecânicas do sistema como leva à delaminação com o tempo (GASSAN, 2002; WAMBUA et al., 2003; ROUISSON et al., 2005; WANG et al., 2005).

No entanto, a maior parte dos trabalhos resume-se considerando 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 (MARCOVICH, 1999; PEGORETTI e PENATI, 2004; TANG et al., 2005).

Devido à importância do tema, alguns pesquisadores têm estudado numericamente o problema usando modelo tridimensional transiente (NASCIMENTO, 2002; CAVALCANTI, 2006; NOBREGA, 2006). Podemos citar alguns trabalhos Compósitos matriz poliéster juta/tecidos tramados vegetal-vidro: caracterização mecânica e sorção de água (CAVALCANTI, 2006) e Compósitos de matriz poliéster com fibras do caroá (NÓBREGA, 2007).

Uma das fibras vegetais resistentes no sertão nordestino é a Macambira (*Bromélia laciniosa*). Sua aplicação como reforço de compósitos de matriz polimérica, praticamente não foi referenciado por pesquisadores da área e a investigação da absorção de umidade por parte deste compósito também não foi encontrado na literatura.

## **1.2 – Objetivos**

Diante do exposto, o objetivo geral desta pesquisa é estudar a sorção de água em compósitos de matriz poliéster reforçada por fibras de macambira via modelagem, simulação e sua experimentação.

Como objetivos específicos se podem citar:

- a) Desenvolver novos compósitos a base de poliéster insaturado, em compósitos poliéster/macambira reforçados por fibras curtas de macambira;
- b) Apresentar um estudo da sorção de água (experimental), sobre o efeito da temperatura e dimensões do compósito na sua sorção de água;
- c) Propor equações empíricas para descrever a sorção de água nos compósitos desenvolvidos;
- d) Estudar numericamente a distribuição de umidade, e tensões no interior do compósito ao longo do processo;
- e) Comparar os resultados experimentais e numéricos de sorção de água para validar a metodologia numérica e determinar os coeficientes de transporte.

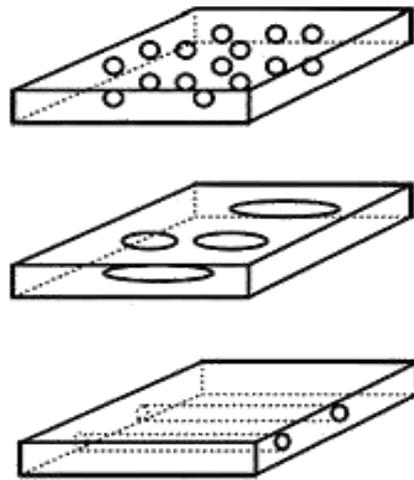
## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 – Compósitos

##### 2.1.1 – Características gerais

Um compósito pode ser definido como sendo uma combinação de dois ou mais materiais, onde está presente uma fase contínua, constituída pela matriz, e a fase descontínua, o reforço, sob forma de fibras, partículas esféricas ou plaquetas, embebidas na matriz, sendo que cada qual permanece com suas características individuais, ver Figura 2.1 (FLINN e TROJAN, 1981; CALLISTER, Jr. 2003; LARANJEIRA, 2004; SHACKELFORD, 2005; KAW, 2006).



**Figura 2.1** – Compósitos reforçados.  
Fonte: KAW,(2006)

As propriedades dos compósitos são controladas, pelas propriedades de seus materiais constituintes, teor de reforço, grau de dispersão, geometria do reforço, razão de aspecto (relação comprimento/diâmetro) e orientação das fibras (KAW, 2006; SHACKELFORD, 2005; SHACKELFORD, 2005; CALLISTER, Jr. 2003; STAAB, 1999; JOSEPH e CARVALHO, 1999; HULL e CLYNE, 1996).

### **2.1.2 – Compósitos Fibrosos**

Materiais compósitos são aqueles que possuem em sua composição pelo menos dois componentes ou duas fases, com propriedades físicas e químicas nitidamente distintas, em sua composição. Separadamente os constituintes do compósito mantêm suas características, porém quando misturados eles formam um composto com propriedades impossíveis de se obter com apenas um deles. Alguns exemplos são metais e polímeros, metais e cerâmicas ou polímeros e cerâmicas.

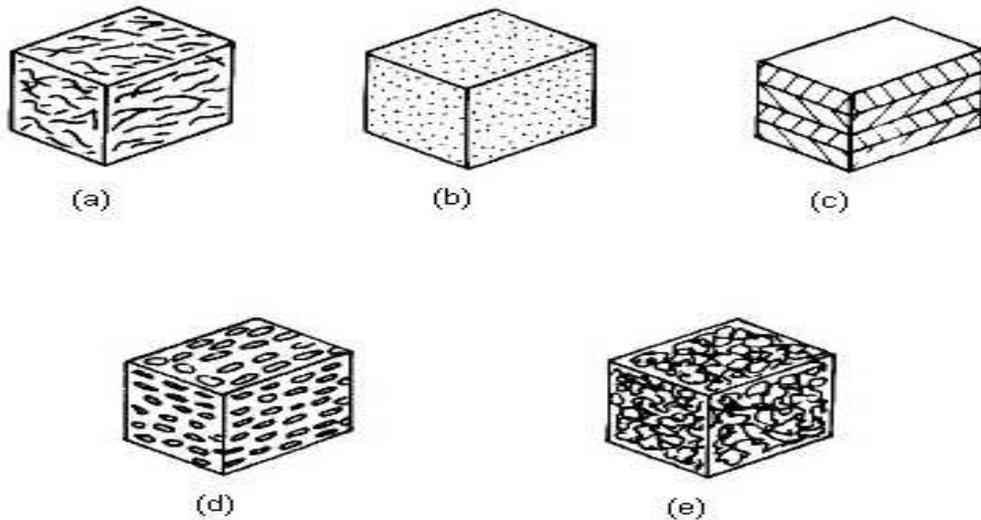
A palavra, “compósito” lembra um sinônimo de moderno. Todavia, usar a alta resistência das fibras para enrijecer e fortalecer uma matriz de é, talvez algo mais velho do que a roda. O Caminho da Procissão da antiga Babilônia, uma das menos cotadas maravilhas do mundo antigo, foi feito de betume reforçado com palha trançada. Palha e crina de cavalo vêm sendo utilizados em reforçar tijolos de barro (melhorando sua tenacidade à fratura), há, no mínimo, 5.000 anos. O papel é um compósito, o concreto também; ambos eram conhecidos pelos romanos. E quase todos os materiais naturais que devem suportar carga: madeira, osso, músculo, são compósitos.

Entretanto, a indústria de compósitos é nova. Ela cresceu rapidamente nos últimos anos com o desenvolvimento de compósitos fibrosos: para começar, polímeros reforçados com fibra de vidro e, mais recentemente, polímeros reforçados com fibra de carbono. Sua utilização em barcos e a crescente substituição de metais por compósitos em aeronaves e sistemas de transporte terrestre é uma revolução na utilização de materiais que ainda está ganhando velocidade (ASHBY e JONES, 1998).

### **2.1.3 - 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** – Compósitos com diferentes reforços: a) fibras curtas aleatórias; b) Partículas; c) Laminados; d) Partículas lamelares; e) Fibras longas desalinhadas. Fonte: Mitchell, (2004).

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 excelentes condutividades, 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).

Se as fibras de um compósito estiverem alinhadas ao longo da direção de carregamento, então a rigidez e a resistência serão aproximadas a uma média da rigidez e da resistência da matriz e das fibras, ponderadas conforme suas frações de volume. Mas nem todas as propriedades de compósitos são uma exata combinação das dos componentes. Sua grande atratividade é o fato de que, frequentemente, se ganha alguma coisa extra, (ASHBY e JONES, 1998).

## 2.2 – Reforço

Reforços são os constituintes que alteram 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 (CALLISTER, Jr., 2003; SHACKELFORD, 2005).

Os reforços podem ser classificados como segue:

a) Quanto à sua natureza:

- duros para promover aumento à dureza e a resistência à abrasão;
- resistentes à ruptura para proporcionar elevada resistência à tração, à flexão e ao cisalhamento;
- rígidos para incrementar o módulo elástico;
- flexíveis para aumentar a resistência ao impacto;
- resistentes termicamente para 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 (RICHARDSON, 1997; PETERS, 1998; CAVALCANTI, 2006).

## **2.3 – Matriz Polimérica**

As matrizes poliméricas podem ser termofixas, termoplásticas ou elastoméricas. Para os compósitos avançados a maior parte das matrizes poliméricas è 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 às 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). Já que 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 aglutinar 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 (HAGE, 1989; CHEREMISINOFF, 1998; GOODMAN, 1998).

### **2.3.1 – 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 (CHERMISINOFF, 1998; GOODMAN, 1998).

### 2.3.2 – 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, acidofumárico 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 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 esterificação e a ponte entre os ácidos para formar o polímero. O monômero vinílicodissolve 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).

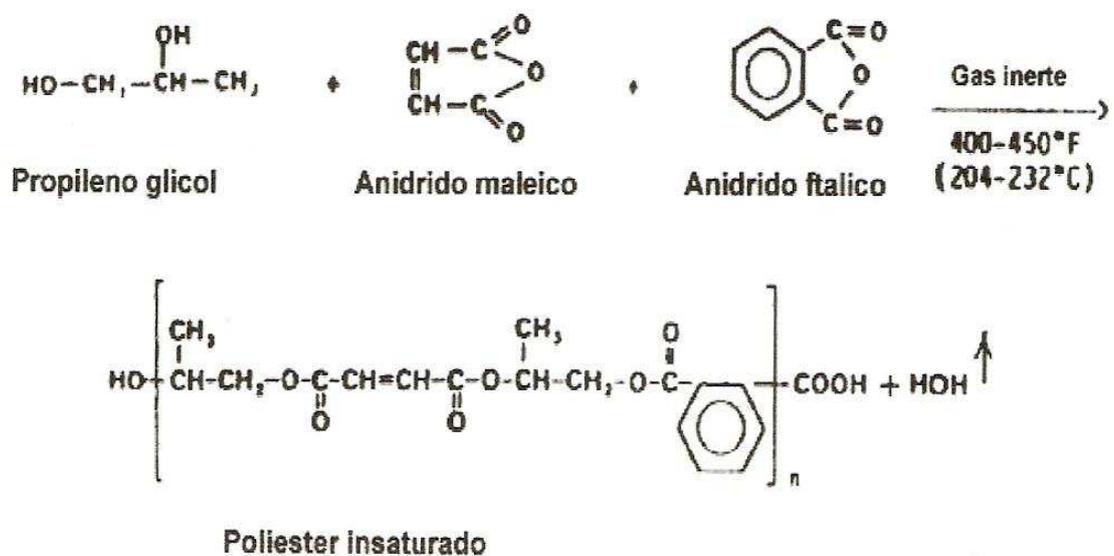
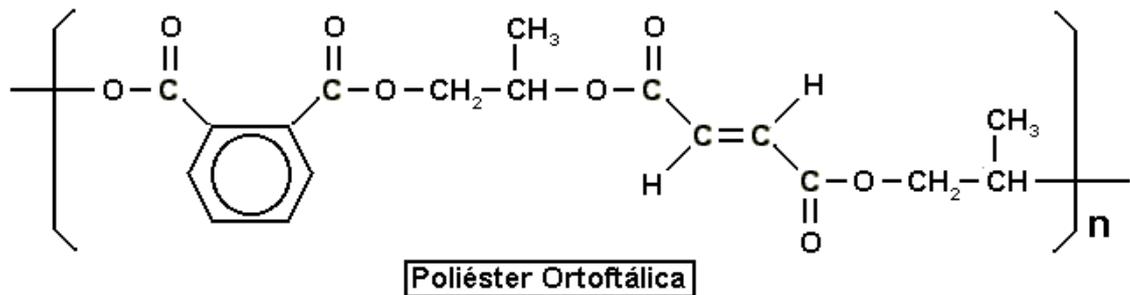


Figura 2.3 – Representação da reação de obtenção poliéster insaturado

Fonte: GOODMAN (1998).

### 2.3.3 - 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** – Estrutura química do ácido ortoftálico.

Fonte: SILAEX (2004).

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 de 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 (CAVALCANTI, 2006; CHEREMISSNOFF, 1988; GOODMAN, 1998).

## 2.4 – Fibras vegetais

### 2.4.1 – Características gerais

As fibras naturais podem ser divididas, de acordo com sua natureza, em três grupos:

- a) Fibras de origem mineral – ex: asbesto.
- b) Fibras de origem animal – ex: seda, lã.
- c) Fibras de origem vegetal – ex: celulósicas.

As fibras vegetais, por serem compostas principalmente de celulose, são também chamadas de fibras celulósicas ou lignocelulósicas. As propriedades apresentadas por estas fibras 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 são classificadas em:

- a) Fibras de gramínea – Bambu, bagaço de cana-de-açúcar, junco.
- b) Fibras de folhas – Abacá, abacaxi, sisal, banana, caroá e macambira.
- c) Fibras de caule – Juta, rami, linho.
- d) Fibras de fruto - Coco.
- e) Fibras de semente - Algodão, sumaúma.
- f) Fibras de raiz – Zacatão.
- g) Fibras de madeira – Eucalipto, pinho.

Embora quase todas as fibras vegetais possam ser usadas como agente de reforço em plásticos, as fibras de folha são as mais empregadas, pois, em geral, elas são mais duras do que as fibras de caule. As fibras de folhas são geralmente conhecidas como “fibras duras” enquanto que as fibras de caule são conhecidas como “fibras macias”.

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 antichama.

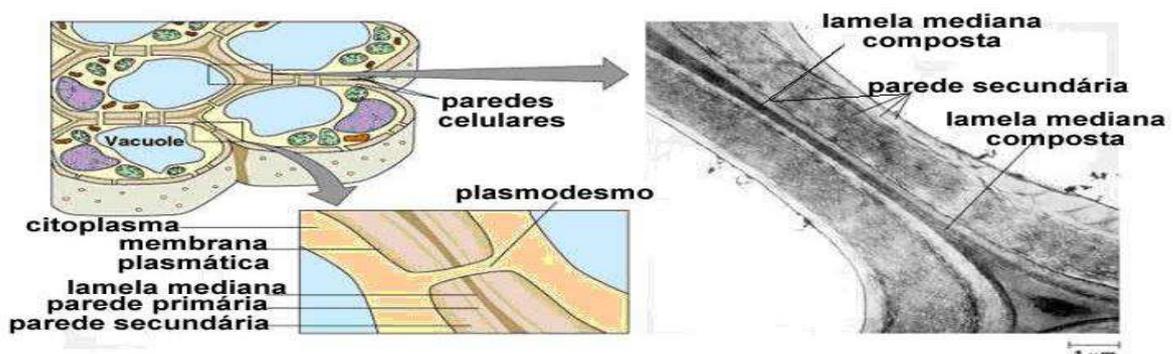
As fibras vegetais oferecem algumas vantagens sobre as fibras de vidro tais como:

- 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 CO<sub>2</sub> 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 processamento 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).

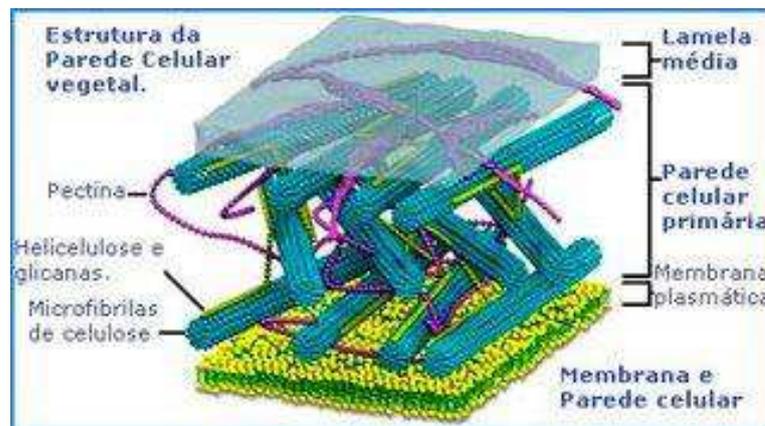
#### 2.4.2 – Microestrutura e composição química e propriedades das fibras Vegetais

As fibras naturais de origem vegetal podem diferir significativamente na sua aparência física, mas possuem similaridades que as identificam com 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<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>, unidas entre si por átomos de oxigênio. Estas cadeias são agrupadas em feixes, formando as micelas.



**Figura 2.5** – Composição da parede célula na fibra vegetal. Fonte: BATISTELA (2009).

Após a divisão celular, as células ou fibro-células, como também são chamadas, permanecem unidas por uma camada intercelular, denominada lamela média (LM), constituída pela substância lignina. Cada fibro-célula é constituída por parede primária (PP), parede secundária (PS) e o lúmen. Nas paredes primárias, as fibrilas apresentam uma estrutura reticulada. As microfibrilas são arranjadas em espirais formando ângulos com o eixo longitudinal da fibra e possui espessura aproximada a  $2\mu\text{m}$ . A figura 2.5 mostra a composição da parede celular (d'ALMEIDA, 1991).

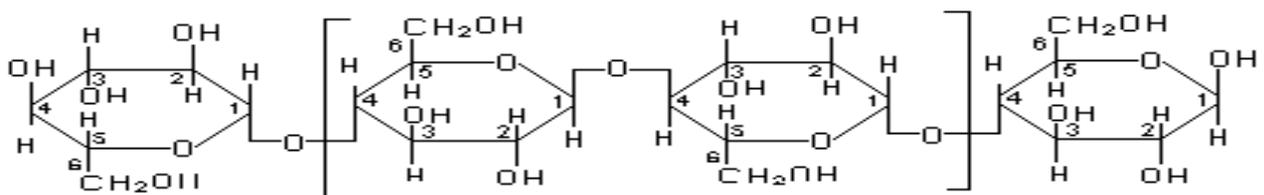


**Figura 2.6** - Estrutura da Parede Celular.

Fonte: CASTRO (2001)

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- $\beta$ -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. A Figura 2.6 mostra a estrutura da parede celular.

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.



**Figura 2.7**– Estrutura da celulose.

Fonte: BLEDZKI e GASSAN (1999).

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.

Estudos recentes mostram a composição e análise química das fibras naturais, conforme Tabelas 2.1 e 2.2.

**Tabela 2.1** – Composição química das fibras naturais

Tipos de fibra	Celulose %	Lignina %	Hemicelulose %	Pectina %	Cinzas%
<b>Kenaf</b>	31-57	15-19	21,5-23	-	0,5-2
<b>Juta</b>	45-71,5	12-26	13,6-21	0,2	0,5-2
<b>Rami</b>	68,6-91	0,6-0,7	5-16,7	1,9	-
<b>Abacá</b>	56-63	7-9	15-17	-	3
<b>Sisal</b>	47-78	7-11	10-24	10	0,6

Fonte: PANIGRAHI e TABIL (2007).

**Tabela 2.2** - Análise química de algumas fibras vegetais

Fibras	Celulose %	Hemi-Celulose %	Lignina %	Agua%
<b>Sisal</b>	65,8	12,0	9,9	10
<b>Juta</b>	64,4	12,0	11,8	10
<b>Algodão</b>	82,7	5,7	-	10
<b>Caroá</b>	35,5	17,9	30,1	-

Fonte: BLEDZKI e GASSAN (1999), d'ALMEIDA et al. (2006).

#### 2.4.3 – Fibras de macambira

A macambira está presente nas caatingas do Nordeste do Brasil. A planta herbácea, da família das *Bromeliáceas*, que cresce debaixo das árvores ou em clareiras, possui raízes finas e superficiais, folhas que podem atingir mais de um metro de comprimento por vinte centímetros de largura, espinhos duros, e um rizoma que fornece uma forragem de ótima

qualidade. Em se tratando de cor, a macambira pode ser verde-claro, verde mais escuro, verde cinza, violácea ou amarela, dependendo, entre outros fatores, da umidade do ar e do solo. Em locais mais abertos e expostos ao sol, à face ventral das folhas pode-se apresentar cores como violácea ou roxo-escuro.

O vegetal simples, de raízes superficiais, desenvolve-se nas terras mais áridas dos trópicos, alimentando-se de ar atmosférico e possuindo umidade suficiente para resistir às duras secas. Os frutos, amarelos quando maduros, exalam um odor ativo e característico, assemelhando-se a um cacho de bananas pequenas. Suas bagas medem de três a cinco centímetros de comprimento, e têm um diâmetro que varia de dez a vinte milímetros.

Do limbo das folhas da macambira, os sertanejos retiram as fibras aproveitáveis. Com golpes precisos de facão, os espinhos são retirados e, depois, juntam-se as folhas em grandes feixes, que ficam macerando durante vários dias. Quando as partes fermentáveis amolecem, as folhas são retiradas da maceração, batidas, espremidas, lavadas e colocadas em jiraus para secar ao sol. Todo esse processo exala um forte mau cheiro, tendo que ser feito bem longe das casas. Caso seja realizado às margens de rios, os pequenos peixes morrem embebedados.

Existe, ainda, outro processo para se extrair as fibras da macambira. Trata-se de um método árduo, através do qual a folha é arrastada sobre o arame de um aparelho conhecido por tiralinho; depois é esmagada e passada entre os dentes de um pente metálico, para se retirar toda a parte mole. A partir daí, as fibras descobertas são lavadas, penteadas, e colocadas para secar.

Utilizam-se as folhas da macambira, inclusive para cobrir casas, sendo essas amarradas em molhos e, durante uma semana, colocadas para murchar. Em fase posterior, os molhos são colocados uns juntos aos outros, fortemente atados com cipós (ou batidos com pregos). Em seguida, da biqueira da casa até a cumeeira, os molhos são dispostos em camadas superpostas, o que deixa os telhados com ótima aparência.

Outra operação, bastante ingrata, é a extração da massa da base dilatada das folhas (*capas*). O sertanejo corta algumas folhas, no ponto em que começam a se alargar, para alcançar a *cabeça* da macambira. Várias cabeças são amarradas umas às outras, formando-se atilhos que os burros transportam em suas cangalhas; ou os próprios caboclos carregam nos

ombros, quando não dispõem dos animais. O trabalho de aparaé bem árduo: deve-se que retirar os espinhos, recortar as bordas, e fazer a despela, ato que consiste em levantar a epiderme, guarnecida de forte cutícula, com a ponta de uma faca. As capassão piladas visando separar a fécula das fibras. A massa bruta é batida, espremida e lavada em água, várias vezes, para retirar o máximo possível do fortume. Isto tudo deixa as pessoas com os dedos muito feridos, devido à ação corrosiva daquela substância. Após a decantação, a massa, de cor branca, é envolvida em um pano, passada em uma prensa rudimentar para escorrer o restante de água, e colocada ao sol para secar.

Com a massa, em uma cuscuzeira, os sertanejos fazem um pão semelhante ao de milho. Costuma-se adicionar um pouco de farinha de mandioca à massa, para aumentar a liga e diminuir o travo no gosto. A massa também é comida em forma de pirão, com leite, ou carnes, que advêm da caça de animais presentes nas caatingas: cotia, gambá, tatu, teju, veado-catingueiro, preá e aves (pomba, asa-branca, quenquém e juriti). A massa pode ser estocada de um ano para outro. Em tempos de penúria extrema, a macambira auxilia a sobrevivência do sertanejo e dos rebanhos.

A farinha da macambira é composta, em sua maior proporção (63,1%), de amido, uma substância química também presente na farinha de mandioca, porém com um teor protéico bem mais elevado, próximo das farinhas de milho e arroz. Ainda é rica em cálcio, quinze vezes mais alto que o leite, e três vezes mais elevado que o queijo, sendo uma das farinhas mais nutritivas do mundo. Em se tratando dos rebanhos, é importante registrar que, comendo um quilo desse alimento, os animais podem acumular, até, 248 gramas de gordura. Os vaqueiros ressaltam, além disso, outra vantagem: o gado que come as flores e os frutos da macambira não sente necessidade de ir ao bebedouro atrás de água.

Com o farelo do caule da macambira, uma parte bastante nutritiva da planta, os sertanejos alimentam seus animais domésticos, tais como galináceos e suínos.

As caatingas têm sofrido muitas agressões ambientais ao longo dos séculos, desmatamentos, queimadas, substituição de espécies vegetais nativas, o que causa sérios problemas à fauna, à presença e qualidade da água, ao equilíbrio do solo e do clima, e acarreta em estiagens cada vez mais prolongadas, desertificação e degradação ambiental.

Nos sertões nordestinos a macambira possibilita que seres humanos e rebanhos deixem de sucumbir diante da escassez crônica de água. E a macambira é uma das poucas plantas que pode ser aproveitada, praticamente, em sua totalidade. Esta bromélia representa uma tábua de salvação para as áreas de sequeiro e, portanto, precisa ser pesquisada e preservada (VAINSENER, 2009).

A Macambira possui raízes finas, fasciculadas e insurgem da parte do caule que adentra no solo. Este mede aproximadamente 4 cm de comprimento por 3 cm de diâmetro. Por possuírem raiz do tipo fasciculada, podem ser utilizadas para combater a erosão do solo. Seu Caule possui forma cilíndrica, abrange em toda a sua extensão o prato, o miolo e o mangará, através do qual emerge o escapo floral, na maturidade. Do ponto de inserção das raízes ao ápice.

Têm folhas constituídas de duas partes distintas, base dilatada e limbo, que se alastram em torno do caule em verticilos de quatro folhas, opostas duas a duas. A quantidade de folhas varia com a idade da macambira e outros fatores de ordem ecológica. O tamanho das folhas e sua coloração é também função do meio ambiente em que se encontram.

## **2.5 – Compósitos reforçados por fibras vegetais**

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).

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).

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). 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.

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 européia 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 (SUDDLELL et al., 2002; SILVA, 2003). Algumas fibras vegetais são utilizadas para o reforço em materiais compósitos.

LOPES et al. (2008) estudaram o emprego de fibras vegetais na confecção de compósitos tem grande viabilidade no que diz respeito ao uso de materiais oriundos de fontes renováveis, a biodegradabilidade e aos benefícios socioeconômicos gerados na produção de matéria-prima vegetal. As fibras de sisal são altamente higroscópicas e esta característica apresenta-se como um dos principais problemas na produção de compósitos, induzindo a variações dimensionais sob a influência da umidade, deposição dos produtos da matriz em seus poros e a degradação. As fibras de sisal foram submetidas aos tratamentos de acetilação, aquecimento e impregnação por meio de licor piro lenhoso. A determinação da absorção de água foi realizada por imersão e a modificação química das fibras ocorridas pela influência dos tratamentos aplicados por espectroscopia de infravermelho. Fibras de sisal naturais apresentaram um ganho de peso por absorção de água de 86% em 24h, quando tratadas o ganho de peso foi reduzido em até 47% nas acetiladas, 5% nas aquecidas e 12% nas impregnadas. Na composição química das fibras houve modificações após os tratamentos, com incremento de grupo carbonila e redução das hidroxilas, principalmente nas fibras acetiladas. A conclusão deste estudo foi a seguinte As fibras de sisal naturais apresentaram um ganho de peso por absorção de água em imersão de 81 e 86%, em 2 e 24 h respectivamente. Quando comparados estes resultados aos obtidos para os tratamentos das fibras por acetilação observou-se que estes apresentaram eficiência na redução da hidrofiliabilidade das mesmas. As fibras acetiladas tiveram um ganho de peso por absorção entre 36 e 50% do seu peso inicial em 2 h, e entre 39 e 59% em 24 h. Considerações importantes também podem ser feitas com relação à redução na absorção com o aumento da temperatura de reação, uma diferença de 9% em 2 h e 20% em 24 h na absorção, em 1 h de reação, apenas pelo aumento da temperatura em  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ .

ZARDO et al. (2010) estudaram o comportamento mecânico e reológico de compósitos de polipropileno e fibra de bananeira. As fibras de bananeira foram extraídas manualmente do pseudocaule de bananeira e incorporadas, na forma in natura, na proporção de 5, 10 e 15% em massa dos compósitos. A utilização das fibras de bananeira na forma in natura demonstrou-se viável e com incremento satisfatório no módulo elástico, aumento discreto da viscosidade, mas com perda de resistência a tração dos compósitos, o que pode ser melhorado com o tratamento das fibras ou utilização de agentes de acoplamento. A viscosidade dos compósitos sofreu um ligeiro aumento com o incremento do teor das fibras. Nos últimos anos, há uma crescente preocupação em relação às questões ambientais, o que está acarretando aumento de pesquisas na área de compósitos utilizando fibras naturais

como cargas reforçantes. As fibras celulósicas apresentam baixo custo e densidade e reduzem o desgaste em equipamentos de processamento se comparadas às fibras sintéticas, além de serem de fonte renovável, biodegradáveis, atóxicas e serem facilmente modificadas por agentes químicos. Diversos estudos demonstram que o emprego de fibras naturais em matrizes poliméricas proporciona aumento das propriedades mecânicas desses compósitos.

Uma fibra de fácil cultivo em países tropicais é a de bananeira, o que traz vantagens na sua obtenção para ser usada como reforço em polímeros. No Brasil, a banana possui um alto índice de produção e produtividade. O Brasil é o segundo maior produtor, perdendo apenas para a Índia, detendo cerca de 10 % do total mundial.

ANDRADE et al. (2009) estudaram compósitos poliéster/fibra de babaçu que é o fruto de uma palmeira nativa da região Norte do Brasil e que apresenta em seu interior várias sementes ou amêndoas de onde é extraído um óleo de coco Babaçu que qual é muito utilizado para fins alimentícios e na fabricação de margarinas. Este óleo apresenta propriedades semelhantes ao óleo de dendê (ou palma), apresentando alto teor de ácido láurico. Outra aplicação que vem ganhando destaque é a produção de álcool de Babaçu a partir das sementes. A casca do coco devidamente preparada, fornece um eficiente carvão, fonte exclusiva de combustível em várias regiões do Norte e Nordeste do Brasil. A população local realiza frequentemente o processo de produção do carvão de Babaçu durante a noite. O processo é realizado queimando-se lentamente o coco em caieiras cobertas por folhas e terra, a casca do Babaçu produz uma vasta fumaça aproveitada como repelente de insetos. Outros produtos de aplicação industrial podem ser derivados da casca do coco do Babaçu, tais como etanol, metanol, coque, carvão reativado, gases combustíveis, ácido acético e alcatrão. Apesar de tantas e tão variadas utilidades, por sua ocorrência não controlada do ponto de vista econômico e agrícola, o Babaçu continua a ser tratado como um recurso marginal, permanecendo apenas como parte integrante dos sistemas tradicionais e de subsistência. O babaçu é uma cultura extrativista, não havendo plantações comerciais e sendo nativas do Norte Brasileiro, apresentem propriedades mecânicas que indicam boas aplicações em compósitos poliméricos e são fatores de desenvolvimento regional contribuindo para a amenização dos impactos ambientais. A investigação da sua utilização como reforço em compósitos de matriz polimérica quase não foi encontrada na literatura.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver novos compósitos à base de poliéster insaturado reforçados por fibras curtas de Babaçu e estudar suas propriedades mecânicas em tração e impacto, as quais foram avaliadas em função dos diferentes teores de fibras incorporados a

matriz. Para a confecção dos compósitos, foi utilizada como matriz polimérica uma resina poliéster insaturada GAMA 313, fabricada pela Embrapol, do tipo ortoftálica pré-acelerada, reticulada com estireno. Utilizou-se como iniciador o Peróxido de Metil-Etil-Cetona (MEK-P) em concentração de 1% em peso.

As fibras de Babaçu são provenientes da região Sudeste do estado do Pará e obtidas pelo método de maceração, as quais são classificadas como fibras curtas. As fibras foram secas em estufa a 100 °C por 2 horas.

A conclusão deste estudo foi à seguinte: houve um aumento nas propriedades de resistência à tração dos compósitos para teores acima de 38% de fibras, corroborando a existência de um volume crítico de fibras que atuam como reforço no compósito.

As propriedades mecânicas em impacto dos compósitos reforçados com fibras de Babaçu aumentaram com o teor de fibras empregadas, o que foi associado à boa adesão fibra-matriz elevando a tenacidade do compósito.

O módulo de Young aumentou substancialmente com o aumento do teor de fibras, provocado pela maior rigidez das fibras.

Os valores medidos no alongamento na ruptura mostram que a incorporação das fibras na matriz poliéster é proporcional ao aumento no teor de fibras.

Estes resultados preliminares indicam que fibras de coco Babaçu podem ser utilizadas em compósitos poliméricos, para aplicações onde seja necessário médio desempenho mecânico.

DA SILVA et al. (2008) estudaram compósitos poliméricos com fibras naturais que vêm sendo bastante usados nas duas últimas décadas com algumas aplicações já bem estabelecidas, principalmente no setor automotivo. No entanto, suas aplicações são limitadas pelo seu baixo desempenho mecânico e alta absorção de umidade, comparadas aos compósitos com fibras sintéticas. Buscando minimizar estes problemas e ampliar o leque de aplicações, foi proposto neste trabalho desenvolver um compósito laminado híbrido associando fibras naturais (curauá) e sintéticas (vidro-E) em uma matriz de resina poliéster. Foi realizado um estudo comparativo das propriedades mecânicas em flexão do laminado híbrido e de dois outros laminados, um apenas com fibras de vidro e um apenas com fibras de curauá. Ensaios de absorção de água foram também realizados sendo obtidas as curvas de

saturação para os três laminados. Por fim, foram analisados influência da absorção de água nas propriedades mecânicas em flexão do laminado híbrido. As propriedades do laminado híbrido foram muito próximas do laminado de fibra de vidro, já o laminado de curauá teve um desempenho bastante inferior. Nos ensaios de absorção de água foi comprovada a eficiência da hibridização na redução do percentual de absorção de água do laminado apenas com fibra natural. O laminado híbrido vidro/curauá mostrou ser um promissor substituto para os laminados de fibra de vidro mesmo em aplicações de contato direto com água.

LOPES et al. (2008) estudaram o emprego de fibras vegetais na confecção de compósitos tem grande viabilidade no que diz respeito ao uso de materiais oriundos de fontes renováveis, a biodegradabilidade e aos benefícios socioeconômicos gerados na produção de matéria-prima vegetal. As fibras de sisal são altamente higroscópicas e esta característica apresenta se como um dos principais problemas na produção de compósitos, induzindo a variações dimensionais sob a influência da umidade, deposição dos produtos da matriz em seus poros e a degradação. As fibras de sisal foram submetidas aos tratamentos de acetilação, aquecimento e impregnação com licor pirolenhoso. A determinação da absorção de água foi realizada por imersão e a modificação química das fibras ocorridas pela influência dos tratamentos aplicados por espectroscopia de infravermelho. Fibras de sisal naturais apresentaram um ganho de peso por absorção de água de 86% em 24h, quando tratadas o ganho de peso foi reduzido em até 47% nas acetiladas, 5% nas aquecidas e 12% nas impregnadas. Houve modificações na composição química das fibras após os tratamentos, com incremento de grupo carbonila e redução das hidroxilas, principalmente nas fibras acetiladas. A conclusão deste estudo foi a seguinte As fibras de sisal naturais apresentaram um ganho de peso por absorção de água em imersão de 81 e 86%, em 2 e 24 h respectivamente. Quando comparados estes resultados aos obtidos para os tratamentos das fibras por acetilação observou-se que estes apresentaram eficiência na redução da hidrofiliabilidade das mesmas. As fibras acetiladas tiveram um ganho de peso por absorção entre 36 e 50% do seu peso inicial em 2 h, e entre 39 e 59% em 24 h. Considerações importantes também podem ser feitas com relação à redução na absorção com o aumento da temperatura de reação, uma diferença de 9% em 2 h e 20% em 24 h na absorção, em 1 h de reação, apenas pelo aumento da temperatura em  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ .

## 2.6 – 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; ANDREPOULOS e TARANTILI, 1998).

ABDALLA et al.(2010) estudaram a fibra de kenaf como reforço em compósitos de poliéster insaturado submetidos ensaios de imersão de água, a fim de estudar os efeitos de absorção de água sobre as propriedades mecânicas. Compósitos contendo (10,20e30%), porcentagens em peso de fibras foram preparadas. Os testes de absorção de água foram realizados por imersão num banho de água destilada á temperatura de 25°C durante quatro meses. As propriedades em tração das amostras imersas em água foram avaliadas e comparadas com as amostras secas. Uma redução nas propriedades tensesis de compósitos pode ser demonstrada, indicando uma grande perda nas propriedades mecânicas das amostras saturadas em comparação com as amostras secas. Absorção de umidade também aumenta com o aumento do teor de fibra o que foi atribuído ao teor de celulose mais elevada. Ao mesmo tempo verificou-se o aumento do módulo elásticos dos compósitos para amostras seca, enquanto que o aumento da percentagem em peso do teor de fibras pode conduzir a uma diminuição das propriedades de tração dos compósitos para a amostra imersa.

DA ROSA et al.(2012) estudaram e analisaram as propriedades físicas da fibra curauá, cujo nome científico é *Ananás erectifolius*, sendo realizados alguns ensaios em laboratório. Foram realizados ensaios de geometria da fibra, teor de umidade, peso específico e absorção de água. A fibra de curauá apresentou grande capacidade higroscópica e absorveu cerca de 70% de sua capacidade logo nos primeiros minutos em imersão e absorveu mais que70% de sua capacidade logo nos primeiros 15 minutos em imersão, chegando a sua estabilidade no final do primeiro dia, com aproximadamente 105% de saturação, em geral as fibras atingem mais de 50% de sua capacidade higroscópica logo nos primeiros 15 minutos de contato com água, o que confirma os resultados apresentados neste trabalho. Para os dias seguintes, a fibra de curauá, teve um acréscimo de absorção, mas nada comparado às primeiras horas de imersão.

CAVALCANTI et al.(2010) estudaram numérica e experimentalmente a sorção de água em compósitos de juta e juta/vidro. Os compósitos de poliéster insaturados moldados por compressão e reforçados com tecido de juta e tecido híbrido de juta-vidro têm composições em peso de: a) 26% de juta/74% poliéster insaturado; e b) 26% juta/32% vidro/42% poliéster insaturado, e dimensões de 20,00 × 20,00 × 2,30 mm e 20,00 × 20,00 × 2,82 mm, respectivamente. Um modelo matemático tridimensional de difusão transiente foi desenvolvido para prever a transferência de massa durante a absorção de água. A formulação matemática foi resolvida numericamente usando o método de volumes finitos e um esquema de interpolação totalmente implícito. Os resultados da distribuição do teor de umidade dentro destes compósitos e cinéticos de absorção de água são mostrados e analisados. O conhecimento da distribuição de umidade permite verificar áreas mais favoráveis a problemas de delaminação devido à fraqueza da interface fibra-matriz e, por conseguinte redução nas propriedades mecânicas.

As conclusões deste estudo foram as seguintes:

- O modelo matemático usado descreve adequadamente o processo de difusão de água dentro do compósito.
- Alto valor para o coeficiente de difusão de água foi obtida nas primeiras 50 horas de sorção, e a taxa de difusão de água diminuem para tempos mais longos de imersão.
- As regiões vizinhas aos vértices do sólido apresentam as maiores taxas de transferência de massa.

NOBREGA et al. (2010) estudaram o desenvolvimento de compósitos poliméricos reforçados com fibras de Caróá *Neoglazioviavariiegata* para avaliação de seu desempenho mecânico, bem como suas características de sorção de água. Foi utilizada como matriz polimérica uma resina de poliéster insaturado e fibras de Caróá originárias do cariri paraibano. Os compósitos foram confeccionados com diferentes teores de fibras, cortadas em tamanhos de aproximadamente 3 cm, e moldados por compressão em molde metálico para avaliação das propriedades mecânicas. A composição de amostras de melhor desempenho mecânico foi escolhida para os ensaios de sorção de água, com amostras de 20x20mm<sup>2</sup> com 3 e 6cm de espessura na temperatura de 25°C, 50°C e 70°C. Uma modelagem matemática tridimensional transiente foi usada para prever a transferência de massa durante a sorção de água destes compósitos.

Os resultados indicam que as propriedades mecânicas em tração dos compósitos estudados aumentam com o teor de fibras acima de 24% em massa até um volume crítico, em torno de 30%. Resistência ao impacto aumentou para todas as composições em virtude da eficiência de transferência de tensão para as fibras. Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade dos compósitos evidenciam que estes são superiores ao da matriz, para todos os teores abaixo de 45% de fibras, o que é associado às características das fibras. A cinética de sorção de água nos compósitos mostrou ser influenciada pela relação área/volume. Pôde-se observar que em tempos curtos, aproximadamente 100 horas, os corpos com menor relação apresentam uma maior velocidade de sorção. Em tempos longos os compósitos com maior relação área/volume apresentam maiores teores de água sorvida. O teor de umidade de equilíbrio dos compósitos com 30% de fibras de caroá apresentaram valores de 14,48% à 25°C e 16,52% à 70°C, para as espessuras de 3 e 6 mm, respectivamente. A modelagem matemática utilizada para a obtenção da solução numérica de sorção de água nos compósitos reforçados por fibras de caroá foi adequada e satisfatória e 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.

DANTAS et al. (2007) estudaram um compósito formado por uma matriz de poliéster insaturada Terortoftálica reforçada por cinco camadas de tecido de juta bidirecional e verificar a influência da quantidade de absorção de água em suas propriedades mecânicas de tração uniaxial e flexão em três pontos. Para isso, foram realizados ensaios em amostras secas e úmidas saturadas. Metade das amostras úmidas teve suas bordas laterais seladas com resina. Os resultados mostram que as amostras seladas absorveram menos água e saturaram em um maior tempo, conseqüentemente suas propriedades mecânicas de tração e flexão foram menores que as das amostras secas e maiores que as das úmidas sem proteção das bordas laterais. Pode-se concluir que a quantidade de água absorvida pelo compósito diminui as propriedades mecânicas dos mesmos tanto nos ensaios de tração uniaxial quanto nos ensaios de flexão em três pontos. As fibras de juta possuem uma grande capacidade de absorção de água devido a sua natureza hidrofílica. A proteção lateral das bordas com resina diminuiu a quantidade de água absorvida pelo compósito e aumentou o tempo de saturação do mesmo.

ROUISSON 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 desorção 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 desorção. 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 desorção, 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.

## CAPÍTULO III

### MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 – Materiais

##### 3.1.1 – Matriz polimérica

Para a confecção dos compósitos, utilizou-se como material polimérico uma resina poliéster insaturada (Resapol 10-116), do tipo ortoftálicapré-acelerada, fornecida pela RESANA S.A. Esta resina foi reticulada por estireno, utilizando como iniciador Peróxido de Metil Etil Cetona (MEK-P) em concentração de 1% em peso.

##### 3.1.2 – Descrição da macambira usada nos experimentos

As fibras de Macambira (*Bromélia Laciniosa*), provenientes da região de Boa Vista – PB foram obtidas pelo método tradicional de extração de fibras da região, onde as fibras foram secas, ao ar penteadas e cortadas no comprimento de aproximadamente 3 cm para a confecção dos compósitos pelo método de compressão, ( Figura 3.1 a e b; Figura 3.2 c e d.)



a)



b)

**Figura 3.1 – a) Macambira (*Bromélia Laciniosa*) e b) Planta e Fruto**



**Figura 3.2** – a) Macambira desfibrada manualmente e b) Macambira penteada manualmente tamanho 3 cm .

## **3.2 – Método experimental**

### **3.2.1 – Caracterização morfológica das fibras**

Para caracterização morfológica das fibras de macambira, foi usada a técnica de microscopia eletrônica de varredura.

Os ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram realizados em microscópio eletrônico com detector de retroespalhamento, sistema de baixo vácuo e microanálise por EDX, marca Shimadzu, modelo SSX-550. No ensaio foram empregadas fibras simples de Macambira, as quais foram recobertos com carbono. As análises foram realizadas no Laboratório de Solidificação Rápida do Departamento de Tecnologia Mecânica do CT/UFPB. Toda a Parte experimental foi realizada por (NOBRÉGA, 2007) e os dados foram gentilmente cedidos para esta pesquisa.

#### **3.2.3.1 – Preparação dos compósitos**

Compósitos com teores variados de fibra foram preparados por moldagem por compressão com 8 toneladas de força de fechamento do molde por 8 horas, a temperatura ambiente. As placas obtidas foram submetidas a pós-cura por 48h a 50°C, para posterior usinagem dos corpos de prova.

O teor de fibras foi determinado por gravimétrica, utilizou-se o seguinte procedimento: Pesou-se as fibras de macambira previamente secas (cortado nas dimensões de

aproximadamente 3 cm) e depois pesou-se a placa do compósito. Com os pesos obtidos determinou-se o teor de fibras (em massa) da seguinte forma:

$$T_f \% = \frac{M_f}{M_c} \times 100 \quad (3.1)$$

onde,  $T_f$  é o teor de fibras,  $M_f$  é a massa das fibras (g),  $M_c$  é a massa do compósito em (g)

O molde foi untado com cera para auxiliar a desmoldagem. O catalisador (MEK) foi misturado à resina e parte desta mistura vertida no molde. As fibras de macambira previamente pesadas foram colocados no molde e pressionado com auxílio de uma espátula para garantir a sua impregnação. Por fim, verteu-se um excesso de resina e, quando a resina estava próxima do ponto de gelificação, o molde foi fechado, e colocado na prensa e mantido sob força de 8 toneladas à temperatura ambiente durante 8 horas. Após este período foi efetuada a desmoldagem, ( Figura 3.3.)



**Figura 3.3** – Compósito reforçado com fibras de macambira.

Fonte: NÓBREGA (2007).

### 3.2.3.3 – Ensaio de sorção de água

Para os experimentos de sorção de água foi escolhida a composição de 30% de fibras como reforço, 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 6,00mm, 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, ver Figura 3.4.



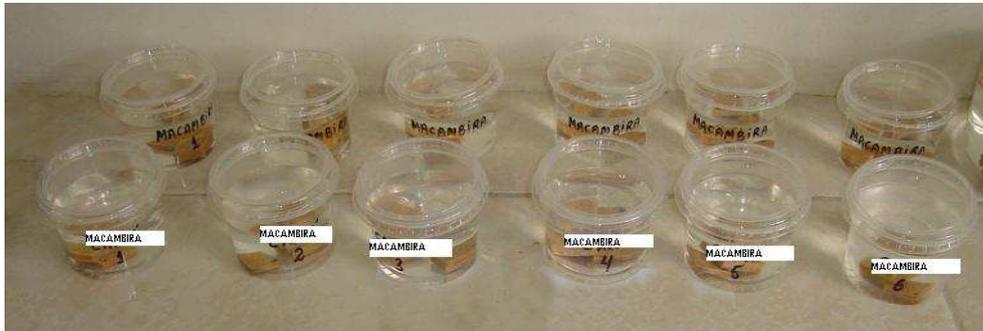
**Figura 3.4** – Corpos de prova para ensaio de sorção de água.

Fonte: NÓBREGA (2007).

No ensaio de sorção de água, os corpos-de-prova foram inicialmente colocados em estufa a 105°C por 24 horas. Imediatamente após a secagem, as amostras foram pesadas e, em seguida, imersas em água destilada às temperaturas de 25°, 50° e 70°C. (Figura 3.6 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. Foi utilizado o método de gravimetria e a norma utilizada foi a STM 570, para este experimento. O teor de água absorvido foi calculado comparando-se a massa inicial e após a exposição, de acordo com a equação:

$$M \% = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100 \quad M \% = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 10 \quad (3.2)$$

onde:  $m_u$  é a massa do material úmido e  $m_s$  – massa do material seco e  $\bar{M}$  é o teor de umidade em base seca.



(a)



(b)



(c)

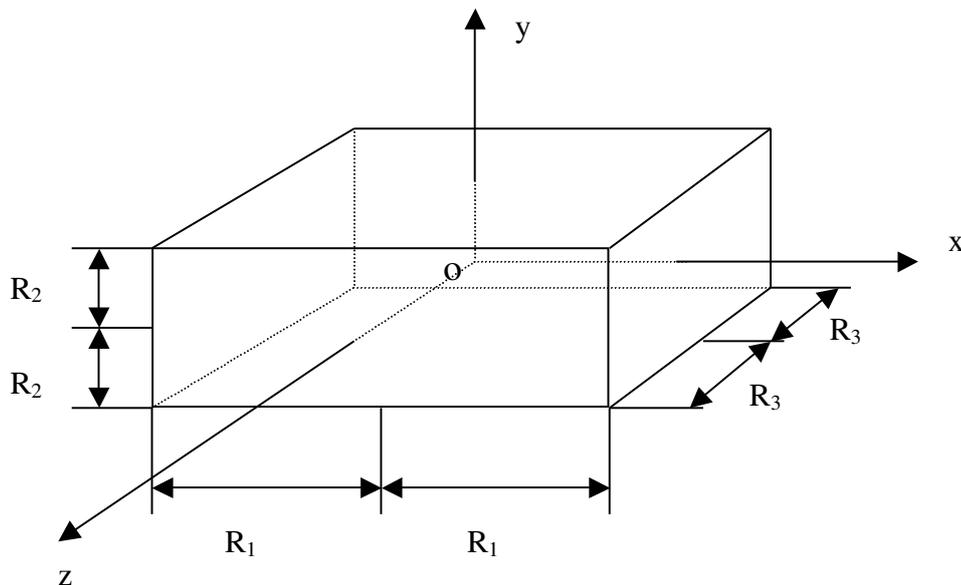
**Figura 3.5** – Corpos de prova imersos em água nos recipientes a) Os corpos de prova todos colocados nos recipientes, b) Os corpos de prova colocados no controlador de temperatura c) A figura mostra o detalhe de toda a parte b do experimento. Fonte: NÓBREGA(2007).

### 3.3–Método matemático

Soluções analíticas e numéricas para o problema de difusão transiente para várias geometrias têm sido reportadas na literatura, contudo são escassos os trabalhos relacionados a problemas tridimensionais, particularmente aqueles relacionados a materiais compósitos híbridos (fibra vegetal e fibra sintética). Este trabalho apresenta uma modelagem matemática para prever o fenômeno de difusão transiente em sólidos paralelepípedos conforme discutido por CAVALCANTI (2006). Neste trabalho foi aplicado e estudado a solução numérica tridimensional transiente, para descrever a transferência de massa no interior de paralelepípedos sólidos, considerando propriedades termo físicas variáveis, condição de contorno constante e direcionando o estudo para compósitos poliméricos.

#### 3.3.1 – O modelo de difusão de massa ( absorção de água )

Considere o problema de difusão de uma propriedade  $\Phi(x, y, z, t)$  em um paralelepípedo sólido de dimensões  $2R_1 \times 2R_2 \times 2R_3$ , de acordo com a Figura 3.7.



**Figura 3.6**– Configuração geométrica do problema físico.

Para este caso, a equação diferencial que descreve o fenômeno de difusão é da forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} \lambda \Phi = \nabla \cdot \Gamma^{\Phi} \nabla \Phi \quad (3.3)$$

onde na Equação (3.3) tem-se para transferência de massa,  $\lambda = \rho$ ;  $\Phi = M$ ;  $\Gamma^{\Phi} = \rho D$ ; sendo  $\rho$ ,  $M$  e  $D$ , a densidade, teor de umidade e coeficiente de difusão no sólido, respectivamente,  $t$  é o tempo.

Para descrever a transferência de massa no sólido com forma de paralelepípedo (Figura 3.7) as seguintes considerações foram adotadas, no modelo matemático:

- O coeficiente de difusão é variável durante todo o processo de difusão;
- O sólido é homogêneo e isotrópico;
- O efeito de capilaridade é desprezível;
- Existe simetria nos planos centrais do sólido;
- A condição de contorno é de equilíbrio com o meio exterior, na superfície do sólido;
- A densidade do sólido seco é considerada constante;
- Nenhuma geração de massa de água proveniente, por exemplo, de uma reação química no interior do sólido ocorre;
- O sólido é considerado totalmente seco no início do processo.

Neste caso, para  $\rho$  constante, a equação assume a forma:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot D \nabla M \quad (3.4)$$

Onde, o operador Nabla  $\nabla$  é dado por:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k} \quad (3.5)$$

Desde que a Equação (3.4) é uma equação tridimensional transiente, necessita-se de seis condições de contorno na posição e uma no tempo. Devido à simetria existente no sólido, particularmente nos planos  $(x=0,y,z)$ ,  $(x,y=0,z)$ ,  $(x,y,z=0)$  considera-se como volume de trabalho, apenas 1/8 do volume do sólido.

As condições inicial, de simetria e de contorno para o problema são as seguintes:

- Condição inicial:

$$M(x,y,z,t=0) = 0 \quad (3.6)$$

- Condições de simetria

$$\frac{\partial M}{\partial x} \Big|_{x=0,y,z,t} = \frac{\partial M}{\partial y} \Big|_{x,y=0,z,t} = \frac{\partial M}{\partial z} \Big|_{x,y,z=0,t} = 0, t > 0 \quad (3.7)$$

- Condições de contorno na superfície:

$$M \Big|_{x=R_1,y,z,t} = M \Big|_{x,y=R_2,z,t} = M \Big|_{x,y,z=R_3,t} = M_e, t > 0 \quad (3.8)$$

O teor de umidade médio foi obtido como segue (WHITAKER, 1980).

$$\bar{M} = \frac{1}{V} \int_V M dV \quad (3.9)$$

### 3.3.2 – Solução numérica do modelo

#### 3.3.2.1 – Informações gerais

A solução numérica de uma equação diferencial parcial pode ser usada nos casos, por exemplo, onde existem não linearidades, uma vez que a obtenção de uma solução analítica é de notável complexidade.

O estudo de novas técnicas computacionais para solução de problemas diversos em engenharia é de suma importância. Várias técnicas de soluções de equações diferenciais

parciais não-lineares são propostas, tais como: diferenças finitas, elementos finitos e volumes finitos, entre outros. Diversos autores descrevem estes métodos (PATANKAR, 1980; SHIH, 1984; MINKOWICZ et al., 1988; COTTA, 1993; MALISKA, 2004).

Neste trabalho, as equações que governam o problema, juntamente com suas condições de contorno, são resolvidas pelo método numérico dos volumes finitos. Neste método qualquer quantidade contínua pode ser aproximada por um modelo discreto composto de um conjunto de funções contínuas em degraus ou lineares, definidas sob um número finito de subdomínios. Os subdomínios são chamados de volumes de controle e os pontos nodais de centróides dos volumes de controle.

No método de volumes finitos, a equação diferencial parcial que governa o fenômeno é discretizada numericamente através da integração da mesma em volumes elementares e no tempo, obtendo-se assim um sistema de equações algébricas, que devem ser resolvidos através de técnicas específicas. No contexto deste trabalho, é descrito a seguir a metodologia para solução numérica do problema de difusão transiente tridimensional, num sólido com forma de paralelepípedo.

### 3.3.2.2–Discretização da equação de difusão

A equação diferencial parcial geral, (Equação 3.4) em coordenadas cartesianas, que governa um fenômeno difusivo aplicada a um volume de controle infinitesimal (Figura 3.8), é dada por:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D \frac{\partial M}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial M}{\partial z} \right) \quad (3.10)$$

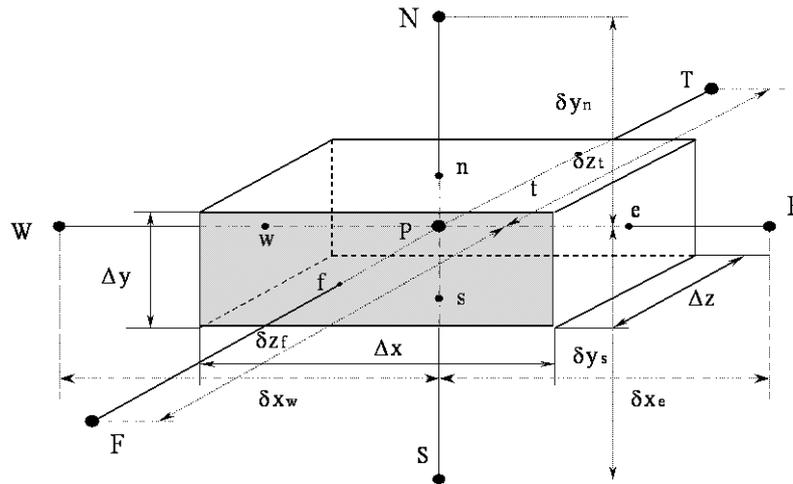


Figura 3.7– volume de controle diferencial usado na solução numérica.

Aplicando-se a integral em todos os termos da Equação (3.10) no volume de controle tridimensional da Figura 3.8 e no tempo, tem-se:

$$\int_V \int_V \frac{\partial M}{\partial t} dv dt = \int_V \int_V \frac{\partial}{\partial t} \left( D \frac{\partial M}{\partial x} \right) dv dt + \int_V \int_V \frac{\partial}{\partial t} \left( D \frac{\partial M}{\partial y} \right) dv dt + \int_V \int_V \frac{\partial}{\partial t} \left( D \frac{\partial M}{\partial z} \right) dv dt \quad (3.11)$$

Para o problema físico proposto têm-se apenas efeitos difusivos, então é mais simples utilizar uma função linear como função de interpolação espacial entre os pontos nodais (MALISKA, 2004). Assim as derivadas diretas relativas ao fluxo difusivo, referentes à Figura 3.8, são dadas por:

$$\left. \frac{\partial M}{\partial x} \right|_e = \frac{M_E - M_P}{\delta x_e} \quad \left. \frac{\partial M}{\partial x} \right|_w = \frac{M_P - M_W}{\delta x_w} \quad \left. \frac{\partial M}{\partial y} \right|_n = \frac{M_N - M_P}{\delta y_n} \quad (3.12^a-f)$$

$$\left. \frac{\partial M}{\partial y} \right|_s = \frac{M_P - M_S}{\delta y_s} \quad \left. \frac{\partial M}{\partial z} \right|_f = \frac{M_F - M_P}{\delta z_f} \quad \left. \frac{\partial M}{\partial z} \right|_t = \frac{M_P - M_T}{\delta z_t}$$

Realizando a integração da Equação (3.11), termo a termo, e usando suas derivadas aproximadas, e uma formulação totalmente implícita, onde os termos são estimados nos tempos  $t+\Delta t$  (MALISKA, 2004), obtém-se:

$$\begin{aligned} M_P - M_P^o \Delta x \Delta y \Delta z = & \left[ D_e \left( \frac{M_E - M_P}{\delta x_e} \right) - D_w \left( \frac{M_P - M_W}{\delta x_w} \right) \right] \Delta y \Delta z \Delta t \\ & + \left[ D_n \left( \frac{M_N - M_P}{\delta y_n} \right) - D_s \left( \frac{M_P - M_S}{\delta y_s} \right) \right] \Delta x \Delta z \Delta t + \left[ D_f \left( \frac{M_F - M_P}{\delta z_f} \right) - D_t \left( \frac{M_P - M_T}{\delta z_t} \right) \right] \Delta x \Delta y \Delta t \end{aligned} \quad (3.12)$$

ou ainda, reorganizando os termos ,pode-se escrever :

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + \frac{D_e \Delta y \Delta z}{\delta x_e} + \frac{D_w \Delta y \Delta z}{\delta x_w} + \frac{D_n \Delta x \Delta z}{\delta y_n} + \frac{D_s \Delta x \Delta z}{\delta y_s} + \frac{D_f \Delta x \Delta y}{\delta z_f} + \frac{D_t \Delta x \Delta y}{\delta z_t} \right) M_P \\ & = \frac{D_e \Delta y \Delta z}{\delta x_e} M_E + \frac{D_w \Delta y \Delta z}{\delta x_w} M_W + \frac{D_n \Delta x \Delta z}{\delta y_n} M_N + \frac{D_s \Delta x \Delta z}{\delta y_s} M_S + \frac{D_f \Delta x \Delta y}{\delta z_f} M_F \\ & + \frac{D_t \Delta x \Delta y}{\delta z_t} M_T + \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} M_P^o \end{aligned} \quad (3.13)$$

Reorganizando os termos que são comuns, pode-se escrever a equação (3.14), na forma linear adimensional, como segue (PATANKAR, 1980; MALISKA 2004):

$$A_P M_P^* = A_E M_E^* + A_W M_W^* + A_N M_N^* + A_S M_S^* + A_T M_T^* + A_F M_F^* + B \quad (3.14)$$

onde:

$$A_E = \frac{D_e \Delta y \Delta z}{\delta x_e} \quad A_W = \frac{D_w \Delta y \Delta z}{\delta x_w} \quad A_N = \frac{D_n \Delta z \Delta x}{\delta y_n} \quad A_S = \frac{D_s \Delta z \Delta x}{\delta y_s}$$

$$A_T = \frac{D_t \Delta x \Delta y}{\delta z_t} \quad A_F = \frac{D_f \Delta x \Delta y}{\delta z_f} \quad A_P^o = \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} \quad B = A_P^o M_P^o$$

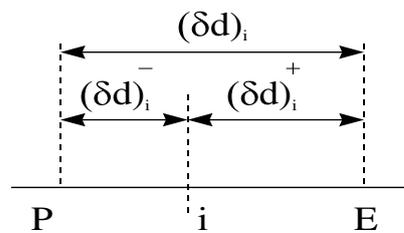
$$A_P = A_E + A_W + A_N + A_S + A_T + A_F + A_P^o \quad M^* = \frac{M - M_e}{M_o - M_e}$$

Na Equação (3.14), os coeficientes  $A_E$ ,  $A_W$ ,  $A_N$ ,  $A_S$ ,  $A_T$  e  $A_F$  refletem as contribuições do transporte difusivo de  $M^*$ , que vem dos pontos nodais vizinhos em direção ao ponto nodal P. O termo  $A_P^0$  significa a influência do valor da variável M no tempo anterior, sobre seu valor no tempo atual. Logicamente seu efeito decresce no tempo ao longo do processo e será igual a zero no final do processo, se o regime permanente for alcançado. Nesta equação  $\Delta v = \Delta x \Delta y \Delta z$ , é o volume do elemento infinitesimal considerado na Figura 3.8.

Nos problemas de difusão com D variável, de acordo com a Figura 3.9 o procedimento para obter o seu valor nas interfaces do volume de controle é assumir uma variação D entre os pontos P e seus vizinhos em qualquer direção (W,E,N,S,F,T) (PATANKAR, 1980). Para os pontos P e E; por exemplo, pode-se escrever:

$$D_i = \left( \frac{1 - \hat{f}_i}{D_P} - \frac{\hat{f}_i}{D_E} \right)^{-1} \quad (3.15)$$

onde  $\hat{f}_i$  é o fator de interpolação, dado por

$$\hat{f}_i = \frac{\delta_{d i}^+}{\delta_{d i}^-}$$


**Figura 3.8** – Posição da interface i entre os pontos P e E.

Se a interface i está situada no ponto médio que une os pontos P e E (malha uniforme), então  $\hat{f}_i = 0,5$ , e portanto  $D_i$  é dado pela média harmônica de  $D_P$  ou  $D_E$ . Isto é:

$$D_i = \frac{2D_P D_E}{D_P + D_E} \quad (3.16)$$

Esta é uma formulação mais efetiva, uma vez que, se  $D_P$  ou  $D_E$  forem zero, não haverá fluxo de  $M$ , e, portanto  $D_i$  será nulo, o que é fisicamente realista.

### 3.3.2.3 – Geração da malha

A malha numérica utilizada é uma malha regular em coordenadas cartesianas. A posição dos pontos nodais no interior do domínio é obtida por:

$$x_i = y_i = z_i = 0, \quad \text{para } i=1;$$

$$x_i = \frac{\Delta x}{2}, \quad \text{para } i=2;$$

$$y_j = \frac{\Delta y}{2}, \quad \text{para } j=2;$$

$$z_k = \frac{\Delta z}{2}, \quad \text{para } k = 2$$

$$x_i = x_{i-1} + \Delta x, \quad \text{para } i = 3, \dots, \text{np}x-1; \quad (3.17a-j)$$

$$y_j = y_{j-1} + \Delta y, \quad \text{para } j = 3, \dots, \text{np}y-1;$$

$$z_k = z_{k-1} + \Delta z, \quad \text{para } k = 3, \dots, \text{np}z-1;$$

$$x_i = R_1, \quad \text{para } i = \text{np}x;$$

$$y_j = R_2, \quad \text{para } j = \text{np}y;$$

$$z_k = R_3, \quad \text{para } k = \text{np}z.$$

### 3.3.2.4 – Estimativa dos pontos de simetria

Os pontos de simetria não entram no conjunto de equações a serem resolvidas. Após o sistema de equações terem sido resolvidos, sua estimativa é feita. Assim, assume-se que o fluxo de M (transferência de massa) que sai do ponto adjacente ao ponto de simetria é igual ao fluxo de M que chega neste ponto. Neste caso tem-se a seguinte condição, por exemplo:

Para os pontos situados no plano ( $x=0$ ,  $y$ ,  $z$ ) e válida para os intervalos ( $0 \leq z \leq R_3$ ) e ( $0 \leq y \leq R_2$ ):

$$-D_w \left. \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right|_w = -D_e \left. \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right|_e \quad (3.18)$$

Na forma discretizada, tem-se:

$$-D_w \left( \frac{M_p - M_w}{\delta x_w} \right) = -D_e \left( \frac{M_e - M_p}{\delta x_e} \right) \quad (3.19a)$$

ou ainda:

$$M_w = \left( \frac{D_e}{D_w} \frac{\delta x_w}{\delta x_e} + 1 \right) M_p - \frac{D_e}{D_w} \frac{\delta x_w}{\delta x_e} M_e \quad (3.19b)$$

Para os demais planos o procedimento é semelhante.

A Equação (3.14), aplicada a todos os pontos internos do sólido gera um conjunto de equações algébricas. Este conjunto de equações foi resolvido iterativamente, pelo método Gauss-Seidel. Os cálculos foram iniciados com as condições iniciais dadas e só terminaram quando o critério de convergência apresentado na Equação (3.14) foi satisfeito, em cada ponto do domínio computacional. O método de Gauss-Seidel é um método iterativo para resolução de sistemas de equações lineares. É semelhante ao método de Jacobi e como tal, obedece ao mesmo critério de convergência. É condição suficiente de convergência que a

matriz seja estritamente diagonal dominante e, fica garantida a convergência da sucessão de valores gerados para a solução exata do sistema linear.

$$|M^{*n-1} - M^{*n}| \leq 10^{-8} \quad (3.20)$$

onde,  $n$  representa a  $n$ -ésima iteração em cada instante de tempo. Este critério do ponto de vista físico e numérico é suficientemente preciso para garantir o realismo físico das respostas obtidas (NASCIMENTO, 2000). Para obter os resultados foi adaptado um programa computacional desenvolvido por NASCIMENTO (2002), com o Software C++, considerando uma malha numérica de 20 x 20 x 20 pontos nodais e um  $\Delta t = 20s$ . Estes parâmetros foram obtidos depois que um refino de malha e de tempo foi realizado em trabalhos anteriores por (CAVALCANTI, 2006; NÓBREGA, 2007). C++ é uma linguagem de programação multi-paradigma e de uso geral. A linguagem é considerada de médio nível, pois combina características de linguagem de alto e baixo nível. Desde os anos 1990 é uma das linguagens comerciais mais populares, sendo bastante usada também na academia por seu grande desempenho e base de utilizadores.

### 3.3.2.5 – Tratamento estatístico dos dados

Com respeito aos dados do teor de umidade ao longo do processo de umidificação, é conhecido que no período inicial, as taxas de ganho de umidade são mais elevadas, requerendo do pesquisador a leitura destes dados em intervalos de tempo menores, podendo ser ampliado, à medida que o processo vai se desenvolvendo. Sob o aspecto físico, esta metodologia é extremamente satisfatória, em virtude de possibilitar a descrição do fenômeno com grande precisão. Contudo, sob o aspecto de tratamento estatístico dos dados não é satisfatório, tendo em vista que uma grande densidade de pontos ocorre nos tempos iniciais em comparação à que existe para tempos maiores. É estatisticamente mais adequado realizar o ajuste de parâmetros a partir de uma distribuição uniforme de pontos ao longo do processo; desta forma, propõe-se um ajuste destes dados experimentais a uma equação exponencial a 3 termos e 6 parâmetros.

A equação tem a forma:

$$\bar{M}^* = A_1 \exp(-K_1 t) + A_2 \exp(-K_2 t) + A_3 \exp(-K_3 t) \quad (3.21)$$

onde  $t$  é dado em horas. A estimação não linear dos parâmetros da Equação 3. Foi realizada utilizando o Software Statistica e o método numérico de quasi-Newton, com critério de convergência de 0,0001. A escolha da forma desta equação foi baseada nos trabalhos de (CAVALCANTI, 2006; NASCIMENTO, 2002), onde verificou que equações exponenciais com maior número de termos se ajustam muito bem aos dados experimentais.

Com a equação ajustada, estabeleceram-se instantes de “tomada de dados” ao longo do processo em que o teor de umidade médio pudesse ser determinado, de forma que a distribuição destes pontos ficasse aproximadamente uniforme.

Neste trabalho, o coeficiente de difusão foi considerado dependente do teor de umidade médio do material de acordo com a seguinte equação:

$$D = D_0 \exp \eta \bar{M} \quad (3.22)$$

Com  $D$  dado em  $m^2/s$ . Nesta equação  $D_0$  e  $\eta$  são constantes (CAVALCANTI, 2006), e o valor de  $\bar{M}$  é dado pela Equação (3.21).

O coeficiente de difusão foi obtido variando as constantes  $D_0$  e  $\eta$  para minimizar a soma dos desvios quadráticos entre os resultados preditos e experimentais. O desvio relativo e a variância são definidos como segue (FIGLIOLA e BEASLEY, 1995):

$$ERMQ = \sum_{i=1}^n \bar{M}_{i,Num}^* - \bar{M}_{i,Exp}^* \quad (3.23a)$$

$$S^2 = \frac{ERMQ}{\hat{n} - 1} \quad (3.23b)$$

onde,  $\hat{n}$  é o número de pontos experimentais.

Inicialmente considerou-se  $\eta=0$  e  $D_0=10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s (arbitrário) e pelo critério do ERMQ obteve-se um novo  $D_0$ . Em seguida fixou-se o  $D_0$  obtido e variou-se  $\eta$  até que o menor ERMQ fosse obtido. Posteriormente, fixou-se o  $\eta$  obtido na etapa anterior e variou-se  $D_0$  até que um novo ERMQ fosse obtido, obtendo-se um novo  $D_0$ . Este procedimento foi executado até obter-se o menor ERMQ e com ele, o par  $\eta$  e  $D_0$ , de forma a completar a equação. Vale salientar que ERMQ, obtido usando o procedimento descrito acima, a condição de  $\eta=0$  vai decrescendo até atingir seu valor mínimo (NASCIMENTO,2002;CAVALCANTI,2006).

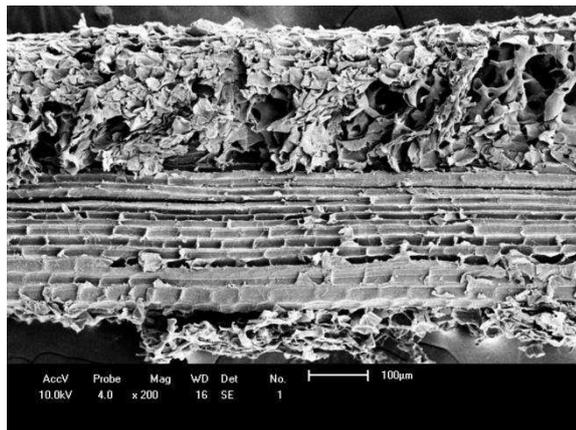
## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

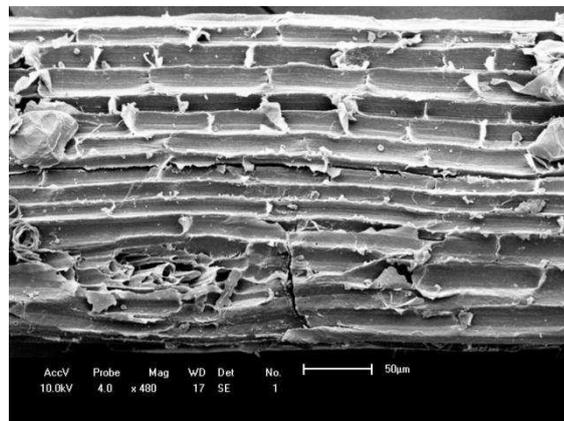
#### 4.1 – Experimental

##### 4.1.1–Morfologia das fibras de macambira

As micrografias eletrônicas de varredura (MEV) das fibras de macambira são mostradas nas Figuras 4.1 e 4.2. As fibras apresentam estrutura fibrilar de cadeias longas compostas por moléculas de celulose com lignina e polioses agindo como ligantes, conferindo características típicas de fibras vegetais.



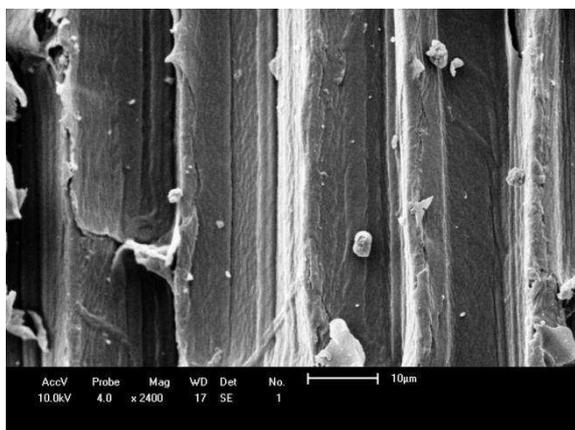
(a)



(b)

**Figura 4.1** – Micrografias da fibra de macambira não tratada: (a) 200x; (b)480x.

Na Figura 4.2 é possível visualizar as microfibrilas unidas entre si pela lignina e polioses, de maneira a formar filamentos contínuos em todo o sentido do comprimento da fibra o que proporciona a rigidez da fibra de macambira.



**Figura 4.2** – Micrografias da fibra de macambira não tratada com o aumento de 2400x.

#### **4.1.2 – Ensaio de sorção de água**

As curvas de sorção de água como uma função das dimensões, temperatura e tempo de exposição de compósito poliéster insaturado com 30% de fibra de macambira estão mostradas nas Figuras 4.3 a 4.7.

Verifica-se, após análise das figuras que a sorção de água de todos os compósitos analisados é rápida nos estágios iniciais (primeiras 50 horas), diminuindo e tendendo ao equilíbrio em tempos mais longos de exposição. Obviamente, o aumento no teor de umidade apresentado por estes compósitos foi atribuído ao fato que as fibras de Macambira serem higroscópicas.

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam as características, tipo de material, condições de umidificação, composição, dimensões, valores dos teores de umidade de equilíbrio, bem como as áreas, volumes e relações área/volume e o tempo total de absorção das amostras para cada experimento.

**Tabela 4.1**– Apresentação das condições de umidificação, composição e dimensões das amostras usadas para cada experimento.

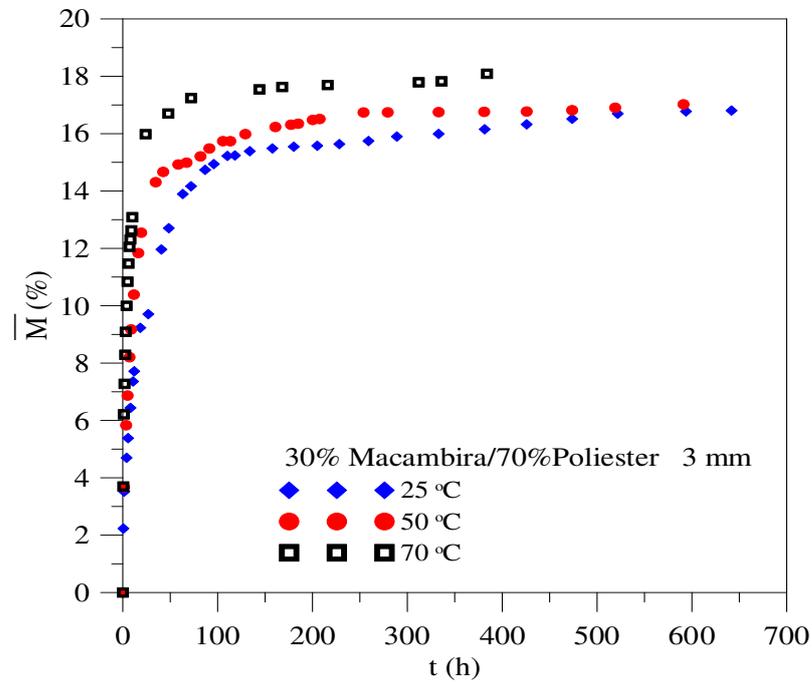
Amostra	T (C)	Composição (%)	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>
Poliéster	Ambiente	100% Poliéster	20,00	3,00	20,00
Compositos	25		20,00	3,00	20,00
	25		20,00	6,00	20,00
	50	30% Macambira	20,00	3,00	20,00
	50	+	20,00	6,00	20,00
	70	70% Poliéster	20,00	3,00	20,00
	70		20,00	6,00	20,00

**Tabela 4.2**– Apresentação dos teores de umidade, dados geométricos e tempo final de absorção de cada amostra.

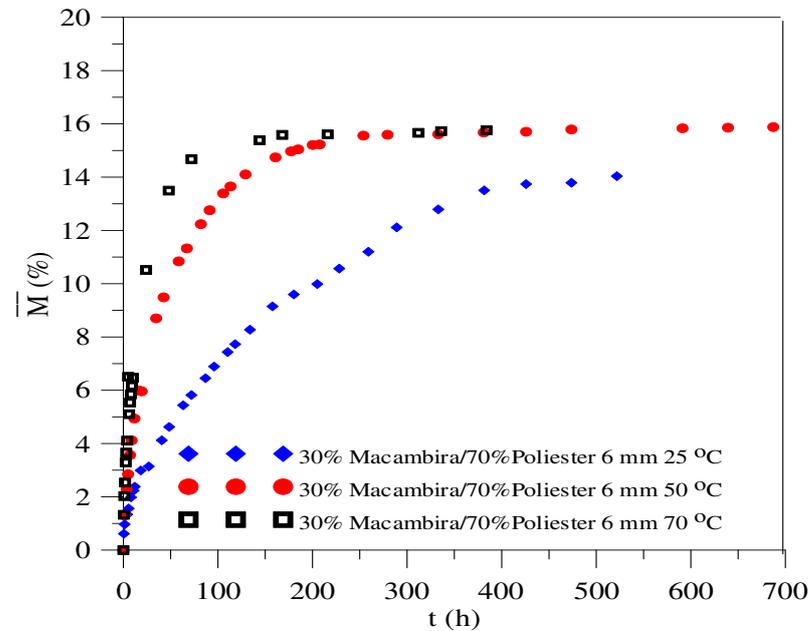
Amostra	M <sub>e</sub> (base seca)	S <sub>o</sub> x 10 <sup>4</sup> (m <sup>2</sup> )	V <sub>o</sub> x 10 <sup>6</sup> (m <sup>3</sup> )	S <sub>o</sub> /V <sub>o</sub> (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	Tempo (horas)
Poliéster	1,255	10,4	1,20	866,67	600
25°C / 3 mm	16,807	10,4	1,20	866,67	642
25°C / 6 mm	12,500	12,8	2,40	533,33	594
50°C / 3 mm	17,022	10,4	1,20	866,67	687
50°C / 6 mm	15,891	12,8	2,40	533,33	687
70°C / 3 mm	19,100	10,4	1,20	866,67	384
70°C / 6 mm	14,872	12,8	2,40	533,33	648

As figuras 4.3 a 4.7 ilustram as comparações de sorção de água para diferentes temperaturas e mesmo volume de corpo de prova, e para diferentes espessuras de corpo de prova. Observa-se que a sorção de água ocorre mais rapidamente em corpos de prova com maior relação área/volume, temperaturas elevadas, tendendo para o equilíbrio em tempos longos. O valor máximo do teor de água no compósito atingiu 19,1% na condição de T=70°C e espessura de 3 mm, enquanto que em T=25°C espessura do corpo de prova de 6 mm, este valor atingiu 12,5%. Para temperaturas elevadas, a cinética de sorção de água é

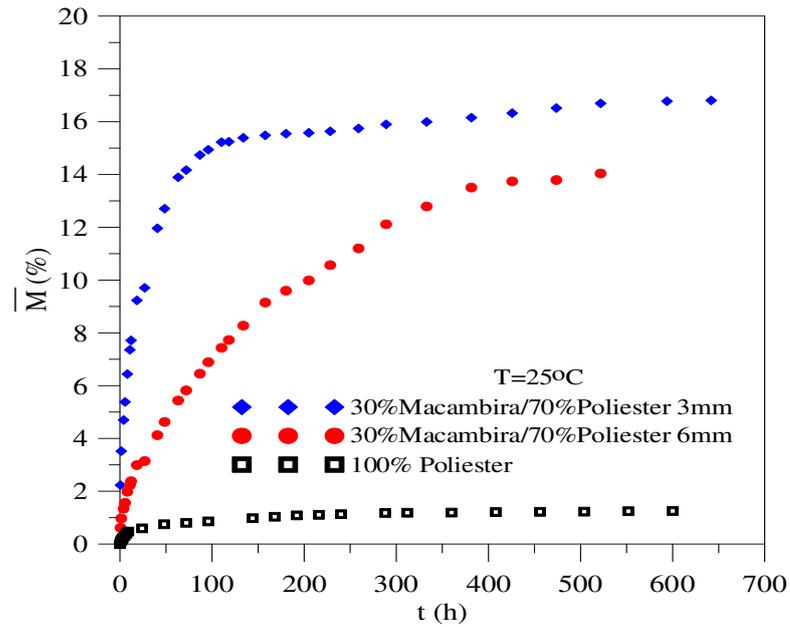
denominadapor efeitos térmicos apenas, implicando que o coeficiente de difusão de massa no interior do material é fortemente dependente da temperatura.



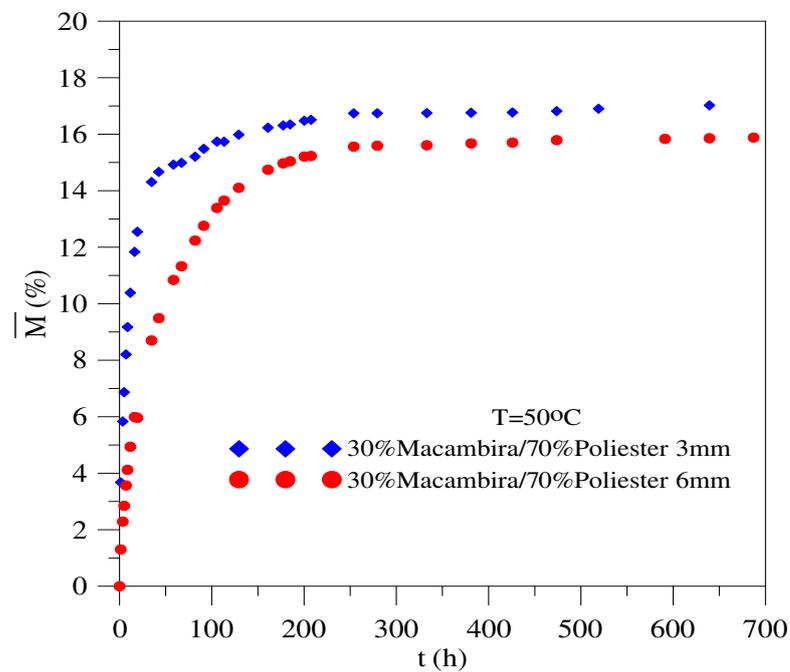
**Figura 4.3** – Cinética de sorção de água dos compósitos reforçados com 30% de fibras curtas de macambira. Temperaturas do ensaio de 25°C, 50°C e 70°C e espessura do corpo de prova de 3 mm.



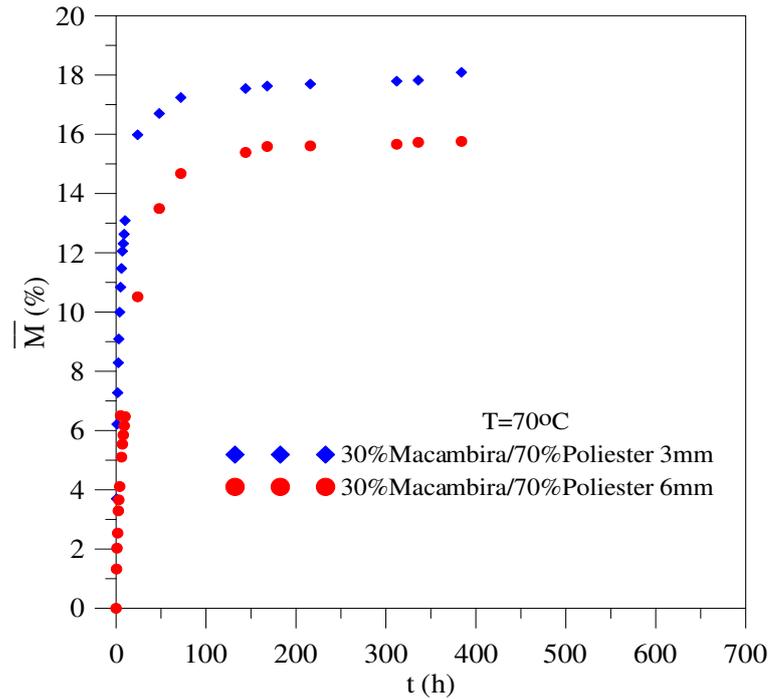
**Figura 4.4** – Cinética de sorção de água dos compósitos reforçados com 30% de fibras curtas de macambira. Temperatura do ensaio de 25°C, 50°C e 70°C e espessura do corpo de prova de 6 mm.



**Figura 4.5** – Cinética de sorção de água dos compósitos reforçados com 30% de fibras curtas de macambira. Temperatura do ensaio de 25°C e espessuras do corpo de prova de 3 mm e 6 mm.



**Figura 4.6** – Cinética de sorção de água dos compósitos reforçados com 30% de fibras curtas de macambira. Temperatura do ensaio 50°C e espessuras do corpo de prova de 3 e 6 mm.



**Figura 4.7** – Cinética de sorção de água dos compósitos reforçados com 30% de fibras curtas de macambira. Temperatura do ensaio 70°C e espessuras do corpo de prova de 3 mm e 6 mm.

## 4.2 – Teórico

### 4.2.1 – Estimação não linear dos parâmetros

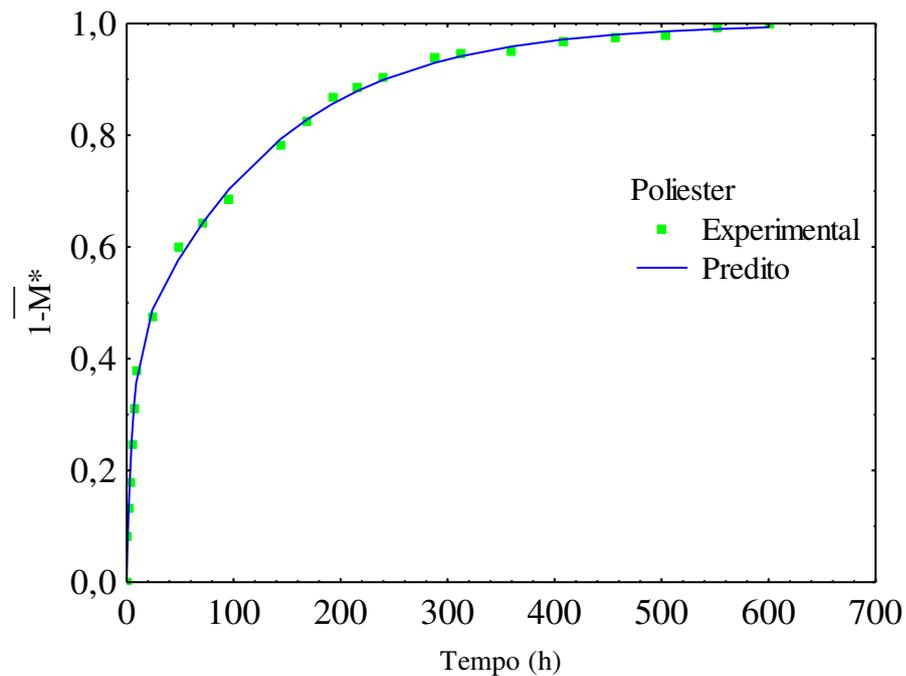
Para obter os coeficientes de difusão durante o processo de absorção de água no sólido, tornou-se necessário obter uma Equação (3.21) que se ajustasse aos pontos experimentais do teor de umidade ao longo do processo. A Tabela 4.3 apresenta os valores dos parâmetros obtidos bem como os coeficientes de correlação para todos os testes realizados. É evidenciada, a excelente concordância entre os pontos preditos e experimentais caracterizados pelo coeficiente de correlação e variância encontrado. Neste sentido, é possível determinar os valores dos coeficientes de difusão de massa para os experimentos realizados, utilizando-se o modelo de parâmetros concentrado proposto.

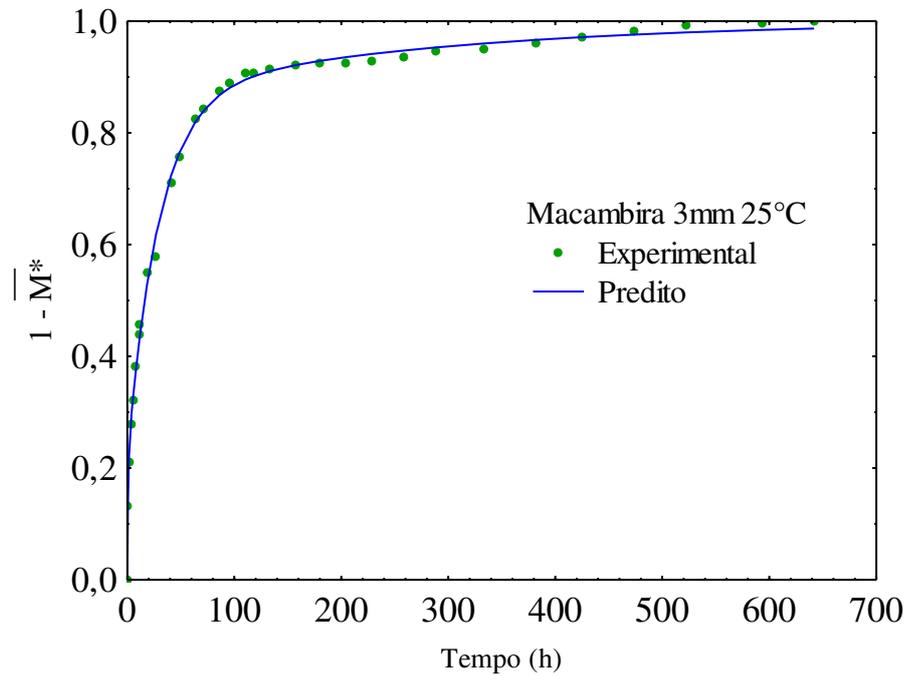
Com a equação ajustada, estabeleceram-se instantes de “tomada de dados” ao longo do processo em que o teor de umidade médio pudesse ser determinado, de forma que a distribuição destes pontos ficasse aproximadamente uniforme.

**Tabela 4.3** – Parâmetros da Equação (3.21) ajustados aos dados experimentais

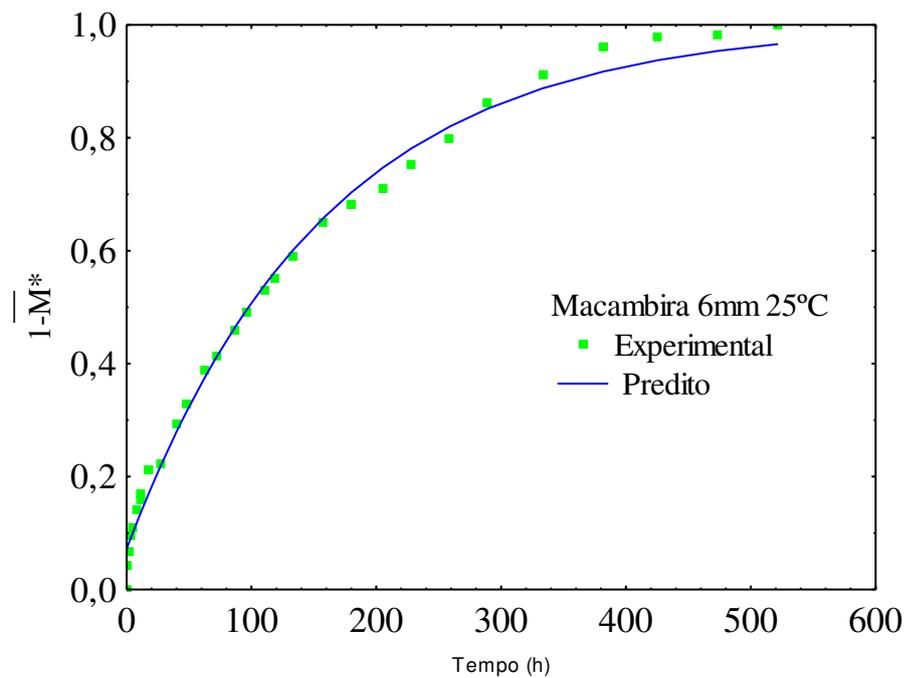
Amostras	PARÂMETROS							
	A <sub>1</sub>	K <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	K <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	K <sub>3</sub>	S <sup>2</sup>	R
Poliéster	0.304079	-0.007479	0.388668	-0.184279	0.303903	-0.007494	0.99909	0.99955
25°C 3 mm	0.133646	-0.003624	0.651809	-0.034148	0.213158	-1.31023	0.99819	0.99909
25°C 6 mm	0.309463	-0.006338	0.309462	-0.006336	0.309503	-0.006339	0.99340	0.99669
50°C 3 mm	0.139746	-3.08914	0.666708	-0.098383	0.193546	-0.008464	0.99967	0.99983
50°C 6 mm	0.057850	-0.004996	0.167926	-0.212729	0.764507	-0.017382	0.99953	0.99977
70°C 3 mm	0.567648	-0.116969	0.098924	-0.007642	0.333909	-1.53705	0.99902	0.99951
70°C 3 mm	0.170309	-0.697418	0.799084	-0.037868	0.024365	-0.004907	0.99526	0.99763

Observa-se uma pequena variação nos dados obtidos para tempos longos, que pode ser atribuída a vários fatores como: natureza do compósito estudado, isto é, a fibra vegetal que foi utilizada é de natureza higroscópica, a falta de uniformidade no diâmetro das fibras de Macambira usada na confecção do compósito, e as variações de temperatura durante as medições, mesmo os testes sendo realizados a temperaturas controladas.

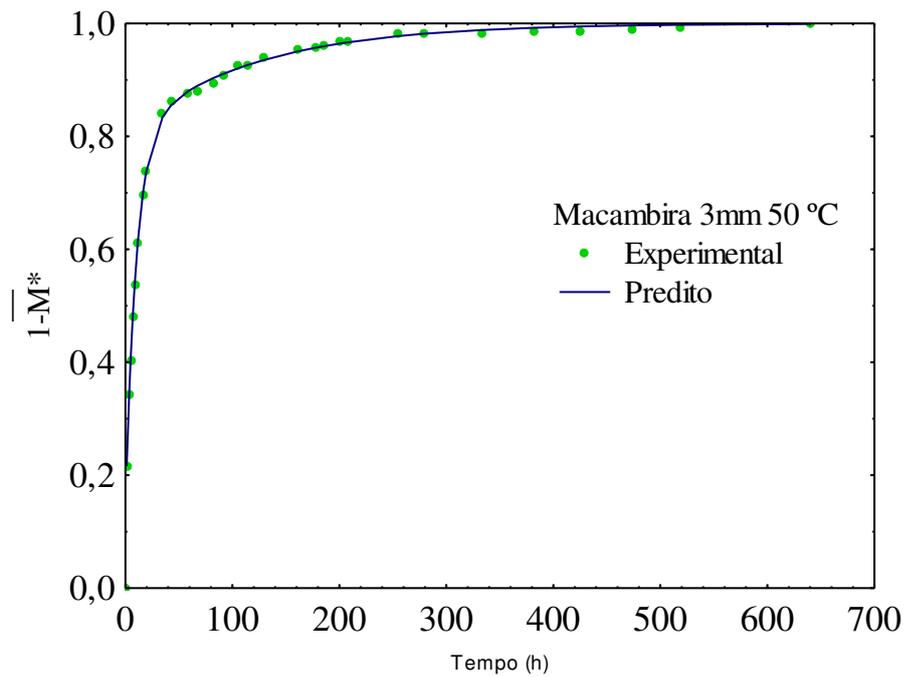
**Figura 4.8** – Comparação entre teores de umidade médios da matriz, experimental e predito pela Equação (3.21).



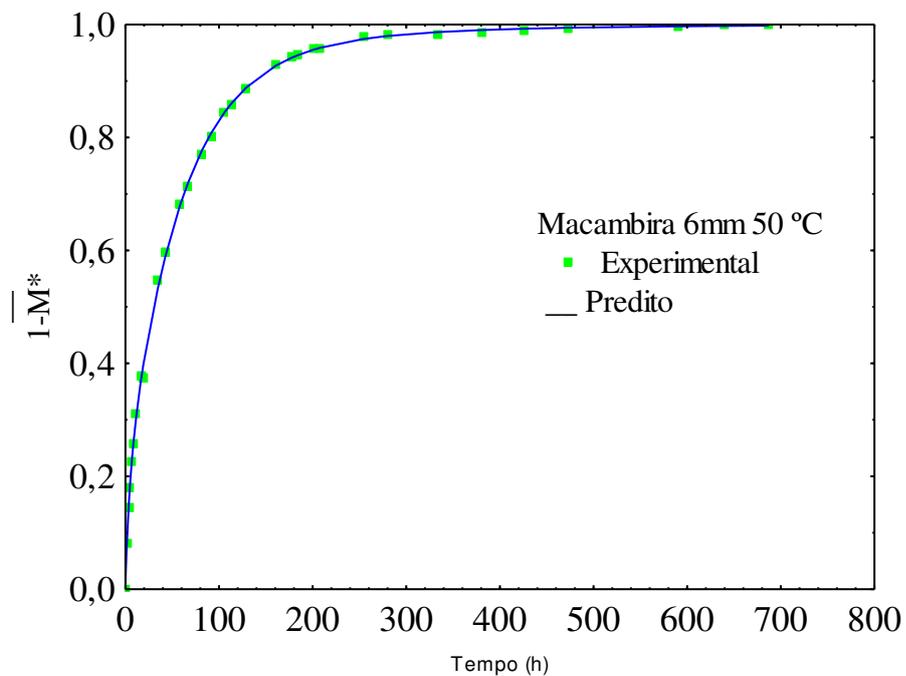
**Figura 4.9** – Comparação entre teores de umidade médio experimental e preditos pela Equação (3.21), para compósito reforçado com 30% de fibras de macambira, 3 mm de espessura e temperatura de 25°C.



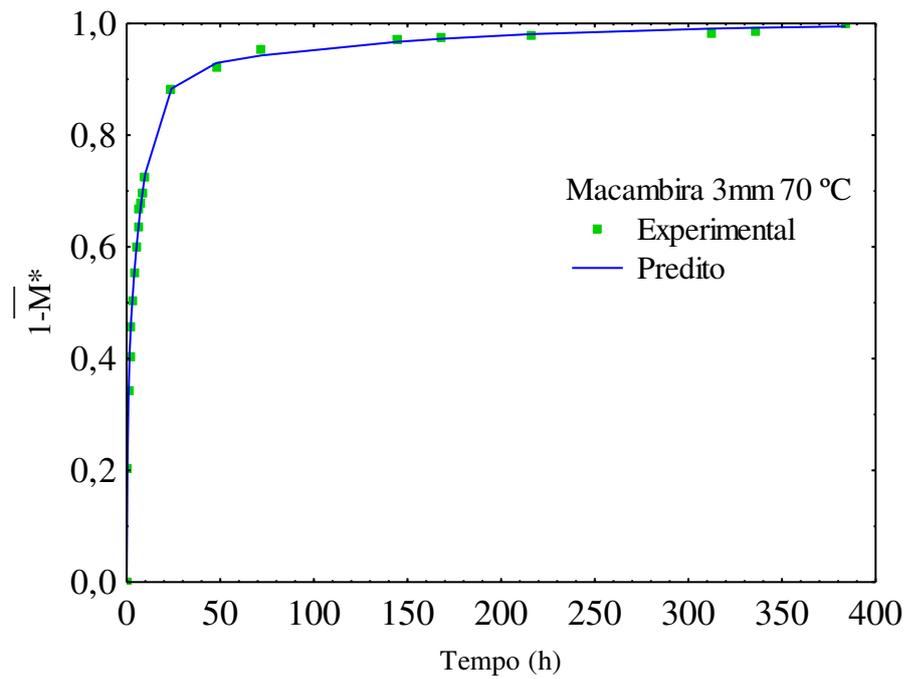
**Figura 4.10** – Comparação entre teores de umidade experimental e predito pela Equação (3.21), para compósito reforçado com 30% de fibras de macambira, 6 mm de espessura e temperatura de 25°C.



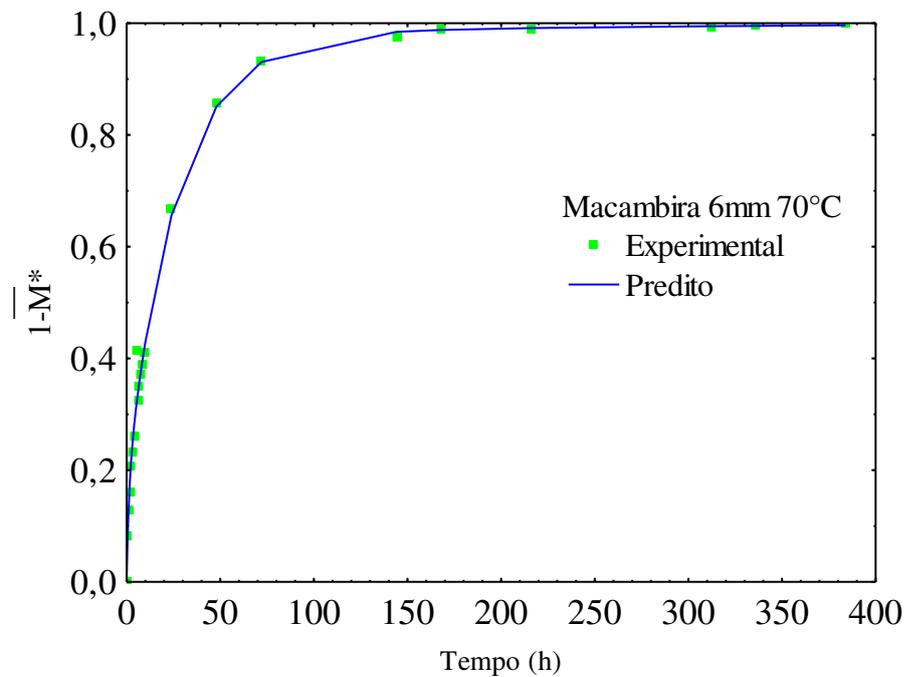
**Figura 4.11** – Comparação entre teores de umidade experimental e predito pela Equação (3.21), para compósito reforçado com 30% de fibras de macambira, 3 mm de espessura e temperatura de 50°C



**Figura 4.12** – Comparação entre teores de umidade experimental e predito pela Equação (3.21), para compósito reforçado com 30% de fibras de macambira, 6 mm de espessura e temperatura de 50°C



**Figura 4.13** – Comparação entre teores de umidade experimental e predito pela Equação (3.21), para compósito reforçado com 30% de fibras de macambira, 3 mm de espessura e temperatura de 70°C



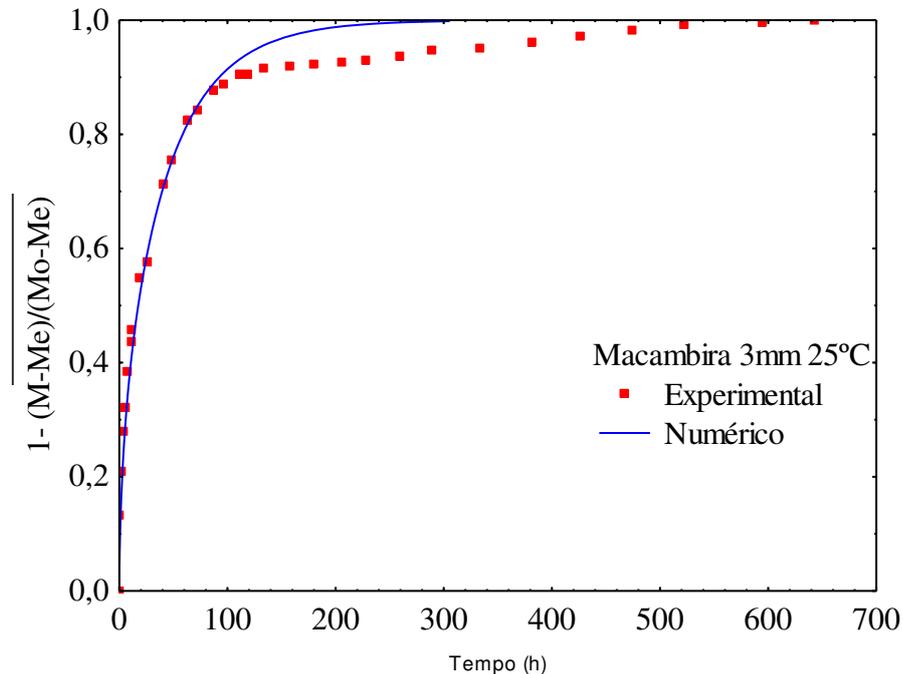
**Figura 4.14** – Comparação entre teores de umidade experimental e predito pela Equação (3.21), para compósito reforçado com 30% de fibras de macambira, 6 mm de espessura e temperatura de 70°C.

## 4.2.2 – Aplicação do modelo numérico

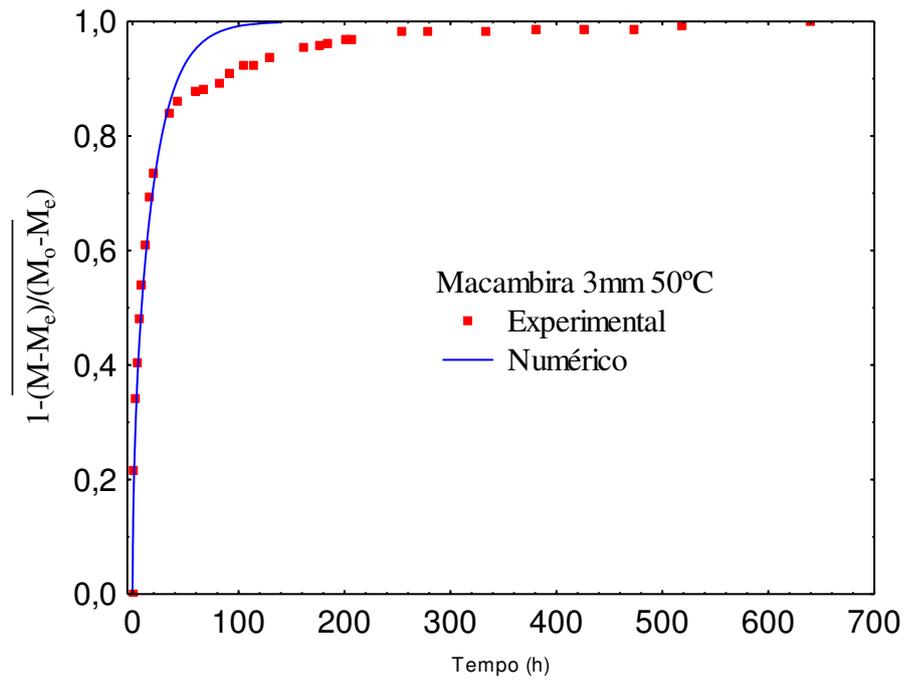
### 4.2.2.1 – Cinética de sorção

Os resultados numéricos obtidos com o modelo matemático dependem muito das condições de contorno, propriedades termofísicas 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.

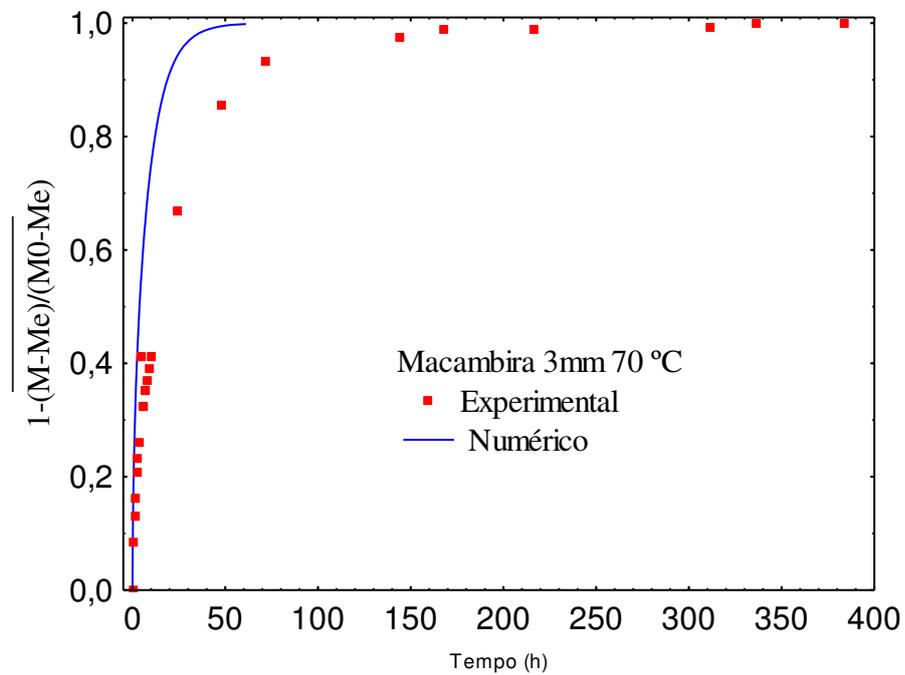
Diante da explanação, as Figuras 4.15 a 4.20 apresentam os resultados da comparação entre os valores do teor de umidade médio adimensional experimental e previsto pelo modelo numérico proposto e o compósito de poliéster insaturado reforçado por fibras de Macambira. Logo, pode-se afirmar que o modelo é versátil e pode ser usado para descrever a umidificação de compósitos, comprovado em prévios trabalhos CAVALCANTI, (2006).



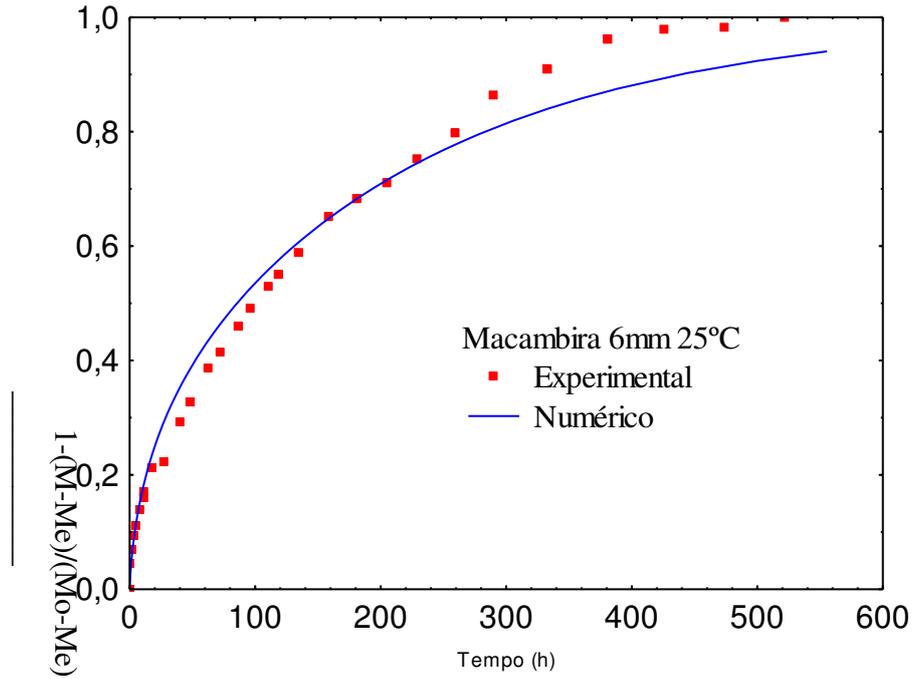
**Figura 4.15** – Comparação entre os resultados teóricos e experimental do teor de umidade durante a umidificação do compósito poliéster insaturado reforçado com 30% de fibras de macambira, 3mm de espessura e temperatura de 25°C.



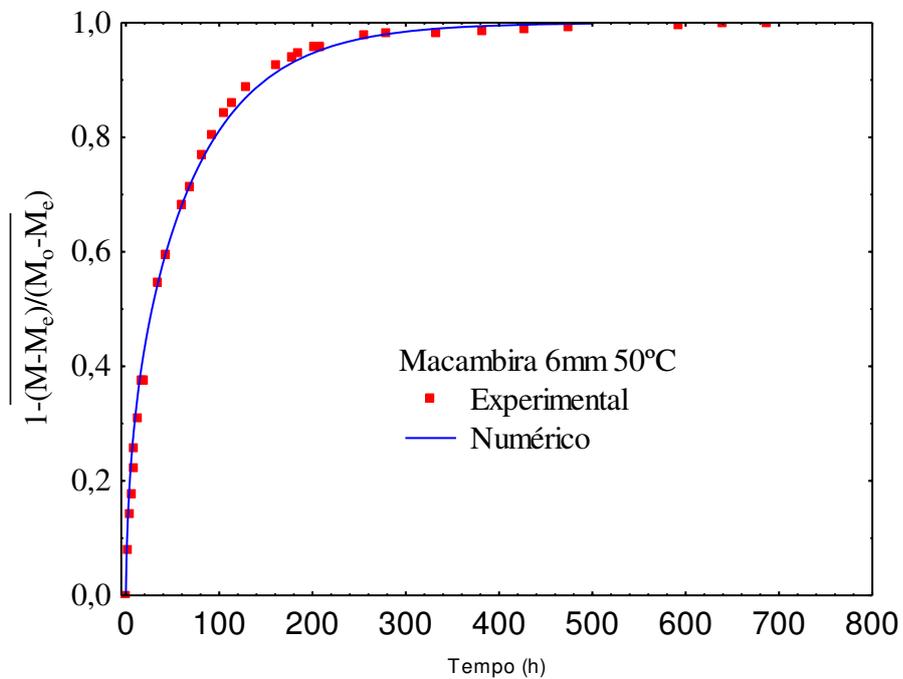
**Figura 4.16** – Comparação entre os resultados teóricos e experimental do teor de umidade durante umidificação do compósito poliéster insaturado reforçado com 30% de fibras de macambira, 3mm de espessura e temperatura de 50°C.



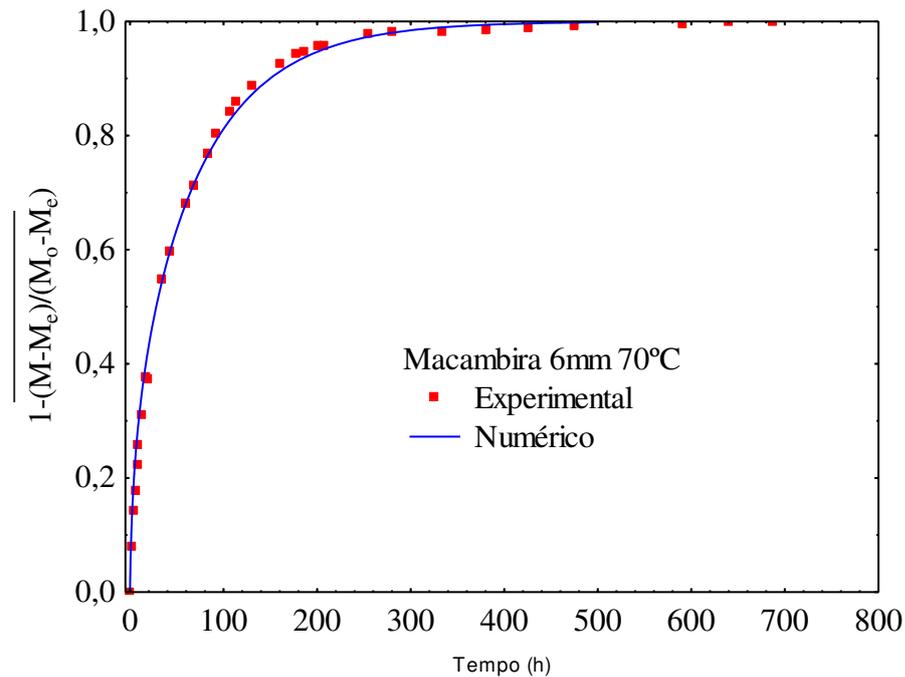
**Figura 4.17** – Comparação entre os resultados teóricos e experimental do teor de umidade durante umidificação do compósito poliéster insaturado reforçado com 30% de fibras de macambira, 3mm de espessura e temperatura de 70°C.



**Figura 4.18** – Comparação entre os resultados teóricos e experimental do teor de umidade médio durante umidificação do compósito poliéster insaturado reforçado com 30% de fibras de macambira, 6 mm de espessura e temperatura de 25°C.



**Figura 4.19** – Comparação entre os resultados teóricos e experimental do teor de umidade durante umidificação do compósito poliéster insaturado reforçado com 30% de fibras de macambira, 6mm de espessura e temperatura de 50°C.

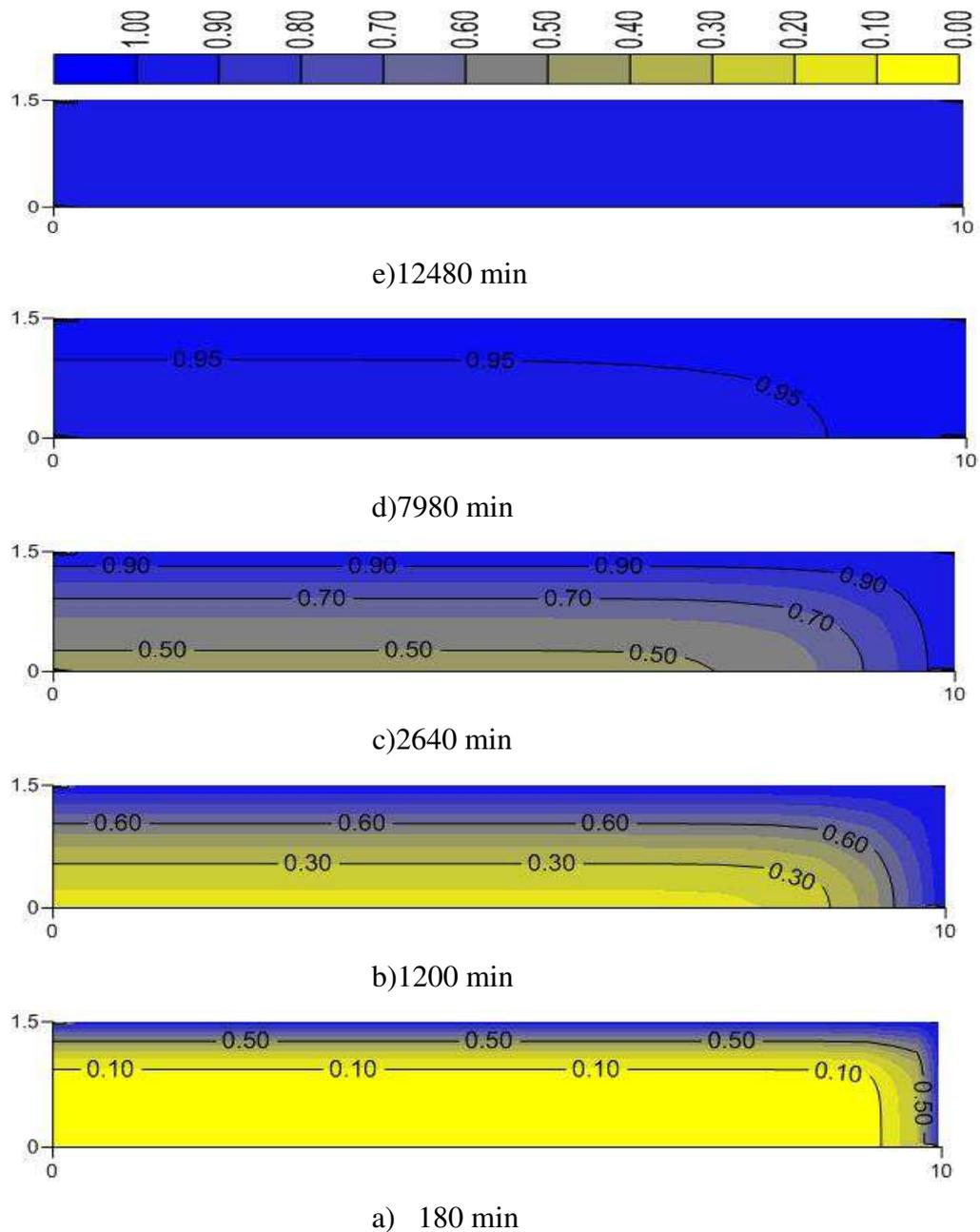


**Figura 4.20** – Comparação entre os resultados teóricos e experimental do teor de umidade durante a umidificação do compósito poliéster insaturado reforçado com 30% de fibras de macambira, 6 mm de espessura e temperatura de 70°C.

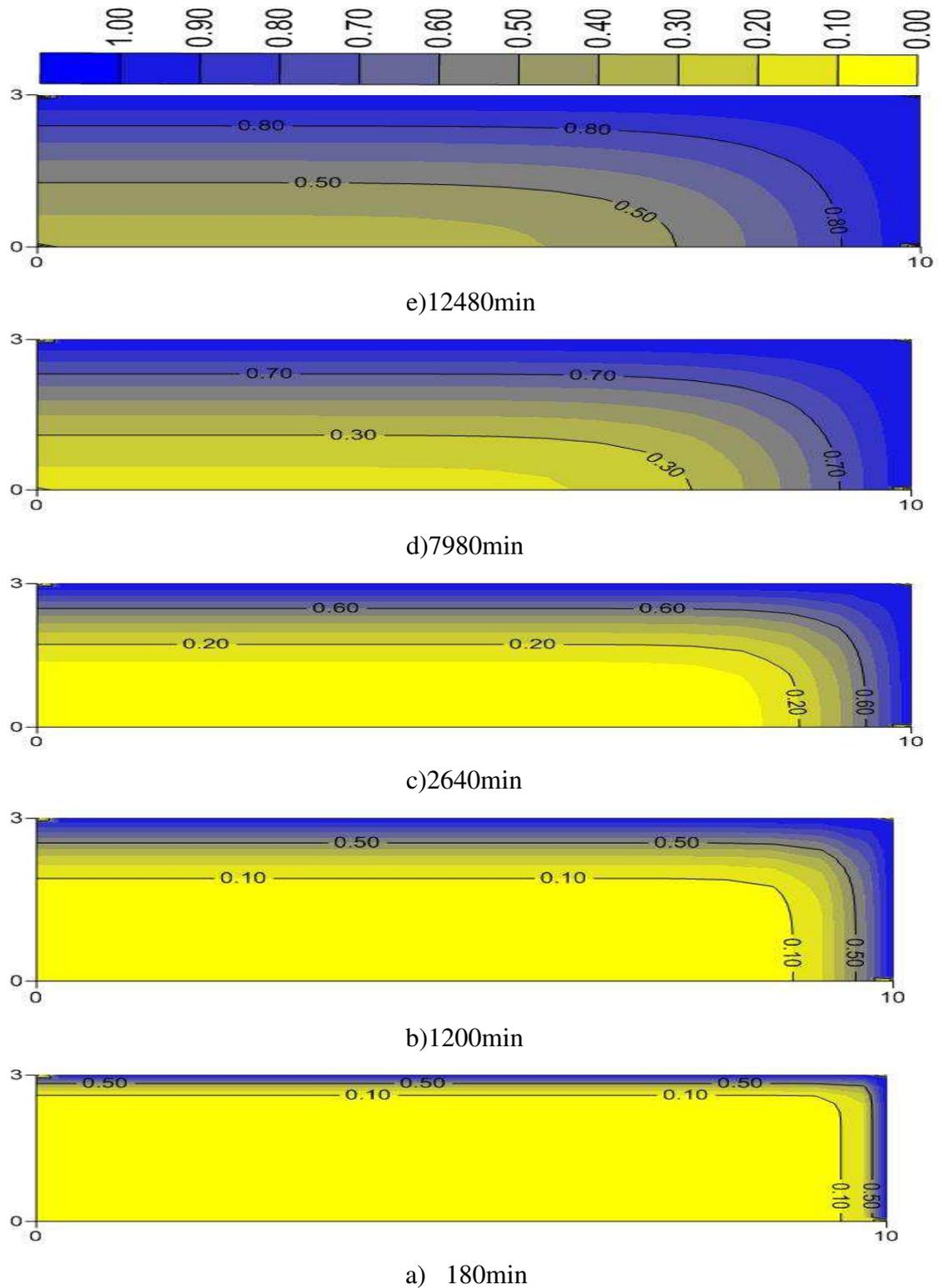
A distribuição do teor de umidade nos compósitos reforçados com 30% de fibras de Macambira, para as espessuras de 3 e 6 mm nas temperaturas de 25, 50 e 70°C, no plano  $x=x/R=5$  nos tempos 180, 1200, 2640, 7980 e 12240 minutos estão representados nas Figuras 4.21 a 4.26. A existência de altos valores dos gradientes de umidade na região próxima aos vértices dos sólidos é observada e a distribuição do teor de umidade mostrou-se ser não uniforme com aumento do teor de umidade, com o tempo de imersão e variação da temperatura. Nas áreas próximas aos pontos  $(x=R_1, y=R_2, z=R_3)$  o sólido umidifica mais rapidamente por estar em contato direto com a água. Esta umidade ao penetrar no compósito gera gradiente bem acentuada no interior do sólido, decrescendo com o aumento do tempo de imersão até atingir o equilíbrio.

Os compósitos reforçados com fibras de Macambira, com diferentes espessuras e temperatura de ensaios, mostram que o processo de umidificação é mais acelerado nos compósitos reforçados com fibras, e mais ainda, se o processo ocorre em temperaturas elevadas e com compósitos de menor espessura.

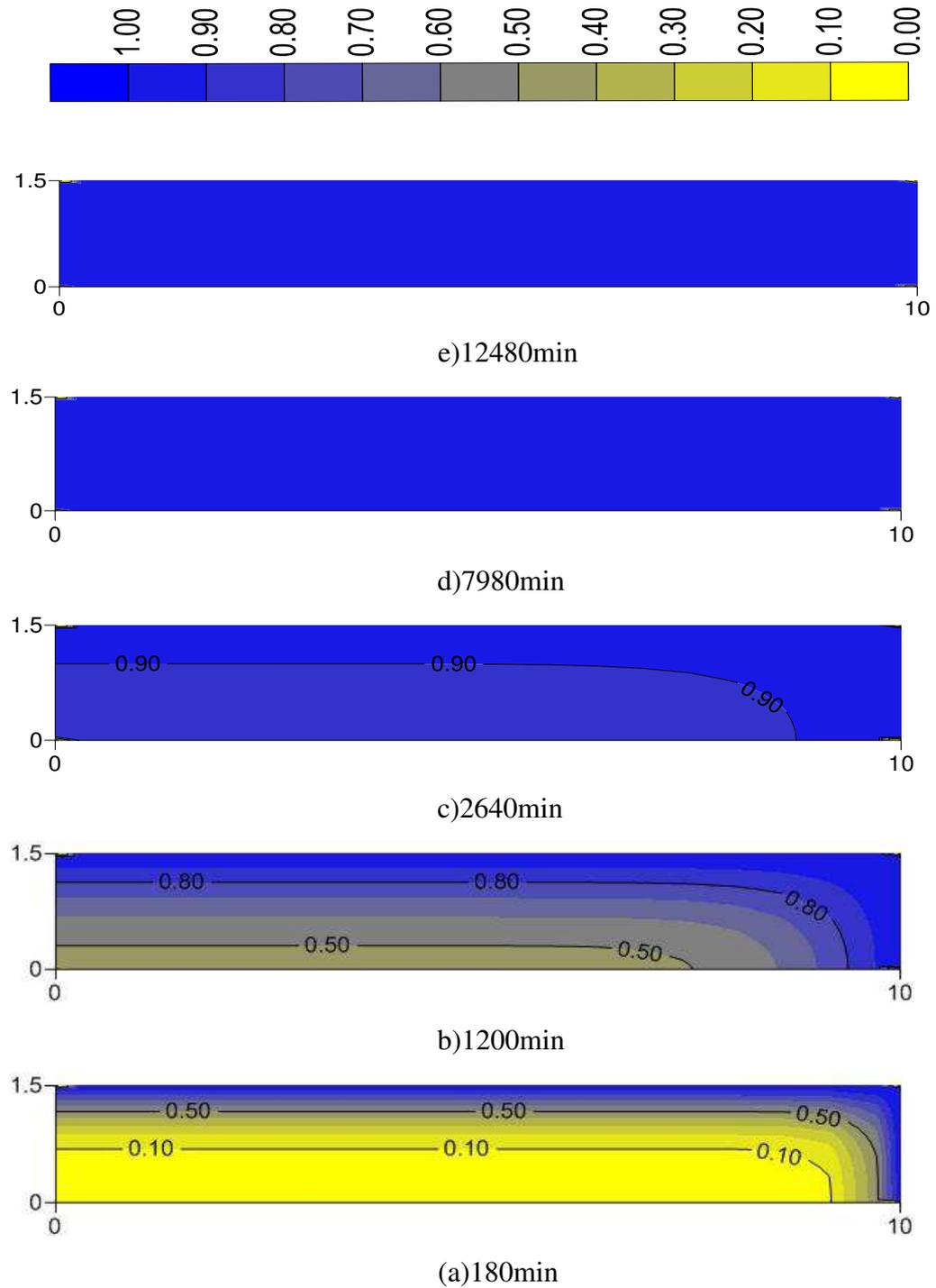
Analisando as Figuras 4.21 a 4.26 observa-se um aumento no gradiente de umidade com o tempo, aumento da temperatura de ensaio e variação da relação área/ volume dos corpos de prova. Este fato pode ser atribuído à diminuição da densidade e viscosidade da água.



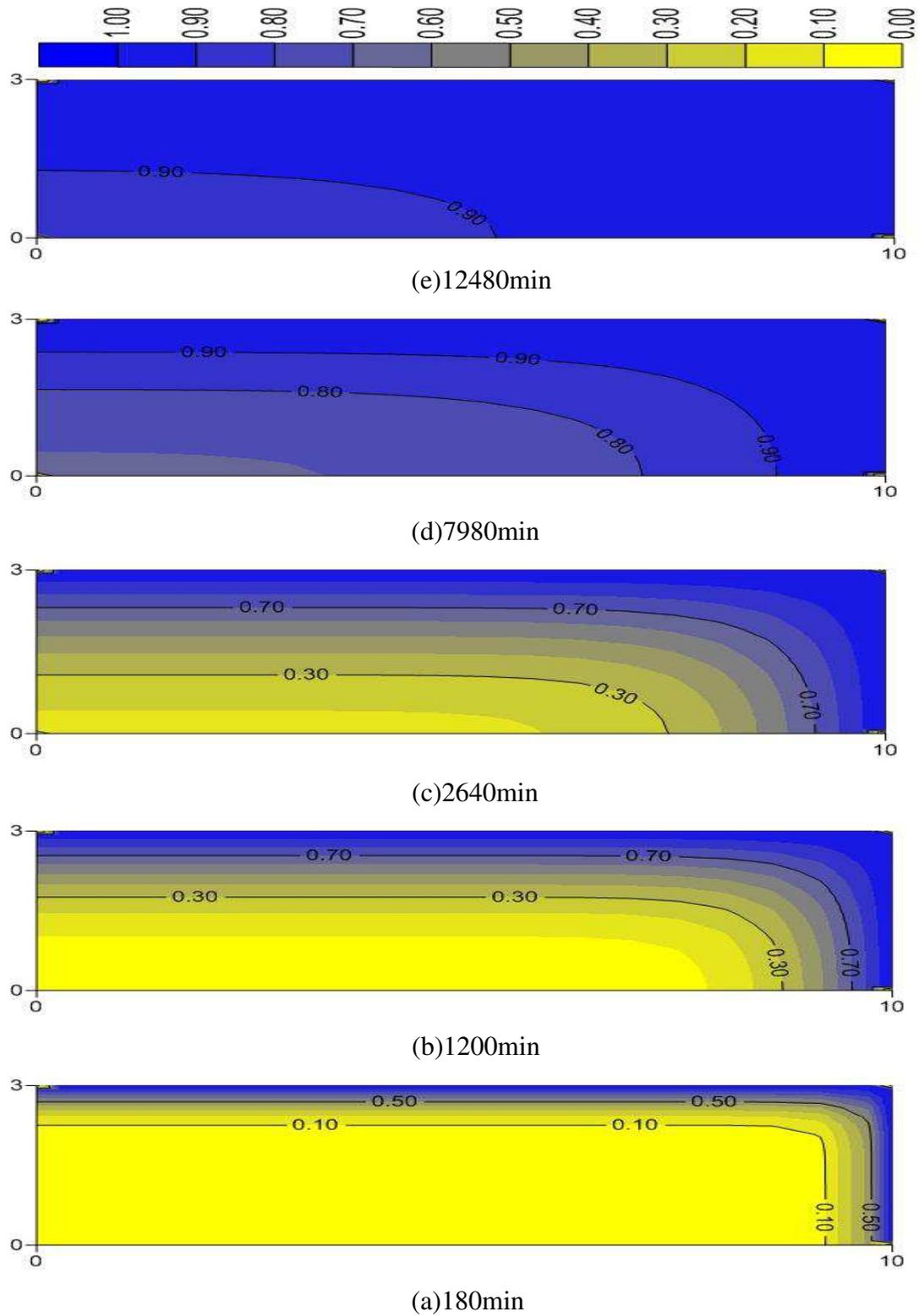
**Figura 4.21** – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito, com reforço de 30% de fibra de macambira, à temperatura de 25°C e espessura de 3 mm, no plano  $x^*=x/R=0,5$  em tempos variados



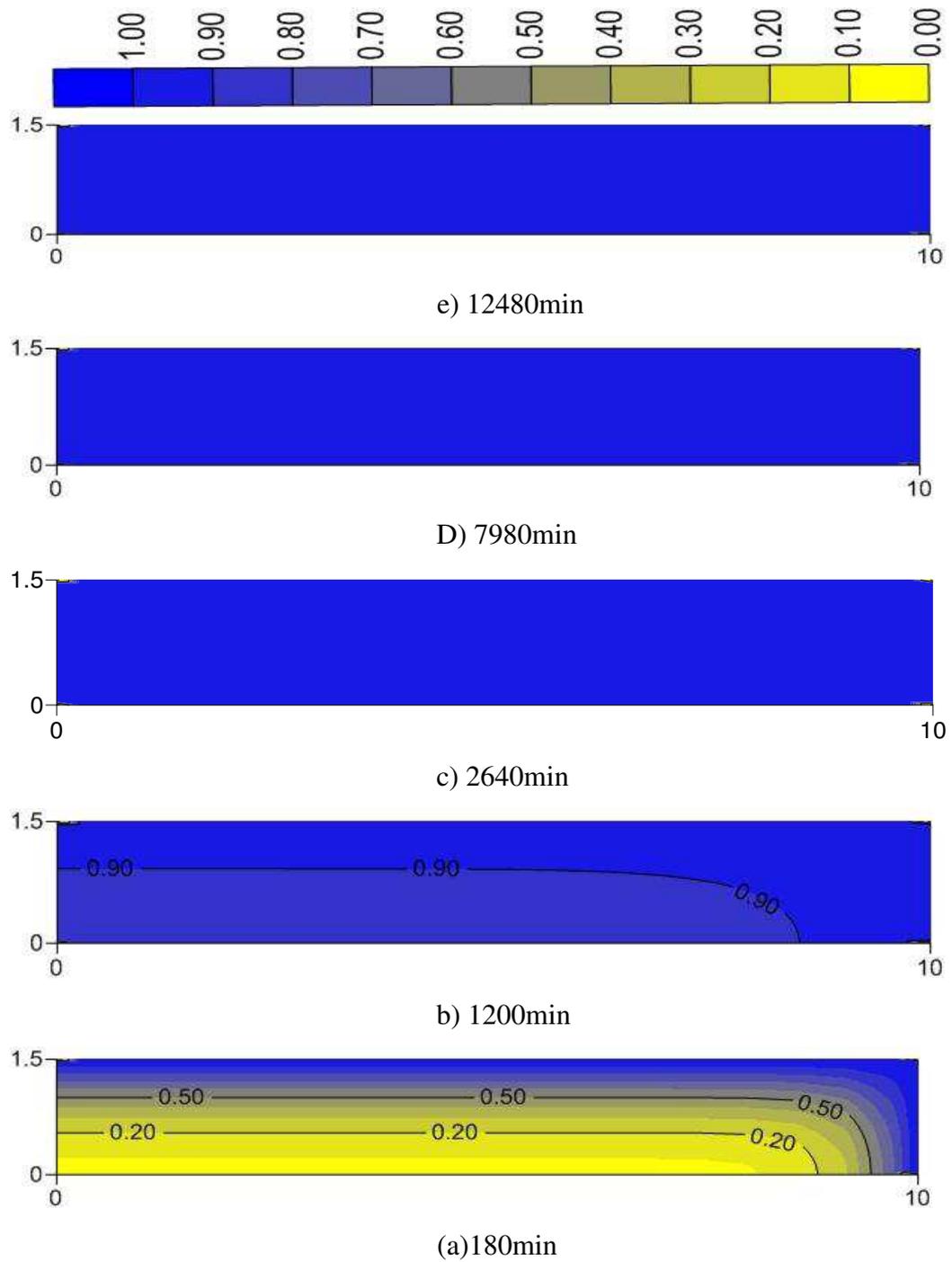
**Figura 4.22** – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito, com reforço de 30% de fibra de macambira, à temperatura de 25°C e espessura de 6 mm, no plano  $x^*=x/R=0,5$  em tempos variados.



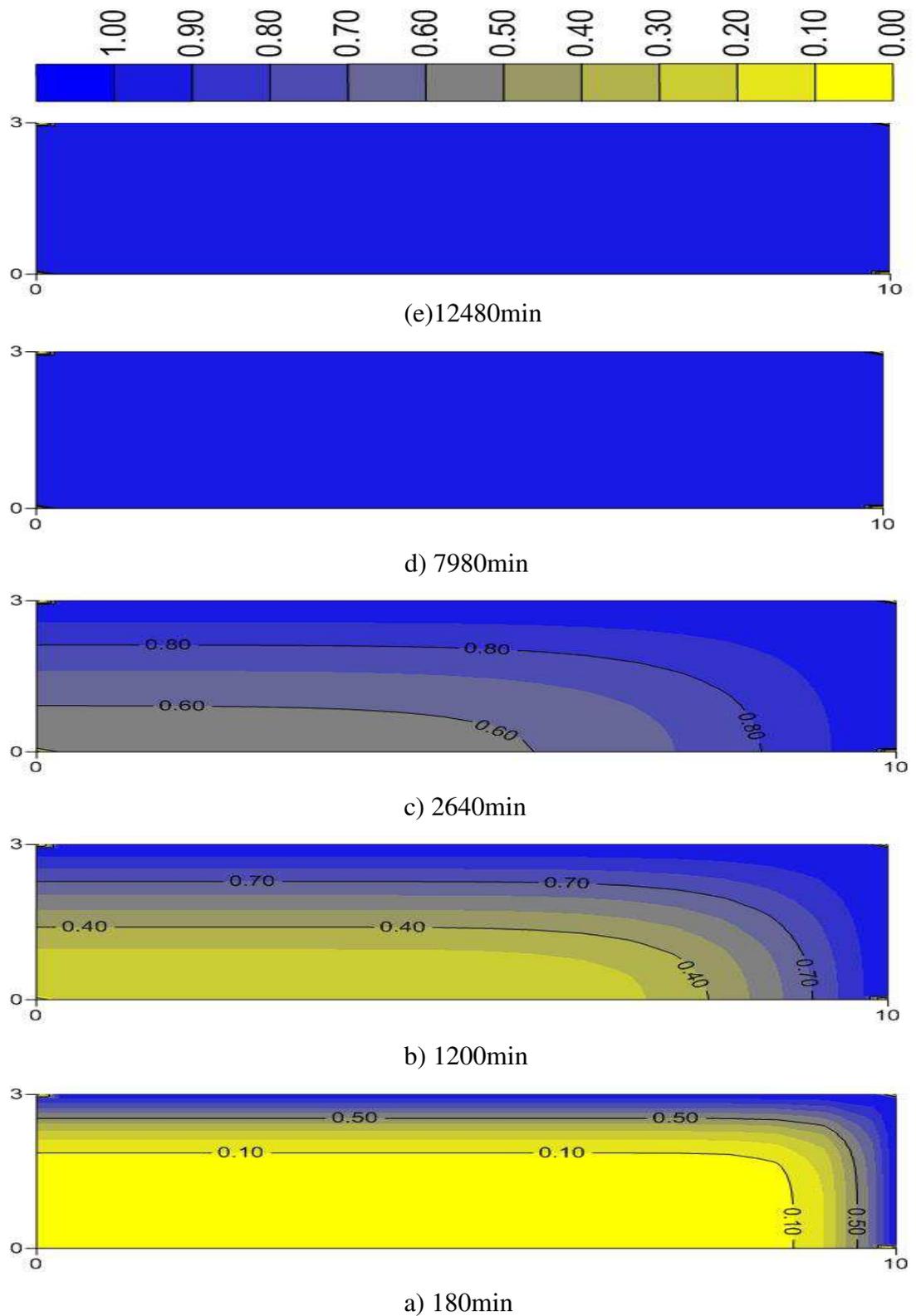
**Figura 4.23** – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito, com reforço de 30% de fibra de macambira à temperatura de 50°C e espessura de 3 mm, no plano  $x^*=x/R=0,5$  em tempos variados



**Figura 4.24** – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito, com reforço de 30% de fibra de macambira à temperatura de 50°C e espessura de 6 mm, no plano  $x^*=x/R=0,5$  em tempos variados.

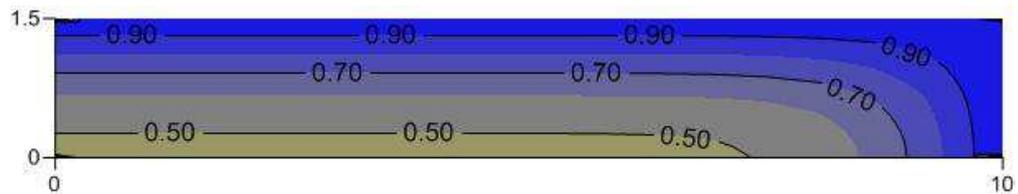


**Figura 4.25** – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito, com reforço de 30% de fibra de macambira à temperatura de 70°C e espessura de 3 mm, no plano  $x^*=x/R=0,5$  em tempos variados.

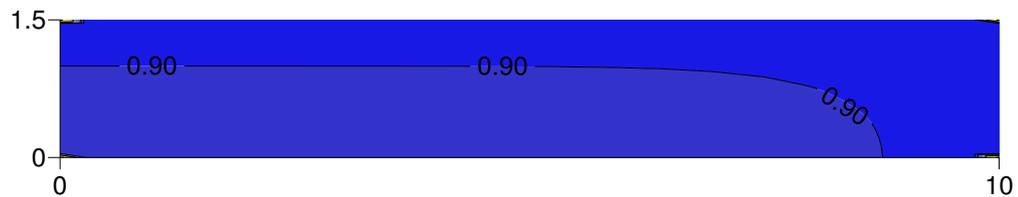


**Figura 4.26** – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito, com reforço de 30% de fibra de macambira à temperatura de 70°C e espessura de 6 mm, no plano  $x^*=x/R=0,5$  em tempos variados.

As Figuras 4.27 a 4.31 mostram a influência da temperatura no processo de sorção de água. Pode-se observar que 2640 minutos após o ensaio ter iniciado o gradiente de umidade em temperatura mais elevado é significativamente maior, em ambas as espessuras estudadas.



a) 25°C

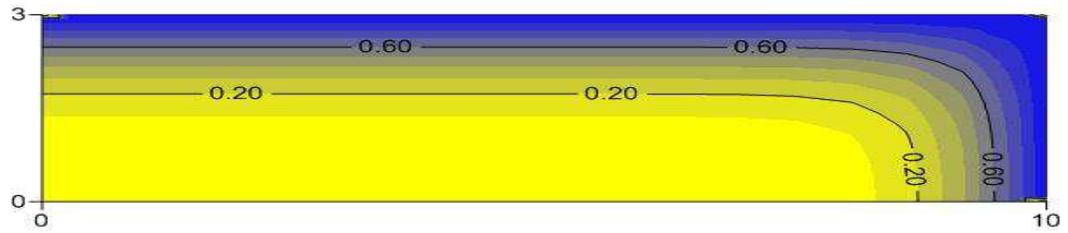


b) 50°C

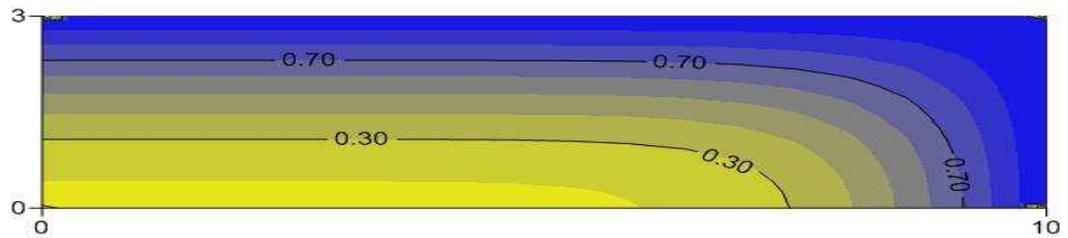


c) 70°C

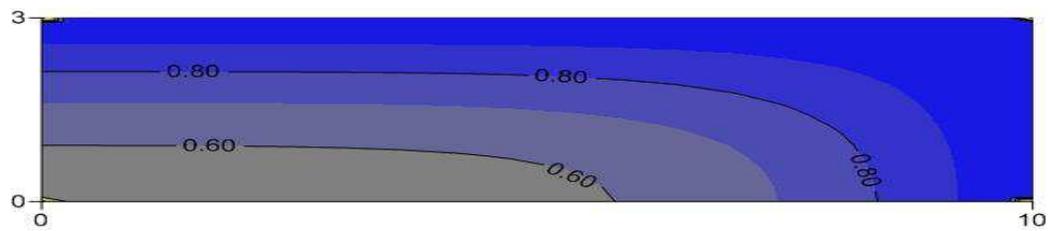
**Figura 4.27** – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito, com reforço de 30% de fibra de macambira nas temperaturas de 25, 50e 70°C na espessura de 3 mm, no plano  $x^*=x/R=0,5$  no tempo de 2640 minutos.



a) 25°C



b) 50°C

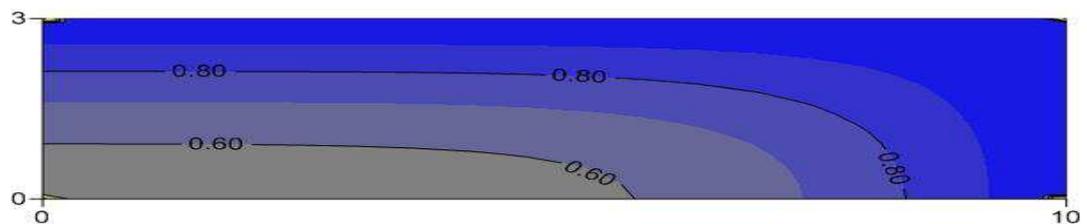


c) 70°C

**Figura 4.28** – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito, com reforço de 30% de fibra de macambira nas temperaturas de 25, 50e 70°C na espessura de 6 mm, no plano  $x^*=x/R=0,5$  no tempo de 2640 minutos.

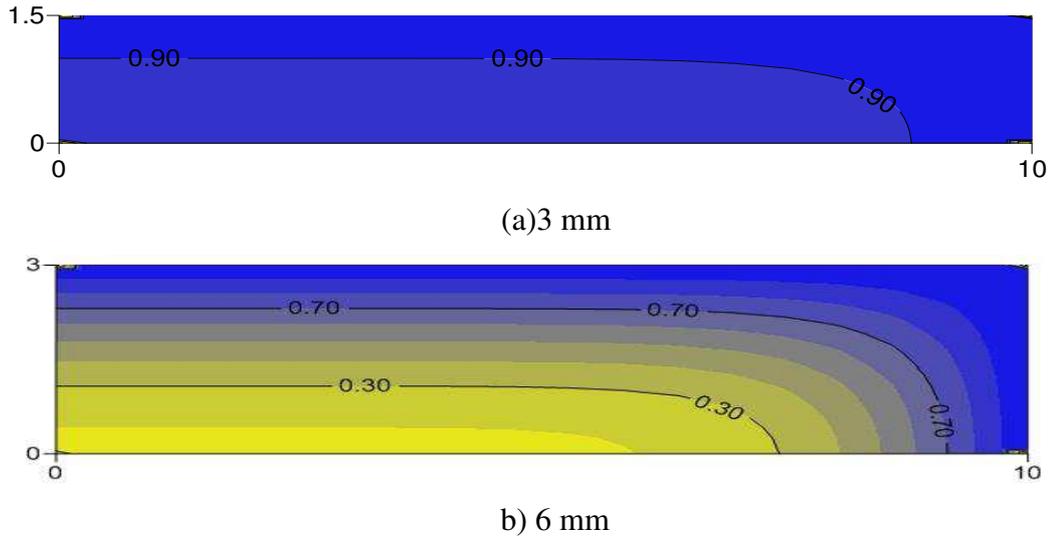


a) 3 mm

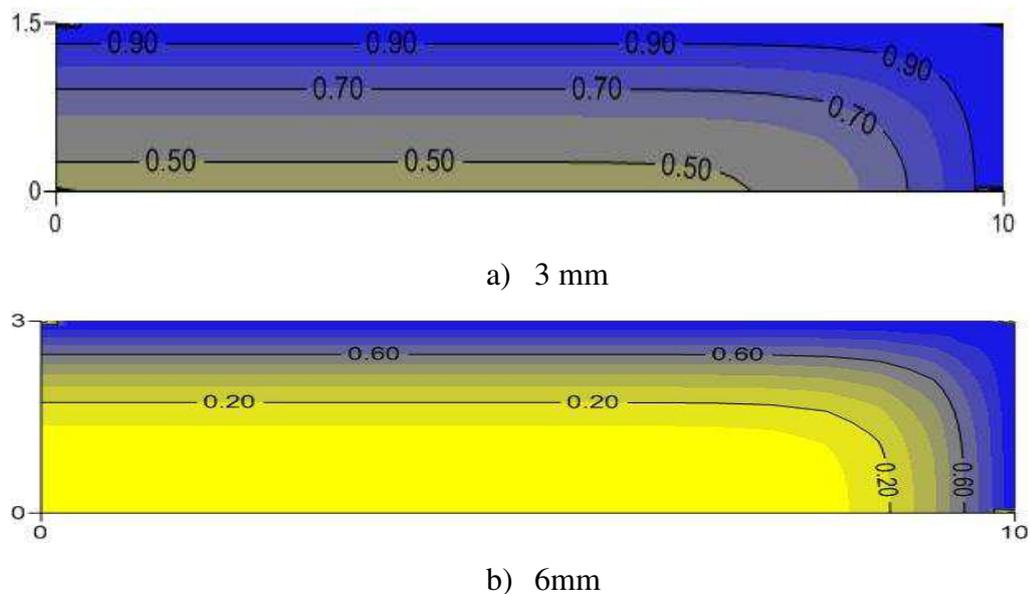


b) 6 mm

**Figura 4.29** – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito, com reforço de 30% de fibra de macambira na temperatura na 70°C nas espessuras de 3 e 6 mm no plano  $x^*=x/R=0,5$  no tempo de 2640 minutos.



**Figura 4.30** – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito, com reforço de 30% de fibra de macambira na temperatura na 50°C nas espessuras de 3 e 6 mm, no plano  $x^*=x/R=0,5$  no tempo de 2640 minutos.



**Figura 4.31** – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito, com reforço de 30% de fibra de macambira na temperatura na 25°C nas espessuras de 3 e 6 mm, no plano  $x^*=x/R=0,5$  no tempo de 2640 minutos.

#### 4.2.3- Estimativa do coeficiente de difusão da massa

O coeficiente de transporte de massa foi estimado através da minimização da soma dos quadrados dos resíduos. A Tabela 4.3 mostra os valores dos coeficientes de transporte de massa bem como o erro relativo associado a cada teste experimental obtido com o modelo numérico apresentado.

A Tabela 4.4 apresenta os dados obtidos do coeficiente de difusão e teores de umidade inicial e final dos compósitos. As Figuras 4.32 a 4.37 mostram o comportamento do coeficiente de difusão do compósito reforçado com 30% de fibras, nas espessuras de 3 e 6 mm, nas temperaturas de 25, 50 e 70°C.

Como esperado, todos os coeficientes de transporte de massa diminuíram com o tempo e conseqüentemente variam com o aumento do teor de umidade do material.

Neste sentido, decidiu-se ajustar a difusividade de massa como função do teor de umidade médio do material. A difusividade de massa em função desta variável gerou dados numéricos que se ajustaram muito bem aos resultados experimentais essencialmente melhor do que aqueles obtidos assumindo propriedades constantes, como são utilizados por outros pesquisadores.

**Tabela 4.4-** Parâmetros estimados pelo modelo numérico, erro, variância, tempo total de processos.

Amostra	N° de pontos		D <sub>o</sub> x10 <sup>+12</sup> (m <sup>2</sup> /s)	η	ERMQ	S <sup>2</sup> x10 <sup>-3</sup>	tempo total (h)
	Exp	Num					
3 mm 25°C	30	62	5,7	-1,32	0,128528	4,43	642
6 mm 25°C	26	61	2,9	2,0	0,191534	7,66	594
3 mm 50°C	31	63	11,2	-0,50	0,125459	4,18	687
6 mm 50°C	31	63	9,3	0,74	0,0513196	1,71	687
3 mm 70°C	20	54	25,1	-0,30	0,129065	6,79	384
6 mm 70°C	22	61	21,4	0,58	0,0262445	1,24	648

Sendo o coeficiente de difusão de massa fortemente influenciado pelos teores de umidade inicial, de equilíbrio e médio (atingidos nos vários tempos de umidificação), verificou-se que os valores de  $\eta$  obtidos foram coerentes com a difusividade de massa durante todo o processo de umidificação.

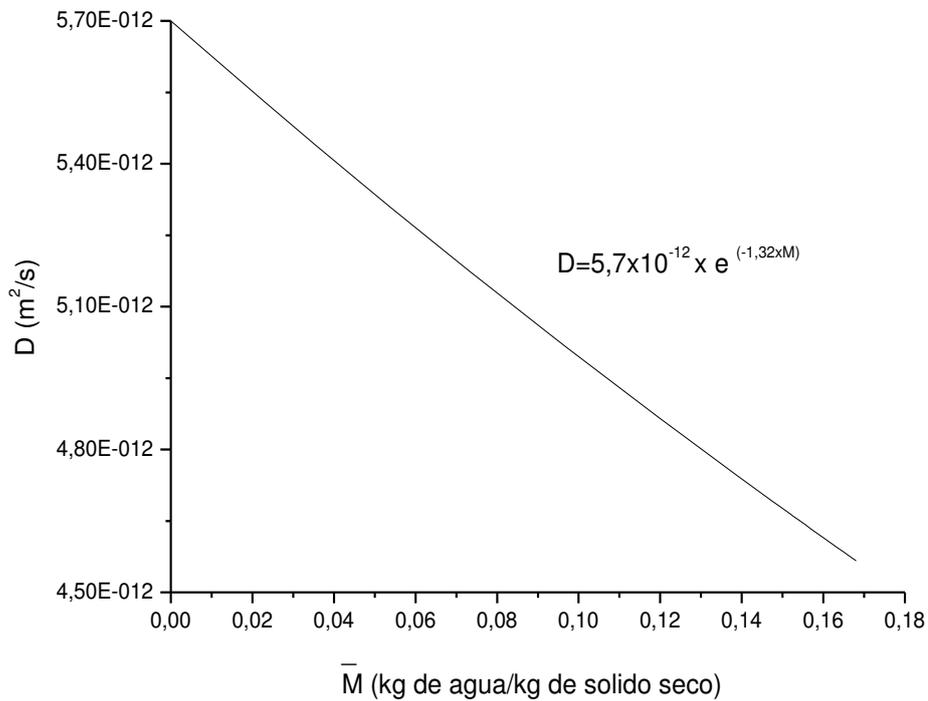
**Tabela 4.5** - Dados obtidos do coeficiente de difusão e teores de umidade inicial e final.

Amostra	Teor total de fibra (%) / T (°C)	$D_0 \times 10^{-12} - D_f \times 10^{-12}$ (m <sup>2</sup> /s)	Teor de umidade (kg de água/kg massa seca)
Macambira 3mm	30/25	5,7-4,45	0-0,16807
Macambira 6mm	30/25	2,9-2,20	0-0,14000
Macambira 3mm	30/50	11,2-10,30	0-0,17022
Macambira 6mm	30/50	9,3-8,25	0-0,15891
Macambira 3mm	30/70	25,1-23,8	0-0,18000
Macambira 6mm	30/70	21,4-19,5	0-0,16000

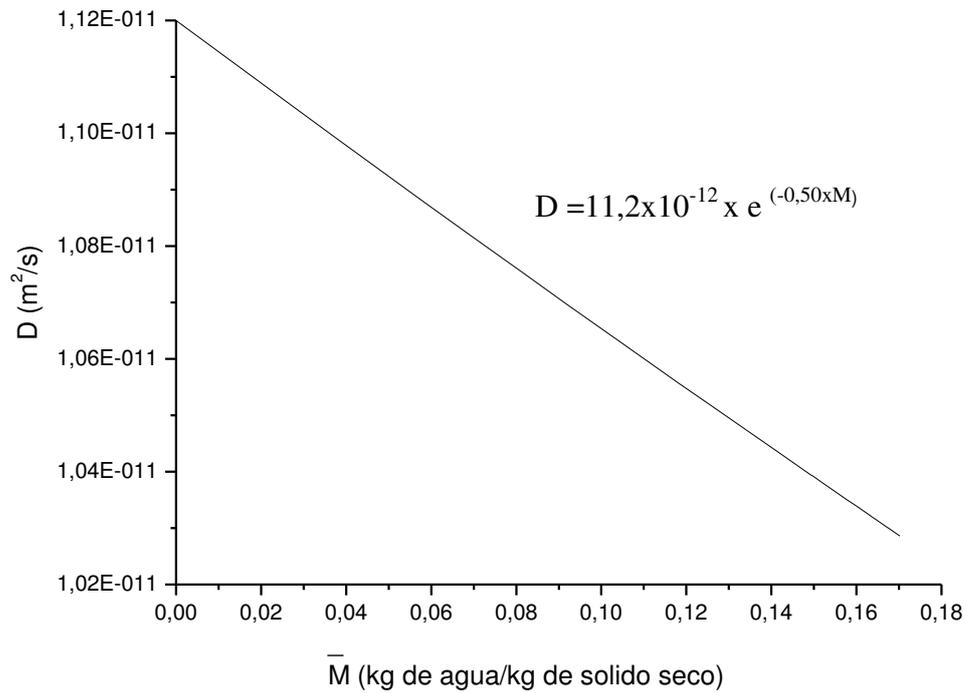
A comparação entre as difusividades de massa reportadas na literatura é muito difícil em virtude de diferentes métodos de estimação, variação da composição do sólido e sua estrutura física e química. De uma forma geral, é importante ressaltar que diferenças no coeficiente de difusão de massa podem ser atribuídas aos seguintes fatores (CAVALCANTI, 2006; LIMA, 1999):

- a) considerações geométricas diferentes;
- b) teores de umidade inicial e de equilíbrio diferentes;
- c) variação na estrutura física do material utilizado;

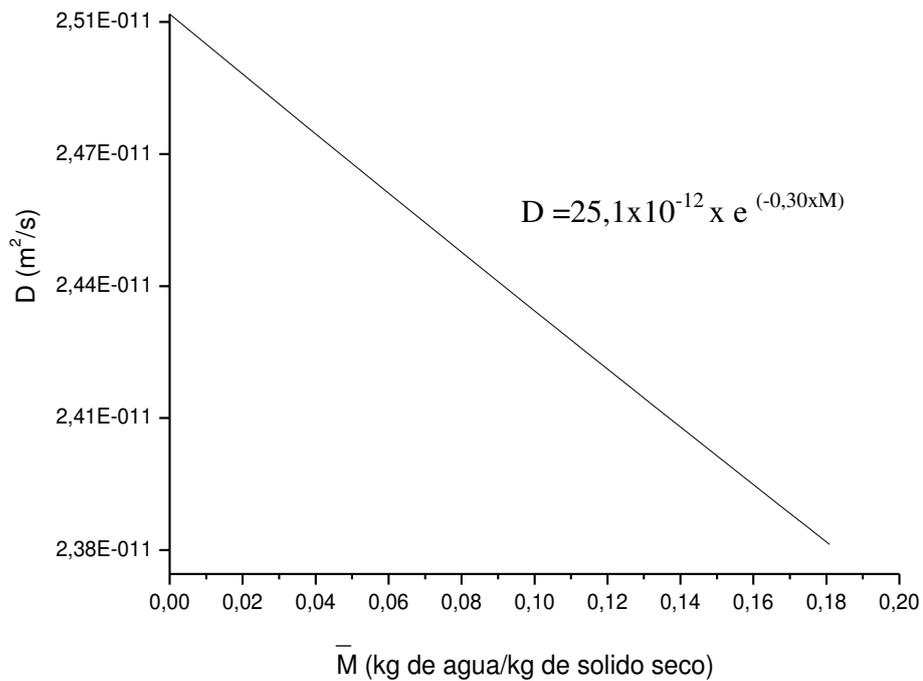
- d) porosidade do material;
- e) modificação da estrutura interna do material devido à expansão do produto durante a umidificação;
- f) dimensões das amostras;
- g) composição do material;
- h) teores de fibras higroscópicas presente e temperatura de trabalho;



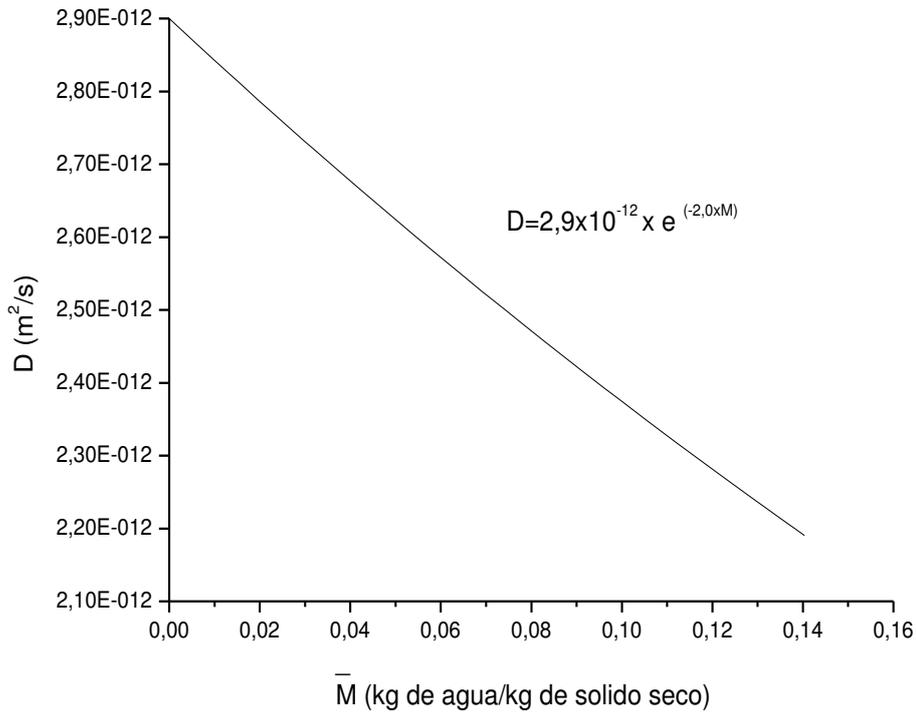
**Figura 4.32** – Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do compósito reforçado com 30% de fibras, 3 mm de espessura e temperatura de 25°C.



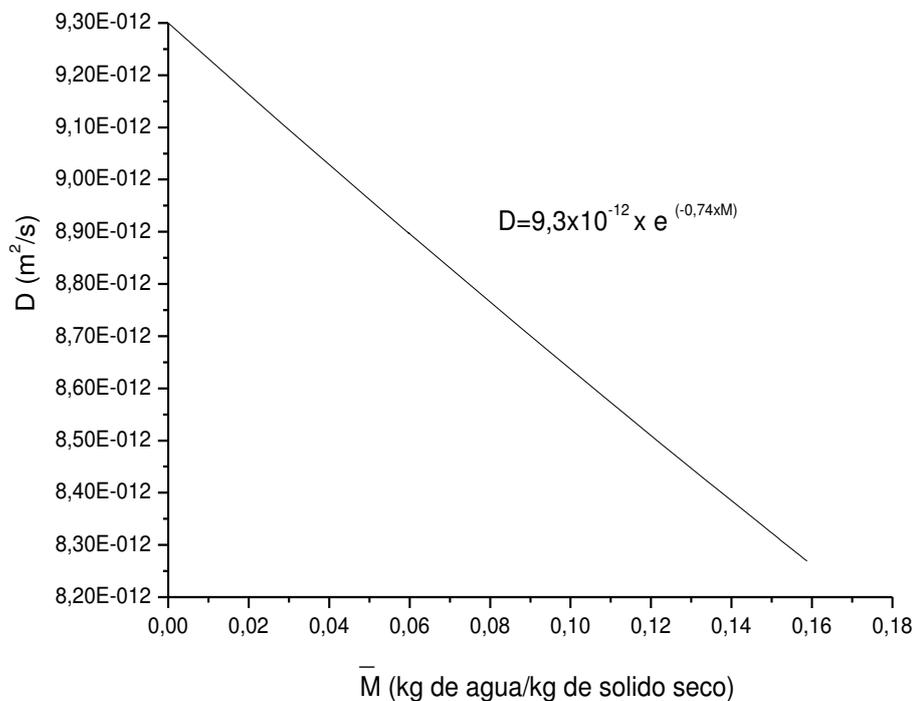
**Figura 4.33** – Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do compósito reforçado com 30% de fibras, 3 mm de espessura e temperatura de 50°C.



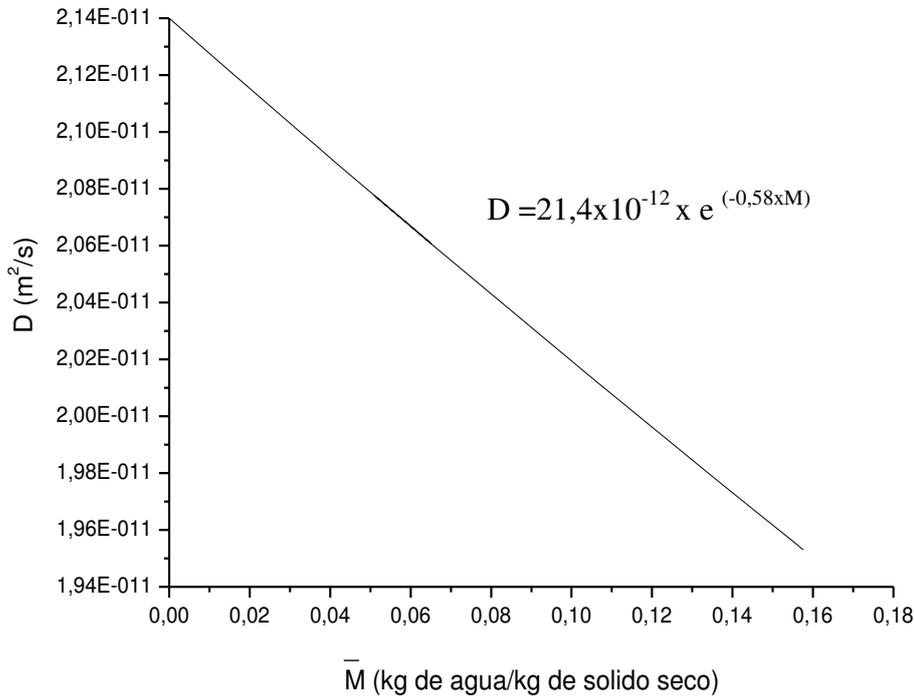
**Figura 4.34** – Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do compósito reforçado com 30% de fibras, 3 mm de espessura e temperatura de 70°C.



**Figura 4.35** – Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do composto reforçado com 30% de fibras, 6mm de espessura e temperatura de 25°C.



**Figura 4.36**– Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do composto reforçado com 30% de fibras, 6mm de espessura e temperatura de 50°C.



**Figura 4.37** – Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do compósito reforçado com 30% de fibras, 6 mm de espessura e temperatura de 70°C.

Baseando-se nos resultados obtidos, verifica-se que o coeficiente de difusão decresce com o aumento do teor de umidade e cresce com o aumento da temperatura, sendo assim propõe-se a seguinte equação para este parâmetro.

$$D = A_4 \exp(-A_5 M^*) \exp[-A_6 / (T + 273)] \quad (3.23)$$

Para determinar os parâmetros \$A\_4\$, \$A\_5\$ e \$A\_6\$ na equação (3.23) tomou-se por base o conjunto de dados contido nas Tabelas 4.6.

A estimação não linear dos parâmetros da Equação (3.23) foi realizada utilizando um software estatística o método numérico de e quasi-Newton, com critério de convergência de 0,0001. (NASCIMENTO, 2002; CAVALCANTI, 2006).

**Tabela 4.6** – Coeficiente de difusão em função do teor de umidade e temperatura para o compósito com 3 e 6mm de espessura.

$\bar{M}^*$ (kg/kg)	T(°C)	$D \times 10^{+12}$ (m <sup>2</sup> /s)	$\bar{M}$ (Kg/Kg)	T(°C)	$D \times 10^{+12}$ (m <sup>2</sup> /s)
Macambira 3mm			Macambira 6mm		
0	25	5,700	0	25	2,900
0,02	25	5,551	0,02	25	2,786
0,04	25	5,406	0,04	25	2,677
0,06	25	5,265	0,06	25	2,572
0,09	25	5,061	0,09	25	2,422
0,12	25	4,864	0,12	25	2,281
0,13	25	4,801	0,13	25	2,236
0,15	25	4,676	0,15	25	2,148
0,16	25	4,614	0,16	25	2,105
0,18	25	4,494	0,18	25	2,023
0	50	11,20	0	50	9,300
0,02	50	11,08	0,02	50	9,163
0,04	50	10,97	0,04	50	9,028
0,06	50	10,86	0,06	50	8,896
0,09	50	10,70	0,09	50	8,700
0,12	50	10,54	0,12	50	8,509
0,13	50	10,49	0,13	50	8,447
0,15	50	10,39	0,15	50	8,322
0,16	50	10,33	0,16	50	8,261
0,18	50	10,23	0,18	50	8,140
0	70	25,10	0	70	21,40
0,02	70	24,94	0,02	70	21,15
0,04	70	24,80	0,04	70	20,90
0,06	70	24,65	0,06	70	20,66
0,09	70	24,43	0,09	70	20,31
0,12	70	24,21	0,12	70	19,96
0,13	70	24,13	0,13	70	19,84
0,15	70	23,99	0,15	70	19,61
0,16	70	23,92	0,16	70	19,50
0,18	70	23,78	0,18	70	19,27

**Tabela 4.7**– Parâmetros da Equação (3.23) ajustados aos dados experimentais

Parâmetros					
Amostras	$A_{4 \times 10^{12}}$	$A_5$	$A_6$	$S^2$	R
Macambira 3mm	35711433	0,365064	4071,409	0,694872	0,99982
Macambira 6mm	21732640	0,621943	4742,432	0,02032	0,99491

A Tabela 4.7 apresenta os valores dos parâmetros obtidos bem como os coeficientes de correlação para todos os testes realizados. É evidenciada, a excelente concordância entre os pontos preditos e experimentais caracterizados pelo coeficiente de correlação e variância encontrado.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

#### 5.1 – Conclusões

Foram confeccionados compósitos como reforço com fibras de Macambira em matriz poliéster insaturado

As propriedades de sorção de água deste compósito foram testadas para uma composição de 30% de reforço, em massa nas temperaturas de 25, 50 e 70°C, e foi apresentada uma modelagem matemática tridimensional transiente para prever a transferência de massa durante a absorção de água.

- A morfologia das fibras de Macambira mostrou características típicas de fibras vegetais;
- A cinética de sorção de água nos compósitos reforçados com fibras de Macambira mostrou ser influenciada pela relação área/volume. Pôde-se observar que em tempos curtos, aproximadamente 50 horas, os corpos com menor relação apresentam uma maior velocidade de sorção. Em tempos longos os compósitos com maior relação área/volume apresentam maiores teores de sorção de água;
- O teor de umidade de equilíbrio (saturado em água) dos compósitos com 30% de fibras de Macambira apresentaram valores de 12,5% a 25°C e 19,1% a 70°C, para as espessuras de 3 e 6 mm, respectivamente.
- A cinética de sorção de água é fortemente influenciada pela temperatura, sendo mais acentuada em temperaturas mais elevadas;
- A proposta de ajustar uma equação exponencial com 3 termos e 6 parâmetros (equação 3.22) aos dados experimentais foi satisfatória, apresentando coeficiente de correlação superior a 99% em todos os casos testados.

- A modelagem matemática utilizada para a obtenção da solução numérica de sorção de água em compósitos de poliéster insaturado reforçados por fibras de Macambira de 20,00 x 20,00 mm e espessura 3 e 6mm foi adequada;
- 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;
- Os gradientes de umidade são maiores nos planos superficiais e nos vértices do sólido, que estão em contato diretos com a água;
- O coeficiente de difusão do compósito com 30% de fibra de Macambira mostrou-se ser dependente do teor de umidade e da temperatura para espessura de 3 e 6mm.

## **5.2 – Sugestões para futuros trabalhos**

- Aplicar os modelos apresentados neste trabalho à umidificação de outros sistemas;
- 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;
- Estudar o efeito da variação de espessura dos corpos-de-prova na sorção de água, aplicando a modelagem e simulação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLA, A. B. R.; MOHD, S. S.; KHALINA, A.; MEGAT, M. H. Water absorption behavior of kenaf reinforced unstured polyester composites and influence or their mechanical proprertesj. **Sc&Technol.** v.18, p. 433-444, 2010.

ANDRADE, E. C.; NOBREGA, M. M. S. Compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras de babaçu. In. ORRBIGNYASPECIOSA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA. **Anais do10º congresso brasileiro de polímeros.** Foz do Iguaçu, 2009. p. 16-29.

ANDREOPOULOS, A. G.; TARANTILI, P. A. Water sorption characteristics of epóxi resin – UHMPE fibers composites.**JournalAppliedPolymer Science** v.70, n. 4 p. 747-755, oct1998.

ASHBY, Michel F.; DAVID R. H. J. **Engenharia de materiais:** uma introdução, aplicação e projeto. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007, p. 285-286,1998. v. 2.

BARRETO. A. C. H.; ROSA, D. S.; MAZZETO, S. E. Properties of sisal treated by alkal; solution and their application intoCandanol – bared biocomposites . **Composites Part A:** applied science and manufacturing, v. 42,n. 5 p. 492-500, may, 2010.

BATISTELA, F. A. **Célula Vegetal.** Disponívelem: <<http://www.portalsaofrancisco.com.br>>. Acessoem: 15 junho 2009.

BLEDZKI A. K.; GASSAN, J. Composite reinforced with cellulose based fiber.**Progress in Polymer Science**, Pittsburgh. U.S.A. v. 24, p.221-274, 1999.

BRYDSON, J. A. **Plastics materials:** Butterworth-Heinemann, 7ª Ed. London, UK, 1999.

CALLISTER JUNIOR, W. D. **Materials science and Engineering:** an introduction, 6.ed. Nova Jersey, U.S.A: John Wiley & Sons, 2003.

CARVALHO, L. H.; CAVALCANTI, W. 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. Propriedades de compósitos poliéster/ fibra da folha do abacaxi. In: CONGRESSO EM CIÊNCIA DE MATERIAIS DO MERCOSUL, 2., 2004, Joinville. **Anais do Sulmat**, 2004. v. 1.

CASTRO, Neusa Maria de. **Parede Celular.** Disponível em: <<http://www.anatomiavegetal.ib.ufu.br>>. Acesso em: 15 junho 2001.

CAVALCANTI, W. S.; CARVALHO, L. H.; LIMA, A .G. B. Sorção de água em compósitos poliéster Insaturado reforçados com tecido de juta-vidro: modelagem e simulação e experimentação polímero. **Ciência e tecnologia**, v.20, n. 1, p.78-83, 2010.

CAVALCANTI, W. S. **Compósitos poliéster/tecidos tramados vegetal-vidro:** caracterização mecânica e simulação da sorção de água. 2006. 122f. Tese (Doutorado em

Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 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. et al. Sorção de água de compósito poliéster insaturado reforçados por tecido de juta e tecido híbrido juta/vidro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 16., 2004. Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFSCAR, 2004.

CHEREMISINOFF, Nicholas P. **Advanced polymer processing operations**. Noyes Publications. New Jersey: [s.n.], 1998.

COTTA, R. M. **Integral transform in computational heat and flow**. Boca Raton: CRC Press, 1993.

CRAWFORD, R. J. **Plastics engineering**. 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999.

CUNDURÚ, Marise T.; PEREIRA, José A. R. **Elaboração de trabalhos acadêmicos**. 2. ed. Belém: UFPA, 2006.

D'ALMEIDA, M. L. O. O. **Tecnologia da fabricação da pasta celulósica**. São Paulo SENAI, 1981. v. 1.

D'ALMEIDA, J. R. M. Propriedades mecânicas de fibras de juta. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 39, n. 4, p. 1025-1032, Abril, 1987.

D'ALMEIDA, A. L. F. S.; CARVALHO, L. H.; D'ALMEIDA, J. R. M. Characterization of caroá (Neoglaziaviariegata) fibers. WORLD POLYMER CONGRESS, 41., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro – Brasil, 2006.

DA ROSA, C. C.; MOREIRA, D. D. C.; BILCATI, G. K. Estudos das propriedades físicas da fibra de curauá. CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA, 2012, Belém-PA. **Anais...** Belém-PA, 2012, p.1-8.

SILVA, R. V. da. et al. Desenvolvimento de um compósito laminado híbrido com fibras natural e sintética. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 13, n.1, p. 154-161, 2008.

DANTAS, C. M.; FREIRE JUNIOR, R. C. S.; AQUINO, E. M. Influência da proteção lateral na absorção de água e nas propriedades mecânicas de um compósito a base de fibra de juta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 20., 2007, Natal. **Anais...** Natal: UFRN, 2007. p.1-8.

DEBIAGI, F. et al. Efeito de fibras vegetais nas propriedades de compósitos biodegradáveis de amido de mandioca produzido via extrusão. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras v.34, p.1522-1529, 2010.

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

FIGLIOLA, R. S.; BEASLEY, D. E. **Theory and design for mechanical measurements**. New York: John Wiley & Sons, 1995, 607p.

FLINN, R.; TROJAN, P. **Engineering materials and their applications**. Boston: HoughtonMifflinCompany, 1981.

FURASTÉ, P, A. **Normas técnicas para o trabalho científico**. 11. ed. Porto alegre: Dáctilo Plus, 2002.

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, mar. 2002.

GOWDA, T. M.; NAIDU, A. C. B.; CHHAYA, R. Some mechanical properties of untreated jute Fabric: reinforced polyester composites, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 30, n. 3, p. 277 – 248, mar. 1999.

GOODMAN, S.H. **Handbook of thermoset plastics**. New Jersey: NoyesPublications, 1998.

HAGE, JUNIOR, E. **Compósitos e blendas poliméricas de médio desempenho**. Campinas, Instituto Latino Americano e IBM, 1989.

HULL, D.; CLYNE, T. W. **An Introduction to composite materials cambridge Solid State Science Series**. 2.ed, [S. l.]: Cambridge, 1996.

IDRISS ALI, K. M..Improvement of jute through ultraviolet-cured film of urethane acrylate, **Journal of Applied Polymer Science**, v.54, p. 303-308, 1994.

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

JOSEPH, K.; CARVALHO, L. H. Propriedades de compósitos poliéster Insaturado/tecido híbrido de juta – algodão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 5., 1999, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 1999. p. 834-839,

LARANJEIRA, E.; CARVALHO, L. H. Compósito poliéster fibras unidirecionais de juta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2002, Natal. **Anais...** Natal, 2002. p. 1637-1643.

LARANJEIRA, E. **Propriedades de compósitos poliéster / juta. influência da adição de carga mineral nanoparticulada e sistema antichama**. 2004. 159f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2004.

LIMA, A. G. B. **Fenômeno de difusão em sólido esferoidaisprolatos. Estudo de caso:** Secagem de banana. Campinas, 1999, 239 f. Tese de Doutorado – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

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. CONGRESSO ANUAL DA ABM, 62., Vitória, ES, **Anais...** Vitória,ES,2007. p. 861-870.

LOPES, F. F. M.; Efeito dos tratamentos superficiais na redução da absorção de água nas fibras de sisal. **Revista Educação Agrícola Superior**, Brasília, v. 23, n.1, p. 80-85, 2008.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional.** Rio de Janeiro, 424p 2004.

MARTINS, G. S. 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 material: engineering and science.** London: Chapman & Hall, 1994.

MEDEIROS, E. S. et al. Eving behavior of a novolac type resin analyses by differential scanning calorimetry. **Journal Applied Polymer Science**, v. 90, n. 6, p.1678, 2003.

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

MOHANTY, A. K.; MISRA, M. Studies on jute composites: A Literature Review. **Polymer Plastic Technology and 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**, v. 14, n. 4, p. 274-278, 2004.

MARCOVICH, N. E. et al. Moisture diffusion in polyester: wood flour composites. **Polymer Plastic Technology and Engineering**, v. 40, p. 7313-7320, 1999.

MINKOWYCZ, W. J. **Handbook of numerical heat transfer.**New York: John Wiley& Sons, 1988. 1024 p..

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.

MARINELLI, L. A.; MONTEIRO, M. R.; AMBROSIO, J. L. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade da Amazônica. **Polímeros: ciência e tecnologia**, v.18, n.2, p.92-99, 2008.

MONTEIRO, S. N.; LOPES, F. P. D. Ensaio em compósitos poliméricos reforçados com Fibras. CONGRESSO ANUAL DA ABM, 62., Vitória. **Anais...** Vitória, 2007. P. 871-879.

MONTEIRO, S. N.; RANGEL, J. J. A. Efeito da micromorfologia das fibras de Carauá com reforço em compósitos de matriz polimérica. CONGRESSO ANUAL DA ABM, Vitória. **Anais...**, Vitória, 2007. p. 748-756.

NÓBREGA, M. M. S. Waterabsorption in unsaturadepolyésterCompositesreinforcedwith caroá fibrefabrics: modelingandsimulation. **Material wissenschaftundwerkstofftechnik**. v. 41, n. 5, p. 300-305, 2010.

NÓBREGA, M. M. S. **Compósitos de matriz poliéster com fibras de caroá neoglaziaviariegata**: caracterização mecânica e sorção de água. 2007. 123f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Centro de Ciências e Tecnologia - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB.

NÓBREGA, M. M. S. 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. CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 8., Águas de Lindóia-SP, 2005. **Anais...** Águas de Lindóia, SP, 2005. p.1231-1232.

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

PAIVA, J. M. F.; FROLLINI, E. Matriz termofixa fenólica em compósitos reforçados com fibras de bagaço de cana-de-açúcar. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.9, n.2, p. 78-87. 1999.

PATANKAR, S. V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. New York: Hemisphere Publish. Coop, 1980. 197p,

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. 5, 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.

PETERS. S. T. **Handbook of composites**. England: Chapman & Hall, 1998.

PINTO, M. R. O. **Desenvolvimento de compósitos à base de poliuretano derivado do óleo de Mamona, Sisal e Bentonita**. 2004. 165f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) Universidade federal de Campina Grande, Campina Grande-PB.

KAW, A. K. **Mechanics composite materials**. 2. ed. New York: Taylor & Francis Group, LLC, 2006.

KUMOSA, L. et al. Moisture absorption properties of unidirectional glass/polymer composites used in composite (non ceramic) insulators. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 35, p. 1049-1063, 2004.

RAMIREZ, M. G. L. Study of the properties of composites. Part 1: cassava starch-green hair fibers from Brazil. **Carbohydrate Polymers**, v. 86, p. 1712-1722, 2011.

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. CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 8., 2005, Águas de Lindóia, SP. **Anais...** Águas de Lindóia-SP, 2005. p.1186-1187.

RICHARDSON, H. **Polymer engineering composites**. London: Applied Science Publishers, 1997.

ROUISON, D. Water absorption of hemp fiber/unsaturated polyester composites. **Polymer Composites**, v. 26, n. 4, p. 509-525, 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, p. 4069-4079, 1981.

ROWELL, R. M. et al. Utilization of natural fibers in plastic composites: Problems and opportunities, INTERNATIONAL LIGNOCELLULOSICS PLASTICS COMPOSITES, I., 1996, São Paulo. **Anais**. São Paulo, 1996. p. 23-51.

SEMSARZADEH, M. A.; AMIRI, D. Binder for jute: reinforced unsaturated polyester resin, **Polymer Engineering and Science**, v. 25, n. 7 p. 618-619, apr, 1995.

SILVA, R. V. et al. Desenvolvimento de um compósito laminado híbrido com fibras natural e sintética. CONGRESSO ANUAL DA ABM, 62., 2007, Vitória. **Anais...** Vitória, 2007. p. 613-620.

SILVA, R. V.; FROLLINI, E. Propriedades de compósitos de matriz termorrígida fenólica reforçada com material de origem natural. CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 8., 2005, Águas de Lindóia-SP. **Anais...** Águas de Lindóia-SP, 2005. Paginação Irregular.

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. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005.

SHIH, T. **Numerical heat transfer**. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1984, 536p.

SONI, R. P.; SONI, M. Studies on natural fibre reinforced phenolic composites. **Journal of Scientific & Industrial Research**, v. 58, n. 1, p. 34 – 36, 1999.

STAAB, G. H. **Laminar Composites**. Wobum, USA: Butterworth, 1999.

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. 6 p. 763 – 777, jun 2002.

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

SUDDLELL, B. C. Survey into the application of natural fibre composites in the automotive industry. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NATURAL POLYMER AND COMPOSITES. 2002, São Carlos. **Anais...** São Carlos, 2002. p. 455 – 460.

TANG, X. Micromechanics modeling of moisture diffusion in woven composites. **Composites Science and Technology**, v. 65, n. 6 p. 817-826, may 2005.

TANOBE, V. O. A. Caracterização de compósitos de matriz poliéster por fibras de Luffa cilíndrica. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO. 2., 2003. Uberlândia-MG. **Anais...** 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, jan 2002.

VAINSENER, Semira Adler. **Macambira**. Fundação Joaquim Nabuco, Recife. Disponível em: <<http://basilio.fundaj.gov.br/pesquisaescolar/>>. Acesso em: 12/ 07/2009.

WAMBUA, P. IVNS 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.

WAN, Y. Z. Moisture sorption and mechanical degradation of VART Med three-dimensional braided carbon-epoxy composites. **Composites Science and Technology**, v.65, n. 7-8, p. 1237-1243, jun 2005.

WANG, W. Study of moisture absorption in natural fiber plastic composites. **Composites Science and Technology**, v. 66, n.3-4 p. 379-386, mar, 2005.

WHITAKER, S. **Heat and mass transfer in granular porous media, Chapter Two, In Advances in Drying**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980. v.1.

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

ZARDO, C. L.; JUNIOR PADILHA E. J. Comportamento mecânico de compósitos de polipropileno e fibras de bananeira: influência do teor de fibra. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 5,n.1, p.10-16, 2010.