



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

TESE DE DOUTORADO

**COMPÓSITOS POLIÉSTER/TECIDOS TRAMADOS VEGETAL-
VIDRO: CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E SIMULAÇÃO DA
SORÇÃO DE ÁGUA**

WILMA SALES CAVALCANTI

Campina Grande-Paraíba

Março-2006

COMPÓSITOS POLIÉSTER/TECIDOS TRAMADOS VEGETAL- VIDRO: CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E SIMULAÇÃO DA SORÇÃO DE ÁGUA

Wilma Sales Cavalcanti

Tese de Doutorado submetida e apresentada à coordenação do Curso de Doutorado em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Processos.

Área de Concentração: Engenharia de Materiais

Prof^a.Dr^a. Laura Hecker de Carvalho

Orientadora

Prof^o.Dr^o. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil

Março-2006

DEDICATÓRIA

**A DEUS
A MEUS PAIS
A MEU FILHO
A MEUS IRMÃOS**

AGRADECIMENTOS

A DEUS por me proteger, me guiar e me dar forças para vencer todos os obstáculos.

A prof^ª Dr^ª. Laura Hecker de Carvalho, pela orientação, dedicação, conhecimentos transmitidos, apoio e amizade.

Ao Prof^º Dr^º. Antonio Gilson Barbosa de Lima, pela orientação, dedicação, conhecimentos transmitidos, apoio e amizade.

Ao Prof^º Dr^º. Jefferson Nascimento, pela grande contribuição prestada ao meu trabalho.

A prof^ª Dr^ª Odelsia L. Sánchez de Alsina, pela contribuição, compreensão e dedicação prestada.

Ao Prof^º Dr^º. Roberto d`Almeida, pelas contribuições prestada aos nossos trabalhos.

Aos meus pais, Wilson Cavalcanti de Albuquerque (*in memoriam*) e Marina Sales Cavalcanti, pelo amor, compreensão e colaboração durante este período.

Aos meus irmãos, pelo apoio e colaboração.

Aos meus colegas do Doutorado: Elba, Edilane, Daniela, Divanira, Fabiana, Florêncio, Francinaldo, Joelma, Joselito, Lizzandra, Múcio, Pedro Ronaldo, Renata Barbosa, Roberta, Vital em fim a todos os colegas que convivi durante este período, muitíssimo obrigado pelo apoio, incentivo e amizade.

Aos professores do Departamento de Engenharia Química e de Engenharia de Materiais e Engenharia Mecânica pela amizade e apoio.

A coordenação de Pós-Graduação em Engenharia de Processo.

Aos colegas do laboratório de controle de qualidade - LCQ, SENAI – Albano Franco, pela amizade e compreensão.

A todos os que contribuíram direta e indiretamente para a realização desta pesquisa, principalmente a Roberto e Jaqueline pelo apoio técnico ao meu computador.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xv
NOMECLATURA.....	xvi
RESUMO.....	xix
ABSTRACT.....	xx
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO II.....	4
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA GERAL.....	4
2.1 Considerações Gerais.....	4
2.2 Compósitos.....	5
2.2.1 Classificação dos compósitos.....	5
2.3 Reforço.....	6
2.4 Matriz Polimérica.....	8
2.5 Resina Poliéster.....	9
2.5.1 Estrutura do Poliéster Insaturado.....	10
2.5.2 Poliéster Ortoftálico.....	10
2.5.3 Características básicas e aplicações da resina poliéster	11
2.5.4 cura de resina poliéster.....	12
2.6 Interface Matriz-Fibra.....	13
2.6.1 Características da Interface Matriz-Reforço.....	13
2.7 Processos de Fabricação de compósitos.....	15

CAPÍTULO III	17
3.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ESPECÍFICA	17
3.1 Fibras Naturais Vegetais.....	17
3.1.1 Fibras de Juta.....	19
3.1.3 Fibras de Vidro.....	20
3.1.5 Propriedades Mecânicas das Fibras de Juta e Vidro.....	21
CAPÍTULO IV	33
4.0 MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1 Materiais.....	33
4.1.1 Materiais poliméricos.....	33
4.1.2 Reforço.....	33
4.2 Método.....	34
4.2.1 Preparação dos laminados.....	34
4.2.2 Teor de fibra.....	35
4.2.3 Confeção dos corpos de prova.....	35
4.2.3.1 Para ensaios mecânicos.....	35
4.2.3.2 Para ensaios de sorção de água.....	36
4.2.4 Ensaios mecânicos.....	36
4.2.5 Ensaios de sorção de água.....	36
4.3 Modelagem matemática.....	37
4.3.1 Analítica.....	37
4.3.2 Numérica.....	40
4.3.2.1 Discretização da equação de difusão.....	40
4.3.2.2 Geração da malha.....	45

4.3.2.3 Estimativa dos pontos de simetria.....	45
4.3.3 Tratamento estatístico dos dados.....	46
CAPÍTULO V	49
RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
5.1 Experimental.....	49
5.1.1 Propriedades Mecânicos.....	49
5.1.1.1 Sistema Poliéster/tecido de juta.....	49
5.1.1.2 Sistema juta/vidro.....	53
5.1.2 Ensaios de Sorção de Água.....	62
5.2 Aplicação dos modelos analítico e numérico à umidificação de compósitos.....	73
5.2.1 Estimação não-linear dos parâmetros.....	73
5.3 Resultados da solução numérica.....	79
5.3.1 Refino de malha e de tempo.....	79
5.3.2 Aplicação dos modelos numéricos.....	81
5.3.2.1 Cinética de sorção e distribuição da umidade.....	81
5.3.2.2 Estimativa do coeficiente de difusão de massa.....	97
CAPÍTULO VI	104
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	104
6.1 Conclusões.....	104
6.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	106
CAPÍTULO VII	107
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	107
ANEXO	116

LISTAS DE FIGURAS

Figura 2.1	Estrutura química do ácido ortoftálico.....	10
Figura 2.2	Estrutura química da resina poliéster.ortoftálico	11
Figura 4.1	Aparência dos tecidos de juta (a) e juta/vidro (b) empregado neste trabalho.....	34
Figura 4.2	Configuração geométrica do problema físico.....	37
Figura 4.3	Configuração geométrica do problema físico usado na solução numérica.....	41
Figura 4.8	Posição da interface i entre os pontos P e E.....	44
Figura 5.1	Resistência à tração em função do teor de fibra para o compósito poliéster/tecido de juta moldado por compressão.....	50
Figura 5.2	Módulo de elasticidade dos em função do teor de fibra para o compósito poliéster/tecido de juta moldado por compressão.....	51
Figura 5.3	Alongamento na ruptura em função do teor de fibra para o compósito poliéster/tecido de juta moldado por compressão.....	52
Figura 5.4	Modulo de flexão em função do teor de fibra para o compósito poliéster/tecido de juta moldado por compressão.....	52
Figura 5.5	Resistência ao impacto em função do teor de fibra para o compósito poliéster/tecido de juta moldado por compressão.....	53
Figura 5.6a	Resistência à tração dos compósitos juta-vidro/poliéster insaturado em função do teor individual de fibras, identidade e direção do teste. Compósito testado na direção longitudinal à juta.....	54
Figura 5.6b	Resistência à tração dos compósitos juta-vidro/poliéster insaturado em função do teor individual de fibras, identidade e direção do teste. Compósito testado na direção longitudinal ao vidro.....	55
Figura 5.7a	Módulo de elasticidade dos compósitos juta-vidro/poliéster insaturado em função do teor individual de fibras, identidade e direção do teste. Compósito testado na direção longitudinal à juta.....	56

Figura 5.7b	Módulo de elasticidade dos compósitos juta-vidro/poliéster insaturado em função do teor individual de fibras, identidade e direção do teste. Compósito testado na direção longitudinal ao vidro.....	57
Figura 5.8a	Alongamento na ruptura dos compósitos juta-vidro/poliéster insaturado em função do teor individual de fibras, identidade e direção do teste. Compósito testado na direção longitudinal à juta.....	58
Figura 5.8b	Alongamento na ruptura dos compósitos juta-vidro/poliéster insaturado em função do teor individual de fibras, identidade e direção do teste. Compósito testado na direção longitudinal ao vidro.....	58
Figura 5.9a	Módulo de Flexão dos compósitos juta-vidro/poliéster insaturado em função do teor individual de fibras, identidade e direção do teste. Compósito testado na direção perpendicular à juta.....	59
Figura 5.9b	Módulo de Flexão dos compósitos juta-vidro/poliéster insaturado em função do teor individual de fibras, identidade e direção do teste. Compósito testado na direção lperpendicular ao vidro.....	59
Figura 5.10a	Resistência ao Impacto dos compósitos juta-vidro/poliéster insaturado em função do teor individual de fibras, identidade e direção do teste. Compósito testado na direção perpendicular à juta.....	60
Figura 5.10b	Resistência ao Impacto dos compósitos juta-vidro/poliéster insaturado em função do teor individual de fibras, identidade e direção do teste. Compósito testado na direção perpendicular ao vidro.....	61
Figura 5.11	Cinética de sorção de água da resina.....	64
Figura 5.12	Cinética de sorção de água dos compósitos poliéster reforçados por 1 camada de tecido de juta.....	65
Figura 5.13	Cinética de sorção de água dos compósitos poliéster reforçados por 2 camadas de tecidos de juta.....	65
Figura 5.14	Cinética de sorção de água dos compósitos poliéster reforçados por 3 camadas de tecidos de juta.....	66
Figura 5.15	Cinética de sorção de água dos compósitos poliéster reforçados por 4 camadas de tecidos de juta.....	66

Figura 5.16	Cinética de sorção de água dos compósitos reforçados por 1 camada de tecido híbrido juta/vidro.....	67
Figura 5.17	Cinética de sorção de água dos compósitos reforçados por 2 camadas de tecidos híbrido juta/vidro.....	67
Figura 5.18	Cinética de sorção de água dos compósitos poliéster reforçados por 3 camadas de tecido híbrido juta/vidro.....	68
Figura 5.19	Cinética de sorção de água dos compósitos poliéster reforçados por 4 camadas de tecidos híbrido juta/vidro.....	68
Figura 5.20a	Cinética de sorção de água dos compósitos poliéster reforçados por tecidos de juta.....	70
Figura 5.20b	Cinética de sorção de água dos compósitos poliéster reforçados por tecidos híbrido juta/vidro.....	70
Figura 5.21	Efeito do teor de fibras na sorção de água no equilíbrio de compósitos poliéster/tecido de juta e poliéster/tecido híbrido juta-vidro.....	71
Figura 5.22a	Curvas da cinética de sorção de água dos compósitos poliéster reforçados por tecidos de juta.....	72
Figura 5.22b	Curvas da cinética de sorção de água dos compósitos poliéster reforçados por tecidos híbrido juta/vidro.....	72
Figura 5.23	Curvas de sorção de água em função do teor de juta.....	73
Figura 5.24	Comparação entre teores de umidade médios resina, experimental e predito pela equação (4.22).....	75
Figura 5.25	Comparação entre teores de umidade médios do compósito reforçado por 1 camada de tecido de juta experimental e predito pela equação (4.22).....	75
Figura 5.26	Comparação entre teores de umidade médios do compósito reforçado por 2 camadas de tecidos de juta, experimental e predito pela equação (4.22).....	76
Figura 5.27	Comparação entre teores de umidade médios do compósito reforçados por 3 camadas de tecidos de juta, experimental e predito pela equação (4.22).....	76
Figura 5.28	Comparação entre teores de umidade médios do compósito reforçado por 4 camadas de tecidos de juta, experimental e predito pela equação (4.22).....	77

Figura 5.29	Comparação entre teores de umidade médios do compósito reforçado por 1 camada de tecido híbrido juta/vidro, experimental e predito pela equação (4.22).....	77
Figura 5.30	Comparação entre teores de umidade médios do compósito reforçado por 2 camadas de tecidos híbridos juta/vidro, experimental e predito pela equação (4.22).....	78
Figura 5.31	Comparação entre teores de umidade médios do compósito reforçado por 3 camadas de tecidos híbridos juta/vidro experimental e predito pela equação (4.22).....	78
Figura 5.32	Comparação entre teores de umidade médios do compósito reforçado por 4 camadas de tecidos híbridos juta/vidro, experimental e predito pela equação (4.22).....	79
Figura 5.33a	Comparação entre os resultados numéricos do teor de umidade médio adimensional durante o refino de malha para $\Delta t=20s$	80
Figura 5.33b	Comparação entre os resultados numéricos do teor de umidade médio adimensional durante o refino de tempo para malha de $20 \times 20 \times 20$ pontos.....	80
Figura 5.34	Comparação entre os resultados teóricos (modelo proposto) e experimental do teor de umidade médio adimensional, durante a umidificação do poliéster insaturado.....	82
Figura 5.35	Comparação entre os resultados teóricos (modelo proposto) e experimental do teor de umidade médio adimensional, durante a umidificação do compósito poliéster insaturado reforçado por 1 camada de tecido de juta.....	82
Figura 5.36	Comparação entre os resultados teóricos (modelo proposto) e experimental do teor de umidade médio adimensional, durante a umidificação do compósito poliéster insaturado reforçado por 2 camadas de tecidos de juta.....	83
Figura 5.37	Comparação entre os resultados teóricos (modelo proposto) e experimental do teor de umidade médio adimensional, durante a umidificação do compósito poliéster insaturado reforçado por 3 camadas de tecidos de juta.....	83
Figura 5.38	Comparação entre os resultados teóricos (modelo proposto) e experimental do teor de umidade médio adimensional, durante a umidificação do compósito poliéster insaturado reforçado por 4 camadas de tecido de juta.....	84

Figura 5.39	Comparação entre os resultados teóricos (modelo proposto) e experimental do teor de umidade médio adimensional, durante a umidificação do compósito poliéster reforçado por 1 camada de tecido híbrido juta/vidro.....	84
Figura 5.40	Comparação entre os resultados teóricos (modelo proposto) e experimental do teor de umidade médio adimensional, durante a umidificação do compósito poliéster reforçado por 2 camadas de tecido híbrido juta/vidro.....	85
Figura 5.41	Comparação entre os resultados teóricos (modelo proposto) e experimental do teor de umidade médio adimensional, durante a umidificação do compósito poliéster reforçado por 3 camadas de tecido híbrido juta/vidro.....	85
Figura 5.42	Comparação entre os resultados teóricos (modelo proposto) e experimental do teor de umidade médio adimensional, durante a umidificação do compósito poliéster reforçado por 4 camadas de tecido híbrido juta/vidro.....	86
Figura 5.43	Distribuição do teor de umidade no interior do poliéster insaturado no plano $x^*=x/R=0,5$ em alguns tempos.....	88
Figura 5.44	Distribuição do teor de umidade no interior do compósito 14% de fibra de juta e 86% de poliéster insaturado no plano $x^*=x/R=0,5$ em alguns tempos.....	89
Figura 5.45	Distribuição do teor de umidade no interior do compósito 26% de fibra de juta e 74% de poliéster insaturado no plano $x^*=x/R=0,5$ em alguns tempos.....	90
Figura 5.46	Distribuição do teor de umidade no interior do compósito 40% de fibra de juta e 60% de poliéster insaturado no plano $x^*=x/R=0,5$ em alguns tempos.....	91
Figura 5.47	Distribuição do teor de umidade no interior do compósito 50% de fibra de juta e 50% de poliéster insaturado no plano $x^*=x/R=0,5$ em alguns tempos.....	92
Figura 5.48	Distribuição do teor de umidade no interior do compósito 20% de fibra de juta/vidro e 50% de poliéster insaturado no plano $x^*=x/R=0,5$ em alguns tempos.....	93
Figura 5.49	Distribuição do teor de umidade no interior do compósito 38% de fibra de juta/vidro e 50% de poliéster insaturado no plano $x^*=x/R=0,5$ em alguns tempos.....	94

Figura 5.50	Distribuição do teor de umidade no interior do compósito 50% de fibra de juta/vidro e 50% de poliéster insaturado no plano $x^*=x/R=0,5$ em alguns tempos.....	95
Figura 5.51	Distribuição do teor de umidade no interior do compósito 58% de fibra de juta/vidro e 42% de poliéster insaturado no plano $x^*=x/R=0,5$ em alguns tempos.....	96
Figura 5.52	Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do poliéster insaturado.....	99
Figura 5.53	Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do compósito poliéster insaturado reforçado por 1 camada de tecido de juta.....	99
Figura 5.54	Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do compósito poliéster insaturado reforçado por 2 camadas de tecido de juta.....	100
Figura 5.55	Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do compósito poliéster insaturado reforçado por 3 camadas de tecido de juta.....	100
Figura 5.56	Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do compósito poliéster insaturado reforçado por 4 camadas de tecido de juta.....	101
Figura 5.57	Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do compósito poliéster insaturado reforçado por 1 camada de tecido híbrido juta/vidro.....	101
Figura 5.58	Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do compósito poliéster insaturado reforçado por 2 camadas de tecido híbrido juta/vidro.....	102
Figura 5.59	Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do compósito poliéster insaturado reforçado por 3 camadas de tecido híbrido juta/vidro.....	102
Figura 5.60	Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do compósito poliéster insaturado reforçado por 4 camadas de tecido híbrido juta/vidro.....	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Propriedades física e mecânicas para poliésteres insaturados.....	11
Tabela 3.1	Composição química das fibras juta	20
Tabela 3.2	Propriedades mecânicas das fibras vegetais (Juta) e a fibra de reforço convencional (Vidro).....	21
Tabela 5.1	Apresentação das condições de umidificação, composição, bem como as dimensões das amostras usadas para cada experimento.....	63
Tabela 5.2	Apresentação dos teores de umidade, dados geométricos e tempo final de absorção de cada amostra.....	63
Tabela 5.3	Parâmetros da Equação (4.22) ajustados aos dados experimentais.....	74
Tabela 5.4	Valor médio de $(1-M^*)$ obtidos com diferentes malhas, para vários intervalos de tempo de sólido, paralelepípedo com dimensões $(R_1 \times R_2 \times R_3)$	81
Tabela 5.5	Parâmetros estimados pelo modelo numérico, erro, variância, tempo total de processo.....	98
Tabela 5.6	Dados obtidos da difusão e teores de umidade inicial e final.....	98
Tabela A1	Propriedades Mecânicas de Compósitos Poliéster/Tecido Híbrido Juta-vidro.....	117
Tabela A2	Propriedades Mecânicas de Compósitos Poliéster/Tecido Híbrido Juta-vidro.....	117
Tabela B1	Relação entre fração mássica e fração volumétrica.....	120

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	[-]
$A_E, A_W, A_N, A_S, A_T, A_F, A_p^o$ - constante	[-]
B_n - Constante	[-]
b.s – Teor de umidade na base seca	[kg/kg]
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]
$\partial M/\partial t$ – 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	[-]
\bar{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_o – Teor de umidade inicial em base seca	[kg/kg]
M_e – Teor de umidade de equilíbrio em base seca	[kg/kg]
\bar{M} - Teor de umidade médio	[kg/kg]
\bar{M}^* - Razão de umidade médio	[kg/kg]
R – Comprimento relacionado às dimensões do sólido, R_1 , R_2 e R_3	[m]
R_1 – Dimensão do sólido em relação ao comprimento	[m]
R_2 – Dimensão do sólido em relação à profundidade (largura)	[m]
R_3 – Dimensão do sólido em relação à altura (espessura)	[m]
S - Área	[m ²]
S/V – Relação Área/Volume	[-]
t – Tempo	[s]
V – Volume	[m ³]
x, y, z – Coordenadas cartesianas	[m]

Letras Gregas

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

Sobrescritos

- * Adimensional
- o Anterior

Subscritos

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

fj fibra de juta

fv fibra de vidro

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

Resumo

Cavalcanti, Wilma Sales Cavalcanti. **Compósitos Poliéster/Tecidos Tramados Vegetal-Vidro: Caracterização Mecânica e Simulação da Sorção de Água.** Campina Grande, Pós-Graduação em Engenharia de Processo, Universidade Federal de Campina Grande – Campus II, 2006 - Tese (Doutorado)

Este trabalho trata do desempenho mecânico e das características de sorção de água de compósitos de matriz poliéster insaturado reforçados por um tecido de juta e por um tecido híbrido juta/vidro especialmente manufaturado composto por fios de juta no urdume e mechas de vidro na trama. O desempenho mecânico dos compósitos foi investigado em função do teor total e relativo de fibras, da direção do teste e da identidade e teor de fibras na direção do ensaio. Uma modelagem matemática tridimensional transiente foi utilizada para prever a transferência de massa durante a sorção de água destes compósitos.

Os dados indicam que as propriedades mecânicas em tração, flexão e impacto dos compósitos investigados aumentam com o teor de fibras. Propriedades superiores foram obtidas para os compósitos testados na direção das fibras de vidro onde, respectivamente, resistência à tração, módulos em tração e em flexão e resistência ao impacto até 5,9; 3,6; 3,7 e 15,8 vezes superiores às da matriz, chegaram a ser obtidas para o compósito contendo 58% (total) e 32% (vidro) em massa de fibras. A hibridização do tecido com fibras de vidro não só promoveu um aumento no desempenho mecânico como também levou a uma redução no teor de água absorvido pelos compósitos. A formulação matemática foi resolvida numericamente utilizando o método dos volumes finitos e o esquema de interpolação totalmente implícito. Resultados da evolução da umidade média dentro do material durante o processo de sorção de água são mostrados, comparados com os dados experimentais e analisados. Um ajuste razoável foi obtido e, este ajuste, o coeficiente de difusão de água e a distribuição de umidade dentro dos compósitos foram estimados utilizando a técnica de erro quadrático mínimo.

Palavras-chave: sorção de água, método numérico, propriedades mecânicas, compósito polimérico, juta, tecido híbrido.

Abstract

Cavalcanti, Wilma Sales Cavalcanti. **Compósitos Poliéster/Tecidos Tramados Vegetal-Vidro: Caracterização Mecânica e Simulação da Sorção de Água.** Campina Grande, Pós-Graduação em Engenharia de Processo, Universidade Federal de Campina Grande – Campus II, 2006 - Tese (Doutorado)

This work deals with the mechanical performance and the water sorption characteristics of compression molded unsaturated polyester composites reinforced with an all jute fabric and an especially manufactured hybrid jute-glass fabric having jute strings on the warp and glass fiber roving on the weft. The mechanical performance of the composites was investigated as a function of total and relative fiber content, test direction and fiber identity and content along the test direction. A tri-dimensional transient mathematical modelling was used to predict mass transfer during the water sorption by these composites.

The data show composite tensile, flexural and impact properties to increase with fiber content. Best overall properties were obtained for the composites tested along the glass fiber direction where tensile strength, tensile and flexural modulus and impact strength up to 5.9; 3.6; 3.7 and 15.8 times higher than those of the neat matrix were obtained for composites with 58% and 32% (glass) w/w total and relative fiber contents. Fabric hybridization with glass fibers not only promoted an increase in composite mechanical performance but also led to a decrease on water uptake by the composites. The mathematical formulation was numerically solved by a finite volume method and a completely implicit interpolation scheme. Results on the evolution of the average humidity within the material during water uptake are shown, analyzed and compared with the experimental data. A satisfactory fit was obtained and the water diffusion coefficient, as well as the humidity distribution within the material, was estimated from this fit by employing a minimum quadratic error technique.

Key-words: water sorption, numerical method, mechanical properties, polymer composite, jute, hybrid fabric.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

As fibras vegetais, por serem compostas principalmente de celulose, são também chamadas de fibras celulósicas ou lignocelulósicas. Estas fibras são abundantes e disponíveis em todo mundo. Com a crescente conscientização de preservação do meio ambiente, e controle de poluição, tem-se dado grande importância à utilização de recursos renováveis na fabricação de diversos produtos (Ghosh, 1997). As fibras vegetais são recursos naturais renováveis e biodegradáveis, de baixa densidade, com alta resistência, duráveis, de fácil secagem, baixo custo, baixo consumo de energia e apresentam um bom conjunto de propriedades mecânicas, adequadas a várias aplicações (Carvalho, 1996, Mishra et al., 2003; Mohanty et al., 2004, Rouison, et al., 2005).

As principais dificuldades associadas ao uso das fibras vegetais como reforço em compósitos poliméricos estão relacionadas ao seu baixo módulo de elasticidade, ao fato de apresentarem propriedades mecânicas inferiores às das fibras sintéticas, terem baixa resistência biológica e serem suscetíveis à degradação em meios alcalinos e ácidos. Além disto, as propriedades mecânicas das fibras vegetais são dependentes da idade da planta, tipo de solo, condições climáticas, do local, das condições de processamentos empregadas bem como de sua estrutura e composição química (Carvalho, 1996; Gowda et al., 1999; Wambua et al., 2003).

A alta absorção de umidade das fibras vegetais é um outro obstáculo considerável. Absorção de umidade pode resultar em inchamento das fibras afetando a matriz por iniciação de trincas ou enfraquecimento das interações da interface fibra-matriz (Rouison et al., 2005). Além disto, o interesse na estabilidade dimensional dos reforços em compósitos não pode ser ignorado. Em compósitos poliméricos reforçados por fibras vegetais, a absorção de umidade por fibra não tratada, com baixa molhabilidade e adesão insuficiente entre matriz polimérica

hidrofóbica e fibra hidrofílica, tanto diminui as propriedades mecânicas do sistema (Sreekala et al., 2002; Wambua et al., 2003; Wang, et al., 2005) como leva à delaminação com o tempo (Gassan, 2002). Sem efetiva molhabilidade das fibras, uma forte adesão interfacial não existe. Segundo Tang et al. (2005) a umidade pode causar plastificação da matriz polimérica, alterar a distribuição de tensão e degradar a interface fibra-matriz. A falta de interação interfacial leva à tensões internas, porosidade e degradação por exposição ambiente. A molhabilidade das fibras depende da viscosidade dos polímeros e da tensão superficial de ambos os materiais. Existem diferentes métodos para modificar a energia superficial das fibras e do polímero e, desta forma, promover melhor interação interfacial.

Métodos físicos e químicos com diferentes eficiências podem ser usados para otimizar a interface entre a matriz e a fibra (Bledzki et al., 1996). Uma outra maneira de se obter produtos com as propriedades desejadas é a hibridização, seja através da combinação de laminados ou da mistura de fibras (Clark e Ansell, 1986; Carvalho et al., 1999; Joseph e Carvalho 1999). Compósitos híbridos reforçados com fibras vegetais e fibras de vidro são bastante resistentes e mais leves do que os reforçados unicamente por fibras de vidro. Este tipo de compósito, por outro lado, tende a apresentar problemas de delaminação. Uma forma de não gerar este problema é o uso de misturas de fibras e da confecção de tecidos híbridos. A hibridização de fibras vegetais com fibras sintéticas, como por exemplo, a fibra de vidro, melhora tanto as propriedades mecânicas quanto a resistência à umidade dos compósitos (Thwe e Liao, 2002; Mishra et al., 2003).

Vários trabalhos sobre a cinética de absorção de água e/ou umidade em sistemas compósitos apresentando soluções analíticas e/ou numéricas foram encontrados na literatura. No entanto, todos os trabalhos consideram a difusão de água no sólido como sendo uni-dimensional (Apicella et al., 1982; Ellis e Found, 1983; Han e Koutsky, 1983; Camino et al., 1997; Marcovich et al., 1999; Choi et al., 2001; Pegoretti e Penati., 2004; Tang et al., 2005). Em alguns casos para levar em consideração a tridimensionalidade do problema alguns pesquisadores têm utilizado soluções analíticas para o problema tridimensional aplicadas para tempos longos, o que simplifica bastante o problema (Chateauminois et al., 1994; Zanni-Deffarges e Shanahan, 1995; Pavan et al., 2001; Srihari et al., 2002; Bao e Yee, 2002).

Neste sentido, visando dar uma continuação nesta área de pesquisa, este trabalho tem por objetivos:

- Desenvolver novos compósitos poliméricos reforçados por tecidos de juta e tecido híbrido juta-vidro;
- Avaliar o desempenho mecânico e absorção de água dos compósitos em função do teor de fibra e da direção do teste;
- Determinar experimentalmente as cinéticas de umidificação dos compósitos;
- Apresentar uma modelagem matemática tridimensional transiente para prever a transferência de massa durante a absorção de água;
- Simular a distribuição do teor de umidade no interior dos sólidos paralelepípedos e suas respectivas cinéticas de umidificação;
- Comparar resultados experimentais e numéricos, para validar a metodologia numérica e obter os coeficientes de difusão de massa.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA GERAL

2.1 Considerações Gerais

Muitos são os materiais que podem ser utilizados como matriz ou reforço em compósitos. A evolução tecnológica de processos tem permitido o emprego de plásticos reforçados em substituição aos materiais convencionais com vantagens econômicas e de produtividade, além de permitir o desenvolvimento de novos produtos, com propriedades específicas a uma determinada aplicação.

Em se tratando de reforço, as fibras de vidro foram às precursoras das aplicações, inovações e melhorias tecnológicas no desenvolvimento de compósitos poliméricos. Com o tempo, foram surgindo outras fibras sintéticas com perspectivas de substituir com vantagens as fibras de vidro. Entre elas destacam-se as de carbono, kevlar e boro (Blass, 1988). Porém estas fibras são bem mais caras que as de vidro e, por isto, sua utilização restringe-se praticamente a aplicações aeroespaciais e desportivas onde seu alto custo é justificado pelo desempenho.

Uma outra classe de reforços fibrosos que tem despertado grande interesse e que tem sido investigada atualmente é a de fibras naturais. Estas fibras, além de exibirem boas propriedades mecânicas, são baratas, leves, abundantes, facilmente disponíveis e provêm de fontes renováveis. Estas características permitem sua utilização como elemento de reforço em matrizes poliméricas numa variada gama de aplicações.

2.2 Compósitos

Um compósito consiste na combinação física de dois ou mais materiais com características individuais distintas. Um é a fase contínua, também chamada matriz, e a outra, é a fase descontínua ou reforço. Em compósitos, as cargas ou reforços são embebidos na matriz e cada constituinte permanece com as suas características individuais (Flinn, 1981).

As propriedades dos compósitos são controladas pelas propriedades de seus materiais constituintes, teores, distribuições e geometrias dos reforços. As características de anisotropia de um compósito são influenciadas enormemente pela orientação do reforço. Além disto, as propriedades finais dos compósitos dependem fundamentalmente da forma como os componentes individuais interagem entre si, ou seja, dependem da interface entre as fases descontínua e contínua.

A grande vantagem dos materiais compósitos é a de que eles são capazes de aliar as melhores qualidades de seus constituintes. O sucesso dos materiais compósitos reside na habilidade de se fazer uso das seguintes características: baixa densidade; alta resistência; alta rigidez; grande resistência à fadiga; possibilidade de escolha da orientação da fibra; versatilidade de projeto; larga variedade de combinações de fibras e de matrizes; grande resistência à corrosão; estabilidade dimensional; baixa transmissão de ruídos; vida longa. Obviamente nem todas estas vantagens podem ser exploradas ao mesmo tempo e, geralmente, não há essa necessidade.

2.2.1 Classificação dos compósitos

Os compósitos podem ser classificados de acordo com a composição química dos constituintes e com a geometria ou a forma das fases 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 podem ser incorporadas a matrizes dúcteis ou frágeis de maneira aleatória ou em laminados orientados, gerando compósitos com diferentes estruturas e propriedades.

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

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

A combinação de propriedades físicas, mecânicas e químicas dos componentes de um compósito, para proporcionar as características desejadas ao produto final, deve ser realizada conhecendo-se as propriedades de cada componente. Uma propriedade física dos materiais que afeta diretamente a estrutura dos compósitos é o coeficiente de expansão térmica. Uma discrepância muito acentuada nesta propriedade entre os componentes do compósito dificulta a adesão entre os componentes, pois a dilatação ou a contração diferencial favorece a separação das fases na região interfacial. Quanto mais fraca for a interação atômica ou molecular na estrutura do material maior será o coeficiente de expansão térmica (Hage, 1989).

2.3 Reforço

São denominados reforços aqueles constituintes que, de uma maneira ou de outra, aumentam determinadas propriedades do compósito em relação à matriz polimérica. Podem ser considerados reforços desde simples 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 unidirecionais, incrementam acentuadamente a maior parte das propriedades mecânicas na direção longitudinal ao reforço.

Os reforços podem ser classificados:

a) Quanto à sua natureza

- extremamente duros para promover aumento à dureza e a resistência à tração;
- resistentes à ruptura para proporcionar elevada resistência à tração, à flexão e ao cisalhamento;
- rígidos para incrementar o módulo elástico;
- extremamente flexíveis para aumentar a resistência ao impacto;
- extremamente 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).

A quantidade do reforço é uma das principais variáveis a ser considerada no desenvolvimento do compósito. A qualidade do compósito final é função, dentre

outros requisitos, do comprimento e distribuição das fibras, do grau de dispersão destas na matriz polimérica e do grau de cristalinidade do compósito. No caso de compósitos reforçados por fibras longas ou contínuas, a qualidade do produto final também depende do método e condições de moldagem dos componentes.

Quando se utilizam cargas fibrosas, as tensões aplicadas ao sistema são transferidas pelo polímero à fibra por um mecanismo de transferência de tensão por cisalhamento (Brydson, 1982). Para que haja transferência efetiva de tensões é necessário que a interface seja forte, ou seja, que haja boa adesão entre os componentes.

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

2.4 Matriz polimérica

A matriz, além de ser responsável pelo aspecto externo do compósito e pela proteção do reforço contra ataques químicos e físicos, tem como principal função dispersar ou aglomerar o reforço, e, quando submetida a uma tensão deve ser capaz de distribuir e transferir as tensões para o componente do reforço. A escolha de uma matriz para uma aplicação estrutural deve ser limitada, inicialmente, ao nível de deformação que ela sofre em relação ao reforço, quando submetida a uma solicitação. A deformação da matriz deve ser compatível com a deformação máxima do reforço.

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

As resinas épxi, apesar de apresentarem excelentes propriedades mecânicas, são penalizadas por custos elevados e baixa resistência a intempéries.

O processo de cura destas resinas é bem mais complexo do que o da resina poliéster. No caso das resinas fenólicas, sua principal desvantagem perante as resinas poliéster e époxi é que, durante a sua cura, ocorre o surgimento de água como subproduto. Portanto, sua aplicação em compósitos é mais complexa, pois a retirada da umidade passa a ser um importante fator durante o processo de fabricação. As resinas poliéster são usadas em compósitos de uso geral, baixo custo e não tão sofisticados. Depois de curadas, apresentam boas propriedades elétricas e oferecem boa resistência à corrosão e a ataques químicos. Por outro lado, a resina pura é pouco resistente e quebradiça. A cura da resina de poliéster é um processo exotérmico e exige um sistema de cura a base peróxido orgânico como catalisador.

As matrizes poliméricas termoplásticas embora reduzam enormemente o custo de fabricação do compósito, não tem sido usadas em compósitos avançados, pois têm como limite, a temperatura de uso. A grande ênfase dos estudos atuais com relação às matrizes termoplásticas é desenvolver resinas termoplásticas com resistência térmica elevada. As matrizes elastoméricas são muito importantes na fabricação em sistemas compósitos resistentes ao impacto (Hull e Clyne, 1996).

2.5 Resina poliéster

Os poliésteres são resinas que possuem grupos éster como elementos fundamentais em suas cadeias moleculares. Resultam da reação de condensação de um diol com um diácido e, dependendo do tipo do ácido empregado, o poliéster pode ser saturado (termoplástico) ou insaturado (termofixo) (Blass, 1988).

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.

Os poliésteres insaturados são obtidos a partir de diácidos insaturados, um diácido saturado e um diol, resultando num produto termofixo, cuja cadeia molecular é composta por ligações simples e duplas entre os átomos de carbono. É diluído num monômero vinílico inibido para facilitar sua estocagem e posterior utilização.

Inicialmente encontra-se no estado líquido e após a adição de um agente de cura, solidifica formando uma estrutura termofixa irreversível.

2.5.1 Estrutura do poliéster insaturado

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

2.5.2 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 2.1).

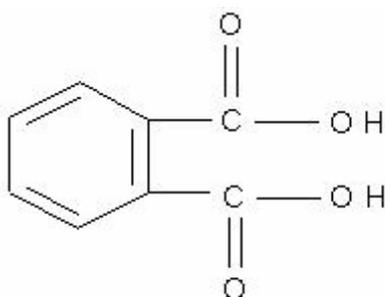


Figura 2.1. Estrutura química do ácido ortoftálico.

A resistência química de um poliéster está ligada principalmente ao seu índice de acidez, quantidade de grupos ésteres formados e densidade das ligações cruzadas. Quando se produz uma resina poliéster insaturada partindo-se do ácido ortoftálico (Figura 2.1), os dois radicais ácidos interferem entre si na cadeia do polímero em formação, fazendo com que essa cadeia seja mais curta. Essa interferência ocorre com o ácido ortoftálico em razão da proximidade desses radicais ácidos na molécula do material. Além disso, uma resina com presença de ácido é muito difícil de ser produzida com baixo índice de acidez, sem usar o artifício de adicionar um excesso de glicol no momento da reação. Esta adição de glicol em excesso, prejudica a resistência química do polímero final em razão da afinidade que este tem pela água (Carvalho e Bretas, 1988). A figura 2.2 mostra a estrutura química da resina poliéster ortoftálico.

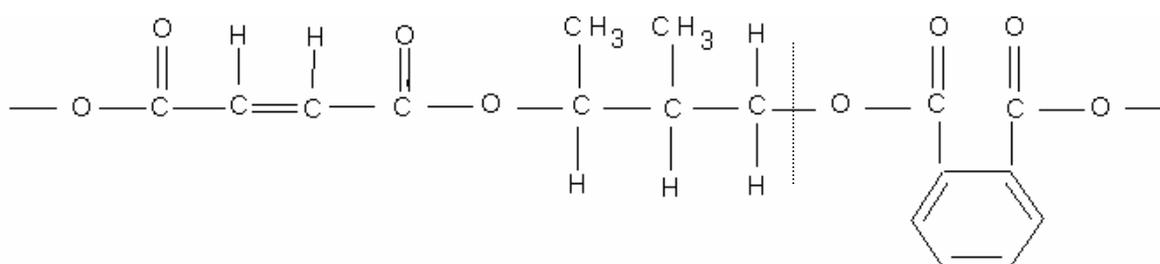


Figura 2.2. Estrutura química da resina poliéster ortoftálico.

2.5.3 Características básicas e aplicações da resina poliéster

As propriedades mais importantes dos poliésteres insaturados incluem facilidades de manipulação, cura rápida sem liberação de substâncias voláteis e tóxicas, cores claras, estabilidade dimensional e, geralmente, um bom balanço de propriedades mecânicas (Tabela 2.1), elétricas e químicas. As principais aplicações de resinas poliéster reforçadas por fibras são: armações de barcos (remos e objetos recreativos); meios de transportes (carcaça, partes para transporte de passageiros, cabinas de caminhões); bens de consumo (diversos artigos de bagagens, vara de pesca, cadeiras, carcaças de eletrodomésticos etc.) e materiais de construção como tubos, calhas entre outros (Carvalho, 1998).

Tabela 2.1 Propriedades física e mecânicas para poliésteres insaturados comerciais (Hull e Clyne, 1996).

Resina	Densidade (g/cm ³)	Resistência a Tração (MPa)	Módulo Young (GPa)	Alongamento (%)
Poliéster	1,2–1,5	40-90	2,0-4,5	2,0

2.5.4 Cura de resina poliéster

A cura é a transformação de uma estrutura linear ou ramificada em uma estrutura tridimensional. Assim, durante a cura há a transformação da resina termoplástica que se encontra no estado líquido para uma resina termorrígida sólida.

O processo de cura por meio de sistema de iniciador/acelerador ocorre pela geração de radicais livres, resultantes da ação do acelerador sobre o iniciador, que atacam as insaturações. Os radicais livres atacam as duplas ligações das macromoléculas e dos monômeros dando início a uma reação em cadeia que produz a total reticulação da resina.

As resinas poliéster podem ser curadas à frio ou à quente. Certos peróxidos são utilizados à temperatura ambiente, tais como os dissociados através do uso de promotores ou aceleradores. As quantidades dos promotores usados nas resinas são muito pequenas e, além do cobalto outros sais metálicos podem ser empregados em conjunto, como os sais de cobre, potássio, vanádio, manganês e outros. Essa complexidade de promotores em combinações variadas altera as propriedades de cura da resina, tais como o controle exotérmico, tempo de gel, de cura e outros.

A seleção de um sistema de cura é dependente de uma série de fatores a serem considerados, ou seja: tempo de gel, processo, tipo de atividade da resina, espessura da peça, temperatura da área de processo e tipo e quantidade de carga e aditivo (Carvalho, 1998).

2.6 Interface matriz-fibra

A interface é de grande importância na determinação das propriedades finais dos compósitos. As tensões que atuam na matriz são transmitidas às fibras através da interface. A adesão inadequada entre as fases envolvidas poderá provocar o início de falhas interfaciais, comprometendo o desempenho global do compósito.

Devido aos problemas de compatibilização interfacial de compósitos foram desenvolvidos mecanismos para melhorar a qualidade da interface em compósitos de matriz polimérica. Estes mecanismos são o uso de agentes de acoplamento ou de modificações na superfície dos reforços ou das matrizes (Hage, 1989).

2.6.1 Características da interface matriz-reforço

Em compósitos com matrizes poliméricas a falha deveria ocorrer na matriz. Na prática, a adesão nunca é perfeita e o processo de ruptura é gerado na interface. Portanto, na maioria dos casos, a falha do plástico reforçado ocorre por cisalhamento na região interfacial. A falha ocorre em função da debilidade das ligações atômicas ou intermoleculares entre a superfície da matriz e a superfície do reforço.

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

É necessário compatibilizar os componentes do compósito na interface, seja para aumentar a interação química entre as superfícies, seja para compatibilizar as tensões superficiais para que ocorra um melhor molhamento. Sendo assim, quase todos os reforços em matrizes poliméricas devem sofrer um tratamento superficial para melhorar sua acoplagem à matriz.

A adesão pode ser atribuída a cinco mecanismos principais que podem ocorrer na interface isoladamente ou em combinação para produzir a ligação fibra-

matriz. Dentre os mecanismos que tratam do contato molecular (Hull,1981; Chung, 1991), incluem-se:

- adsorção e molhamento - Quando duas superfícies eletricamente neutras são colocadas em contato, existe uma atração física que pode ser compreendida considerando o molhamento de superfícies sólidas por líquidos. Para um efetivo molhamento da superfície da fibra, o líquido deve cobrir todas as irregularidades da fibra para deslocar todo o ar contido nas reentrâncias da superfície.
- interdifusão - É a ligação entre duas superfícies poliméricas pela difusão das moléculas de uma superfície sobre a outra. A resistência dependerá da quantidade de entrelaçamento molecular e do número de moléculas envolvidas. A interdifusão ocorre em presença de solventes e agentes plastificantes, e a quantidade de difusão depende da conformação molecular e dos constituintes envolvidos.
- atração eletrostática - Forças de atração ocorrem entre duas superfícies quando uma delas está carregada positivamente e a outra negativamente, tais como nas interações ácido-base e de ligação iônica. A resistência da ligação dependerá da intensidade das cargas.
- ligação química - O estudo das ligações químicas está relacionado com o uso de agentes de acoplamento, empregado nas fibras para produzir a ligação entre a fibra e a matriz. A ligação química é formada entre um grupo químico da superfície da fibra e um grupo químico compatível na matriz.
- adesão mecânica - A ligação pode ocorrer pelo entrelaçamento das duas superfícies. A resistência dessa interface sob tensão será elevada se existir um grande número de reentrâncias na superfície da fibra, que possam ser preenchidas pela resina, propiciando a adesão. A resistência sob cisalhamento é muito significativa e depende do grau de aspereza da superfície da fibra. Os aspectos geométricos não são os únicos fatores que causam adesão mecânica, já que contração da resina durante o processo de cura e expansão térmica da fibra e matriz produz tensão de compressão e cisalhamento na superfície.

2.7 Processos de fabricação de compósitos

Na fabricação de compósitos, diversos processos são utilizados industrialmente para a obtenção de peças ou estruturas monolíticas de excelentes propriedades mecânicas e químicas, termicamente estáveis, leves e com formas arrojadas.

Devido a muitos problemas causados pelas fibras quando da utilização do método de fabricação por injeção, isto é, formação de buchas dificultando o movimento da rosca, entupimento do bico de injeção e outros, tem-se observado uma tendência da mecanização da fabricação de plásticos reforçados em ritmo crescente. São vários os processos de fabricação de compósitos, possibilitando a obtenção de produtos com propriedades mecânicas distintas que podem ser utilizados em diferentes campos de aplicações.

Dentre os processos de manufatura dos compósitos a base de resina termofixa, destacam-se (Blass, 1988):

- Processo Manual (*Hand Lay-up*)

O processo manual consiste em se aplicar camadas alternadas de fibras, na forma de tecido ou manta, e resina ao molde. A resina, com o sistema de cura é aplicada sobre as fibras com auxílio de um rolo ou pincel que também possui a finalidade de eliminar as bolhas existentes. A cura tanto pode acontecer na temperatura ambiente e em temperaturas elevadas (devido a aquecimento).

- Moldagem por Spray (*Spray-up*)

Nesse processo as fibras e a resina são depositadas ao mesmo tempo no molde. As fibras picotadas e junto com a resina são projetadas ao molde utilizando-se uma pistola. Este processo é usado na fabricação de peças de formas complexas ou peças muito grandes.

- Enrolamento de Filamentos (*Filament Winding*)

Consiste na bobinagem de um fio contínuo que recebe a resina, sendo em seguida enrolado em um mandril. É muito utilizado na fabricação de peças cilíndricas

que serão submetidas a pressões internas. É um processo que economiza os materiais empregados.

- Moldagem à Vácuo

Aprimoramento dos processos manual e à pistola, que utiliza o vácuo para se eliminar bolhas e excesso de resina. Após a aplicação normal das fibras e resina no molde, coloca-se um filme flexível sobre o moldado, antes da cura, de maneira que se cubra totalmente o contorno do molde. O vácuo é aplicado entre o molde e o filme, sendo retiradas as bolhas e o excesso de resina.

- Moldagem sob Pressão (Pressure-bag)

Consiste em uma variação do processo de moldagem à vácuo, sendo que nesse processo, após a laminação normal, é aplicada uma pressão na forma de ar comprimido ou vapor sobre o filme flexível que cobre o laminado. Neste caso obtém-se um produto mais compacto e com superfícies mais lisas.

- Pultrusão

Este processo produz compósitos com as fibras orientadas unidirecionalmente. Os filamentos contínuos são impregnados num banho de resina e então são forçados a passar por uma matriz com uma fenda de geometria desejada. Estufas são normalmente utilizadas, para assegurar uma perfeita cura e aumentar a velocidade do processo. O reforço é unidirecional, longo e orientado na direção do fluxo.

- Moldagem por Compressão

Neste processo utiliza-se molde de duas partes tipo macho-fêmea na fabricação de compósitos. O reforço pode ser utilizado na forma de mantas ou tecidos, que são alternados com a resina. A impregnação fibra-matriz é feita com ajuda de uma espátula, que também serve para retirar bolhas. O molde é fechado e a cura ocorre enquanto o material está restrito às superfícies das duas partes (macho-fêmea) do molde.

CAPÍTULO III

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ESPECÍFICA

3.1 Fibras naturais vegetais

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 são classificadas em:

- a) Fibras de gramínea – ex: bambu, bagaço de cana-de-açúcar, junco.
- b) Fibras de folhas – ex: abacá, abacaxi, sisal, banana
- c) Fibras de caule – ex: juta, rami, linho
- d) Fibras de fruto - ex: coco
- e) Fibras de semente - ex: algodão, sumaúma
- f) Fibras de raiz – ex: zacatão
- g) Fibras de madeira – ex: 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 fibras de caule são conhecidas como “fibras macias”.

As fibras vegetais estão em todas as partes do mundo e são também conhecidas como fibras celulósicas, devido ao seu principal componente químico ser a celulose. 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;
- repelência a umidade;
- propriedade anti-chama.

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

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

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

A facilidade de utilização das fibras vegetais (especialmente juta e sisal) e a fibra de vidro como reforços em matriz poliéster na produção de compósitos híbridos, deve-se ao fato das fibras vegetais serem abundantes em nosso país e apresentarem boas características mecânicas. Além disso, juta e sisal são fibras relevantes à economia das regiões Norte e Nordeste do Brasil. O uso da fibra de

vidro se deve ao fato desta apresentar propriedades superiores e com isso as propriedades mecânicas dos compósitos híbridos tendem a aumentar com o teor de fibras de vidro. A confecção de tecidos de trama simples possibilita o alinhamento de ambas as fibras e a alteração das propriedades do compósito não só pelo teor total de fibras, mas também pela disposição dos tecidos.

3.1.1 Fibra de juta

A juta é a segunda fibra vegetal mais consumida no mundo, perdendo apenas para o algodão. É obtida da haste da planta *Corchorus capsularis*, cultivadas em áreas de inundação ou *Corchorus olitorius* cultivadas em áreas altas (d'Almeida, 1987; Morassi, 1994).

Dos dois tipos existentes, a mais cultivada no Brasil e a utilizada neste trabalho, é a juta (*Corchorus capsularis*) que é uma fibra têxtil vegetal que provém da família das "tiliáceas". Esta erva lenhosa alcança uma altura de 3 a 4 metros e o seu talo tem uma grossura de aproximadamente 20 mm, crescendo em climas úmidos e tropicais. A época de semear varia, segundo a natureza e o clima.

As plantas florescem 4 a 5 meses depois de semeadas e inicia-se imediatamente a colheita.. As hastes cortadas rente ao solo por meio de foices, são limpas das folhas, postas em feixes dentro de água corrente ou parada. A fibra útil é contida entre a casca e o talo interno e a extração é feita pelo processo da maceração

A alta temperatura das regiões nas quais é cultivada a juta favorece a fermentação e, desta forma, consegue-se a maceração em 8 a 10 dias, permitindo assim a fácil retirada da casca da planta e separação da fibra da parte lenhosa do talo. Depois disso, enxágua-se e empacota-se.

As melhores qualidades de juta distinguem-se pela robustez das fibras e pela cor branca e brilhante do talo; as qualidades inferiores distinguem-se pela cor dos talos, que são mais escuros, pelo menor comprimento das fibras, de cor mais acinzentada, a bem de terem menor resistência. O comprimento das células elementares da juta é em média de 0,80 mm, e o diâmetro varia de 0,01 a 0,03 mm.

O principal componente da juta é a celulose, sob a forma de linho-celulose. A juta tem boa afinidade para corantes diretos e para corantes básicos. É muito higroscópica, regulando a umidade em 12%, o que a torna a matéria prima ideal para a sacaria, evitando tanto o ressecamento quanto a fermentação do produto acondicionado.

É uma cultura fácil, acompanhada de uma maceração trabalhosa e de pouco rendimento, sem a utilização de agrotóxicos ou fertilizantes (www.castanhal.com.br).

Condições climáticas, idade e processos de obtenção das fibras influenciam não somente a estrutura da fibra, mas também a composição química. Os principais componentes das fibras em estudo estão mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Composição química da fibra de juta (Bledzki e Gassan, 1999; www.castanhal.com.br).

Substância	% (em peso)
Celulose	64,4
Hemi-celulose	12,0
Lignina	11,8
Cinza	0,70
Pectina	0,20
Solúveis em Água	1,10
Graxas	0,50
Água	10,0

3.2 Fibra de vidro

As fibras de vidro são responsáveis por quase 90% dos reforços utilizados em resinas termofixas, pois proporcionam elevadas resistências mecânicas e custos relativamente baixos aos compósitos produzidos.

As fibras de vidro podem ser encontradas sob diversas formas para as mais diversas aplicações, tais como: mechas, fios, tecidos, fios picotados, etc. As fibras encontradas comercialmente para reforço em polímeros, são tratadas com a

finalidade de aglutinar os filamentos e promover a adesão com as resinas poliméricas, através de agentes silanos organo-funcionais.

3.3 Propriedades mecânicas das fibras de juta e vidro.

As fibras vegetais são, em geral, adequadas como reforço em resinas termofixas e termoplásticas devido à sua resistência e rigidez relativamente alta e baixa densidade (Tabela 3.2). Contudo, a faixa de valores característicos é notadamente mais ampla do que a apresentada pela fibra de vidro, o que pode ser explicado pelos efeitos das condições ambientais durante o crescimento das fibras vegetais, o que provoca diferenças em suas estruturas e, conseqüentemente, nas suas propriedades mecânicas.

Tabela 3.2 Propriedades mecânicas das fibras vegetais (Juta) e da fibra de reforço convencional (Vidro) (Bledzki e Gassan, 1999).

Fibra	Densidade (g/cm ³)	Resistência a Tração (MPa)	Módulo Young (GPa)	Alongamento (%)
Juta	1,3	393-773	26,5	1,5-1,8
Vidro	2,5	2000-3500	70,0	2,5

As fibras de juta são empregadas em tecidos de revestimentos, tapetes, sacos, barbantes, esteiras, revestimentos de paredes e produtos similares. Suas propriedades são moderadas, permitindo seu uso como reforços em plásticos e argamassas.

Dentre as fibras vegetais as fibras de juta são consideradas como os materiais do futuro porque são fibras relativamente baratas e viáveis comercialmente, tem resistência e módulo mais alto do que os plásticos e são bons substitutos para as fibras convencionais em muitas situações (Shah e Lakkad, 1981).

Devido às suas características físicas e mecânicas, as fibras vegetais têm despertado o interesse de vários grupos de pesquisa como reforço em polímeros. A qualidade da interface fibra-matriz é significativa para a aplicação de fibras vegetais como reforço em plásticos e tanto métodos físicos quanto químicos podem ser

utilizados para otimizar esta interface e conseqüentemente melhorar as propriedades mecânicas e reduzir a absorção de umidade de compósitos reforçados por este tipo fibras. Neste estudo foi empregado o método físico de hibridização, que é o desenvolvimento de compósitos reforçados com duas ou mais fibras em uma única matriz. Pesquisadores revelam que o comportamento dos compósitos híbridos parece ser simplesmente a soma dos componentes individuais na qual há um balanço favorável entre as vantagens e desvantagens inerentes aos compósitos. As propriedades dos compósitos híbridos são controladas por fatores tais como natureza da matriz; natureza, comprimento e composição dos reforços; interface fibra-matriz; e arquitetura híbrida (Mishra et al., 2003). A seguir, algumas das pesquisas reportadas por diversos autores são apresentadas.

SHAH e LAKKAD (1981) estudaram o comportamento das propriedades mecânicas de compósitos reforçados unidirecionalmente por fibra de juta e fibra de vidro e em uma combinação híbrida juta/vidro em duas matrizes termofixas (epoxi e poliéster). Os resultados mostraram claramente que as fibras de juta, quando introduzidas dentro da matriz como reforço, melhoram consideravelmente as propriedades mecânicas, mas este aumento é muito menor do que o obtido com a introdução das fibras de vidro. Os autores concluíram que as fibras de juta podem ser usadas como reforço onde a resistência e módulo requeridos não sejam muito elevados.

SRIDHAR et al. (1984) estudaram as propriedades mecânicas de compósitos uni e bidirecionais reforçados com juta e híbrido juta/vidro. Os autores concluíram que a resistência dos compósitos uni e bidirecionais foram 3 e 1,5 vezes maiores, respectivamente, do que a da matriz. Por outro lado, compósitos reforçados com híbrido juta/vidro apresentaram propriedades superiores e custo 2/3 inferior ao compósito reforçado com fibras de vidro. O estudo também mostrou que as fibras de juta mantiveram a resistência mecânica e estabilidade química praticamente inalteradas na presença de ar, em temperatura de até 100°C, e que o mesmo aconteceu quando estas fibras foram aquecidas sob vácuo à temperatura de 250°C.

CLARK e ANSELL (1986) produziram por *hand lay-up*, laminados híbridos com juta e vidro empregando o poliéster como matriz. Estes laminados consistiam de camadas intercaladas de fibras de juta e fibra de vidro. Foram desenvolvidos laminados com diversas formas de construção e suas propriedades, resistência às intempéries e o custo do produto foram avaliados. Os autores concluíram que os laminados híbridos possuem boa resistência ao impacto e a resistência à fratura máxima foi alcançada com a juta entre duas camadas de fibra de vidro.

JOSEPH e CARVALHO (1999) estudaram o comportamento mecânico de compósitos de matriz poliéster reforçados com tecidos híbridos algodão/juta, tendo fibras de algodão no urdume e fibras de juta na trama, em função do teor e orientação das fibras. Até então, a literatura reportava apenas estudos com compósitos híbridos laminados. Os resultados mostraram que as propriedades dos compósitos na direção das fibras de juta aumentam com o teor de fibras até um carregamento de 50% (em peso) de fibra. Os autores concluíram, que os compósitos estudados podem ser utilizados em aplicações estruturais e os tecidos híbridos utilizados de forma mais rápida e fácil, quando comparados às mantas de fibras curtas ou unidirecionais.

CARVALHO et al. (1999) confeccionaram tecidos híbridos juta/algodão, sisal/algodão e juta/vidro. As composições empregadas foram: a) algodão/juta: 28% de algodão e 72% de juta, b) algodão/sisal: 22% de algodão e 78% de sisal e c) juta/vidro: 44% de juta e 56% de vidro. Estes tecidos foram utilizados como reforço em compósitos de matriz poliéster e, suas propriedades mecânicas em tração analisadas em função do teor total e relativo de fibras no compósito e da orientação das mesmas. Os resultados mostraram, em todos os casos, independente do tipo de tecido empregado como reforço, que as propriedades dos compósitos aumentaram com o teor das fibras mais resistentes na trama, isto é, com o teor de juta, sisal e vidro. No caso dos tecidos tendo fios de algodão no urdume a resistência não foi afetada pelo teor de fibras, enquanto que para os compósitos híbridos com vidro, tendo no urdume cordões de juta, a resistência aumentou com o teor de fibras. Os autores concluíram que tecidos híbridos tramados a base de fibras vegetais podem ser utilizados como reforço em compósitos de matriz poliéster, pois apresentam

resistência de até 5 vezes maior que a da matriz; são 2 a 3 vezes mais rígidos e são capazes de alongarem 2 a 5 vezes mais que a matriz, podendo ser utilizado em compósitos estruturais.

NÓBREGA (2000) estudou o comportamento mecânico de compósitos de matriz poliéster, reforçados por um tecido híbrido juta/vidro. O tecido híbrido era composto por 44% em peso de fibras de juta no urdume e 56% em peso de fibras de vidro na trama. As propriedades mecânicas foram determinadas em função do teor de fibras e da direção de solicitação do ensaio. As propriedades mecânicas de compósitos com 2, 4 e 6 camadas de reforço híbridos disposto em seqüência de empilhamento de 0°/90° também foram investigados. As propriedades de compósitos reforçados por um tecido tramado de fibras de vidro contendo 1 a 6 camadas de reforço também foram determinadas. O autor concluiu que houve um aumento nas propriedades mecânicas de todos os compósitos com o aumento do teor total de reforço. Quando os testes foram realizados na direção das fibras de vidro, as propriedades se apresentaram mais elevadas do que quando testada na direção da fibra de juta, o que foi atribuído ao fato das propriedades dos componentes individuais do tecido. Os compósitos reforçados por tecidos híbridos com seqüência de empilhamento 0°/90° apresentaram propriedades intermediárias às obtidas para compósitos equivalentes testados no sentido longitudinal às fibras de vidro ou às fibras de juta.

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 (ANDREPOULOS e TARANTILI, 1998; MARCOVICH et al., 1999).

RAO et al. (1981) estudaram as características de absorção de compósitos de matriz poliéster e epóxi reforçados com fibras de juta. Os estudos foram conduzidos, sob umidade constante e temperatura ambiente. Compósitos com fibras de juta unidirecionais não tratadas e resinas poliéster e epóxi foram fabricados usando a técnica de bobinagem. Foram curados à temperatura ambiente por 24 horas sob pressão de 40 Psi, seguido de pós-cura à 100°C por 1 hora. As amostras foram cortadas e as bordas seladas e, em seguida, secas à 100°C. As amostras secas

foram imersas em água à temperatura ambiente ($25 \pm 2^\circ\text{C}$), periodicamente retiradas da água, secas com tecido de baixa absorção e seu peso registrado em balanças de alta precisão. Os autores observaram que as curvas de absorção aumentam com o aumento da fração volumétrica de fibra, ao passo que o tempo necessário para atingir o equilíbrio de absorção diminuiu com o teor de fibra, o que foi atribuído ao aumento da difusividade no compósito sob tais condições.

HAN e KOUTSKY (1983) estudaram a difusão de água em compósitos de poliéster reforçado por fibra de vidro como uma função do tempo. O coeficiente de difusão, o teor máximo de umidade e o tempo de difusão de água dentro dos compósitos foram determinados. O coeficiente de difusão de água foi calculado usando um modelo teórico simples aplicado aos dados experimentais. Os autores concluíram que o teor máximo de água encontrado foi de 0,59% e que o coeficiente de difusão foi de $5,4 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$ na temperatura ambiente, o que segundo afirmaram, é próximo aos resultados obtidos por outros investigadores; porém, a leve discrepância encontrada entre estes valores foi devido às diferenças no teor de fibras, orientação das fibras e na delaminação entre fibra-matriz.

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

IDRISS et al. (1994) estudaram as propriedades mecânicas e físicas de filmes curados com radiação ultra-violeta, produzidos a partir de formulações com acrilato de uretano em combinações com monômeros, fotoiniciador e plastificantes. Seis formulações foram preparadas com acrilato de uretano e os aditivos, para cobrir os tecidos de juta e cura-los com radiação ultra violeta. Os filmes preparados com

essas formulações foram caracterizados para se determinar as formulações capazes de melhorar as propriedades da juta. Os autores concluíram que a resistência tênil aumentou em torno de 80%, a alongação mais de 300% e a redução da absorção de água ficou em torno de 60%.

CHATEAUMINOIS et al. (1994) investigaram a degradação higrotérmica de um compósito unidirecional epóxi-fibra de vidro através de experimentos de sorção/desorção de umidade e análises termo dinâmico-mecânico (DMTA). Os resultados indicam que para imersão em tempos curtos, a absorção de água em água destilada, pode ser satisfatoriamente escrita com o uso da lei de Fick. A análise tridimensional da difusão de água em amostras paralelepipedicas mostrou que nenhum fluxo significativo por capilaridade interfacial ocorreu durante a etapa inicial Fickiana e que a sorção ocorre principalmente por difusão através da matriz epóxi. Para tempos longos de imersão observou-se uma segunda etapa de sorção que apresentou comportamento de difusão não-Fickiano. Durante este estágio tanto delaminação quanto mudanças morfológicas ocorreram na interface, já que a sorção de água pela matriz epóxi esta próxima da saturação.

ANDREOPOULOS e TARANTILI (1998) estudaram a sorção de água de compósitos feitos com matriz epóxi reforçada com fibras de polietileno de massa molar ultra-elevada (UHMPE), em varias temperaturas (20, 40 e 60°C). Foram testadas amostras contendo fibras originais e submetidas a tratamento corona. Os resultados indicaram que, em geral, as fibras de polietileno restringem a sorção de água nos compósitos obtidos, obviamente devido ao caráter hidrofóbico do polietileno. Para os compósitos contendo fibras não tratadas, verificou-se uma pobre adesão interfacial. Como era esperado, o aumento de temperatura para 60°C contribuiu para aumento na sorção de água do compósito. O aumento da fração volumétrica de fibras levou a uma diminuição na sorção de água, e isto é devido ao caráter completamente hidrofóbico do polietileno.

SONI e SONI (1999) estudaram laminados de 12 mm de espessura, à base de resina fenólica modificada (resol) reforçados por tecidos de juta ou de algodão. As propriedades físicas, mecânicas e elétricas dos laminados foram determinadas.

Os resultados mostraram que a resistência à tração e flexão dos compósitos fenólicos reforçados por tecidos de juta foram cerca de 10 a 20% mais altas e a resistência à punção e à delaminação foi 15 a 20 % menor que a dos compósitos reforçados por tecidos de algodão. Uma menor resistência ao isolamento elétrico foi observada nos compósitos reforçados por tecidos de juta. A resistência dielétrica e as propriedades físicas como densidade específica e absorção de água foram equivalentes para os compósitos fabricados com os dois tipos de reforço estudados.

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

CHOI et al. (2001) investigaram os efeitos higroscópicos de parâmetros tais como temperatura higrotérmica, fração volumétrica da matriz, fração volumétrica de vazios, espessura das amostras, seqüência de empilhamento das camadas e tensão interna dos compósitos laminados epóxi-fibra de carbono. Os autores concluíram que as espessuras das amostras e a seqüência das camadas têm pouco efeito no comportamento de absorção de água através da espessura dos compósitos laminados, mas os outros parâmetros afetam a taxa de absorção de água e teor de água no equilíbrio em diferentes modos e intensidade. As temperaturas de transição vítreas dos compósitos foram fortemente afetadas e linearmente reduzidas pela

quantidade de água no equilíbrio. Os autores assumiram neste estudo que as fibras embebidas na matriz agiram como barreiras à penetração de moléculas de água, e o modelo desenvolvido neste estudo ajustou-se bem aos resultados experimentais.

BAO e YEE (2002) estudaram a difusão de umidade e o envelhecimento higrotérmico em compósitos de matriz bismaleimida reforçados por fibras de carbono. As curvas de sorção de umidade dos compósitos foram comparadas com a da resina pura para determinar o efeito da interface na sorção de umidade. O efeito da interface tanto em tempos curtos quanto em tempos longos foi investigado. Os autores observaram que tanto a resina quanto os compósitos exibiram comportamentos similares de difusão nos dois estágios. Quando as difusividades dos compósitos foram comparadas a um modelo matemático, foi encontrado que a interface fibra-matriz teve pouco efeito na difusão de umidade em períodos curtos. Foi observado também, que apesar da adesão fibra-matriz inicialmente ser muito forte, absorção de água prolongada a elevadas temperaturas eventualmente danifica a interface e causa trincas interfaciais.

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

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

THWE e LIAO (2002) estudaram o efeito do teor de fibra, comprimento da fibra e do polipropileno anidrido maléico (PPAM) como agente compatibilizante nas propriedades tenséis e de flexão de compósitos de polipropileno reforçado com fibras curtas de bambu e compósitos híbridos de polipropileno reforçado por fibra de vidro-bambu, sendo ambos os sistemas fabricados pelo método de moldagem por compressão. O comportamento de sorção e efeito do envelhecimento ambiental nas propriedades tenséis de ambos os sistemas foram estudados em amostras imersas em água à 25°C por 1200 h. Os autores concluíram que um aumento de até 40% (em peso) no teor de fibra de bambu no compósito polipropileno reforçado com fibra de bambu resultou no aumento de 60% no módulo. E que depois do envelhecimento em água por 1200 h, a redução nas propriedades do sistema híbrido foi quase 2 vezes menor do que o sistema não híbrido. Também foi observado, que o agente compatibilizante (PPMA) usado na resina de polipropileno resultou no decréscimo do nível de absorção na saturação e melhorou as propriedades mecânica de ambos sistemas. E que o envelhecimento em água à 25°C causou degradação nas propriedades mecânicas de ambos sistemas, degradação da fibra de bambu e da adesão interfacial. Em geral, foi mostrado que a hibridização com fibra sintética tanto

melhorou as propriedades mecânicas e o comportamento de resistência à umidade, como também aumentou a durabilidade do compósito com fibra vegetal.

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

PEGORETTI e PENATI (2004) estudaram o efeito do envelhecimento higrotérmico em água à 70°C, e 80% de umidade relativa, na massa molar e nas propriedades térmicas de compósitos de polietileno tereftalato (PET) e fibras curtas de vidro. Os autores observaram que durante o período inicial de exposição, a absorção de água aumenta linearmente com a raiz quadrada do tempo e a difusividade aparente diminui com o aumento do teor de fibra e com o decréscimo da umidade relativa. Compósitos absorvem mais água do que o esperado considerando difusão somente dentro da matriz polimérica. Os autores sugeriram que outros mecanismos, como capilaridade e/ou transporte por microtrincas, ficam ativos quando os compósitos são imersos em água.

KUMOSA et al. (2004) investigaram a absorção de água em compósitos unidirecionais a base de fibra de vidro com poliéster modificado, epóxi e resina vinil éster a serem usados como isolantes de alta voltagem. Os compósitos foram expostos em ambiente úmido com umidade relativa de 80% à 50°C, e sua resistência à absorção de umidade ao que se refere a taxa de absorção de umidade, teor de umidade máximo e difusividade aparente foram determinados. Neste trabalho foi utilizada a técnica de elementos finitos para estudar numericamente a

absorção de água. Os autores encontraram uma diferença significativa na propriedade de absorção de umidade dos compósitos, indicando que o efeito da umidade nas propriedades mecânicas e elétricas dos isolantes depende do tipo de compósito usado. Os resultados evidenciaram que materiais a base de vinil éster apresentaram difusão de umidade mais favorável para o uso em compósitos isolantes de alta voltagem e que os compósitos a base de poliéster modificado exibiram um pior desempenho na absorção de umidade. Os compósitos a base de epóxi apresentaram taxas de absorção adequadas, porém, estes materiais não alcançaram o equilíbrio e continuaram absorver mais umidade de maneira não-Fickiana.

ROUISON et al. (2005) determinaram a absorção de água de compósitos poliéster insaturado/fibra de cânhamo por imersão de amostras em água ou por exposição ao ar com uma umidade relativa de 94%. Foi encontrado que a absorção de água aumenta com o aumento do teor de fibra, mas o processo de absorção de água foi relativamente lento e a saturação foi alcançada somente após muitos meses de imersão. O sistema de ressonância magnética por imagem confirma que o processo de absorção de água é governada 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 influencia 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 IV

MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

4.1.1 Materias poliméricos

Para confecção das amostras, foi usada como material polimérico uma resina poliéster insaturada (resapol 10-116), do tipo ortoftálica pré-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.

4.1.2 Reforço

Os reforços empregados neste estudo foram: um tecido de juta e um tecido híbrido juta-vidro tramados em tear manual e confeccionado no Lar do Garoto reformatório juvenil, sediado no município de Lagoa Seca, PB. Fios de juta de classificação (10/2) fornecidos pela (Companhia Têxtil Castanhal S/A) e mechas (rovings) de fibras de vidro (111A 408) fornecidas pela OWENS CORNING do BRASIL foram usadas na confecção do tecido.

A seguir descrevem-se detalhes destas confecções:

- Tecido de juta - foi fabricado em tear manual, utilizando fios de juta (10/2). Utilizou-se um pente 18 e 1 fio por pua e 1 batida aberta e uma fechada. O tecido assim tramado apresentava 42 fios/10cm no urdume e 39 fios/10 cm na trama (Figura 4.1a).

- Tecido híbrido juta/vidro - foi fabricado em tear manual, contendo cordões de juta (10/2) no urdume e mechas de fibra de vidro na trama. Devido à

espessura reduzida das mechas de vidro, foram lançadas duas mechas em cada passada. Utilizou-se um pente 18 e 1 fio por pua e 1 batida aberta e uma fechada. O tecido assim tramado apresentou 40 fios/10 cm no urdume e 35-38 fios/ 10 cm na trama. A composição do tecido híbrido utilizado foi de 44% de juta e 56% de vidro em massa (Figura 4.1b).



(a)



(b)

Figura 4.1 – Aparência dos tecidos de juta (a) e juta/vidro (b) empregados neste trabalho.

4.2. Métodos

4.2.1 Preparação dos laminados

Compósitos com teores variados de fibra foram preparados por moldagem por compressão. O tecido de juta e o tecido híbrido juta/vidro foram cortados de acordo com as dimensões do molde (140 x 170 mm). O molde foi untado com cera para auxiliar a desmoldagem. O catalisador (MEK) foi misturado à resina e parte desta mistura vertida no molde. O tecido (híbrido ou simples) previamente pesado foi colocado no molde e pressionado com auxílio de uma espátula para garantir a sua impregnação. Este procedimento foi repetido até que o número desejado de camadas de tecido fosse disposto no molde e impregnado pela resina. 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 4 horas. Após este período foi efetuada a desmoldagem, e só após 48 horas foram confeccionados os corpos de prova. Compósitos laminados com até 4 camadas de tecidos foram manufacturados desta maneira.

4.2.2 Teor de fibras

O teor de fibras foi determinado por gravimetria e o seguinte procedimento foi utilizado: pesou-se o tecido de juta previamente seco (cortado nas dimensões do molde) e depois pesou-se o laminado. Com os pesos obtidos determinou-se o teor de fibras (em massa) da seguinte forma:

$$T_f(\%) = \frac{P_T}{P_L} \times 100 \dots\dots\dots(4.1)$$

onde T_f é o teor de fibras, P_T é o peso (gr) do tecido e o P_L Peso do laminado (gr).

4.2.3 Confeccção dos corpos-de-prova

4.2.3.1 Para Ensaio mecânicos

Os corpos de prova, para testes mecânicos, foram serrados manualmente a partir dos laminados, tomando cuidado com o alinhamento do tecido de modo que as fibras vegetais (juta) e a fibra de vidro ficassem orientadas longitudinalmente. Os corpos de prova foram cortados a partir das placas laminadas nas dimensões preconizadas pelas normas ASTM D 3039 (ensaio de tração), ASTM D 790 (módulo de flexão) e ASTM D 256 (resistência ao impacto).

4.2.3.2 Ensaios de sorção de água

Corpos de prova medindo 20,0 x 20,0 mm e com espessuras variando de 2,10 - 3,00 mm, em função do teor total (20 a 58 %) de fibras no compósito, foram usinados a partir das placas moldadas por compressão e preparados para o ensaio de sorção.

As arestas 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.

4.2.4 Ensaios mecânicos

Os ensaios de tração, módulo de flexão e de impacto foram realizados segundo as normas ASTM 3039, ASTM 790 e ASTM 256, respectivamente. Os ensaios em tração foram conduzidos em máquina universal de ensaios Lloyd LR-10KN operando à temperatura ambiente, com uma taxa de deslocamento da travessa de 1 mm/min. No ensaio em flexão a taxa de deslocamento de travessa foi de 1,2 mm/min. Os ensaios de impacto foram realizados em equipamento CEAST Resil 5,5J operando com os martelos de 4 e 5,5 J a temperatura ambiente.

4.2.5 Ensaios de sorção de água

Antes do ensaio de sorção de água, os corpos-de-prova foram colocados em estufa a 105°C por 24 horas. Imediatamente depois de secas as amostras foram pesadas e, em seguida, imersas em água destilada à temperatura ambiente. 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. O teor de água absorvido foi calculado comparando-se o peso inicial e após a exposição, de acordo com a equação:

$$\text{Abs}(\%) = \left(\frac{P_u - P_s}{P_s} \right) \times 100 \quad \dots\dots\dots(4.2)$$

onde: P_u - peso úmido e P_s - peso seco

4.3 Modelagem matemática

Soluções analíticas e numéricas para o problema de difusão transiente para varias geometrias tem 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. Nela desenvolve-se a solução analítica e 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.

4.3.1 Analítica

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 4.2.

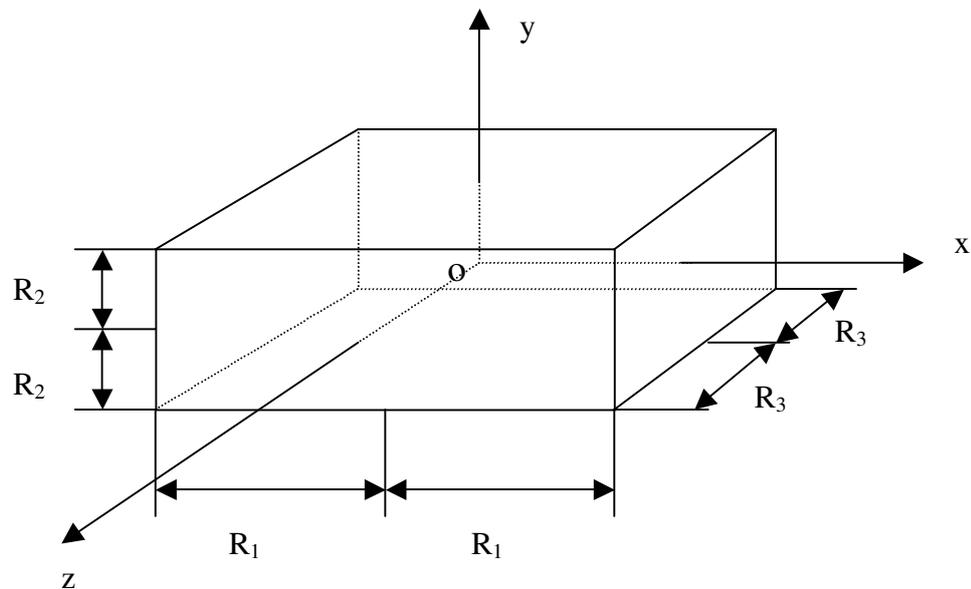


Figura 4.2 - Configuração geométrica do problema físico.

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\lambda\Phi) = \nabla(\Gamma^\Phi \nabla\Phi) \dots\dots\dots (4.3)$$

onde na equação (4.3) tem-se para transferência de massa, $\lambda = \rho$; $\Phi = M$; $\Gamma^\Phi = \rho D$; sendo ρ , M e D a densidade, teor de umidade e coeficiente de difusão no sólido, respectivamente.

Para descrever a transferência de massa no sólido com forma de paralelepípedo (Figura 4.2), 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 a equação (4.3) para ρ constante assume a forma:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla M) \dots\dots\dots (4.4)$$

onde o operador Nabla ∇ é dado por:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k} \dots\dots\dots (4.5)$$

Desde que a equação (4.3) 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:

$$M(x,y,z,t=0)=M_o \dots\dots\dots (4.6)$$

- Condições de simetria

$$\frac{\partial M(x=0,y,z,t)}{\partial x} = \frac{\partial M(x,y=0,z,t)}{\partial y} = \frac{\partial M(x,y,z=0,t)}{\partial z} = 0, t > 0 \dots\dots\dots (4.7)$$

- Condições de contorno na superfície:

$$M(x=R_1,y,z,t) = M(x,y=R_2,z,t) = M(x,y,z=R_3,t) = M_e, t > 0 \dots\dots\dots (4.8)$$

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

$$\bar{M} = \frac{1}{V} \int_V M dV \dots\dots\dots (4.9)$$

4.3.2 Numérica

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, 1995).

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 centróide do volume 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.

4.3.2.1 Discretização da equação de difusão

A equação diferencial parcial geral, em coordenadas cartesianas, que governa um fenômeno difusivo aplicada a um volume de controle infinitesimal (Figura 4.3), é dada por:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial M}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial M}{\partial z} \right) \dots\dots\dots(4.10)$$

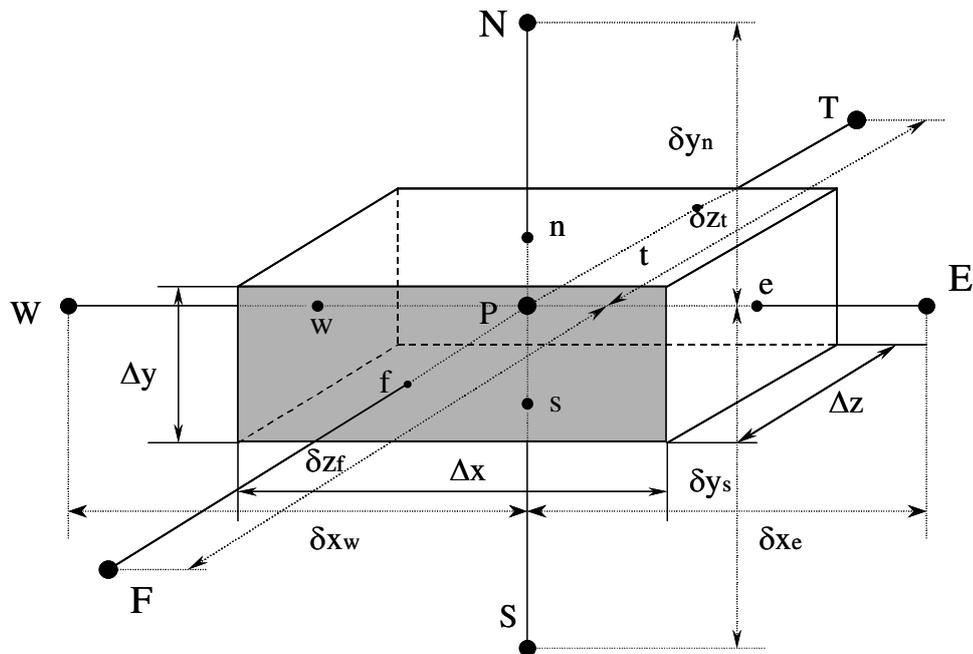


Figura 4.3 - Configuração geométrica do problema físico usado na solução numérica.

Aplicando-se a integral em todos os termos da equação (4.10) no volume de controle tridimensional da Figura 4.3 e no tempo, tem-se:

$$\int_v \int_t \frac{\partial M}{\partial t} dv dt = \int_v \int_t \frac{\partial M}{\partial x} dv dt + \int_v \int_t \frac{\partial M}{\partial y} dv dt + \int_v \int_t \frac{\partial M}{\partial z} dv dt \dots\dots\dots(4.11)$$

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. Assim as derivadas diretas relativas ao fluxo difusivo, referentes à Figura 4.3, são dadas por:

$$\left. \frac{\partial M}{\partial x} \right|_e = \frac{M_E - M_P}{\delta x_e} \quad \left. \frac{\partial M}{\partial x} \right|_w = \frac{M_P - M_W}{\delta x_w} \quad \left. \frac{\partial M}{\partial y} \right|_n = \frac{M_N - M_P}{\delta y_n} \tag{4.12a-f}$$

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

Realizando a integração da equação (4.11), termo a termo, e usando suas derivadas aproximadas, e uma formulação totalmente implícita, onde os termos são estimados nos tempos $t+\Delta t$, (Maliska, 1995), obtém-se:

$$\begin{aligned} (M_P - M_P^o) \Delta x \Delta y \Delta z = & \left[D_e \left(\frac{M_E - M_P}{\delta x_e} \right) - D_w \left(\frac{M_P - M_W}{\delta x_w} \right) \right] \Delta y \Delta z \Delta t \\ & + \left[D_n \left(\frac{M_N - M_P}{\delta y_n} \right) - D_s \left(\frac{M_P - M_S}{\delta y_s} \right) \right] \Delta x \Delta z \Delta t + \left[D_f \left(\frac{M_F - M_P}{\delta z_f} \right) - D_t \left(\frac{M_P - M_T}{\delta z_t} \right) \right] \Delta x \Delta y \Delta t \end{aligned} \tag{4.13}$$

ou ainda:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + \frac{D_e \Delta y \Delta z}{\delta x_e} + \frac{D_w \Delta x \Delta y}{\delta x_w} + \frac{D_n \Delta x \Delta z}{\delta y_n} + \frac{D_s \Delta x \Delta z}{\delta y_s} + \frac{D_f \Delta x \Delta y}{\delta z_f} + \frac{D_t \Delta x \Delta y}{\delta z_t} \right) M_P \\ & = \frac{D_e \Delta y \Delta z}{\delta x_e} M_E + \frac{D_w \Delta y \Delta z}{\delta x_w} M_W + \frac{D_n \Delta x \Delta z}{\delta y_n} M_N + \frac{D_s \Delta x \Delta z}{\delta y_s} M_S + \frac{D_f \Delta x \Delta y}{\delta z_f} M_F \\ & + \frac{D_t \Delta x \Delta y}{\delta z_t} M_T + \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} M_P^o \end{aligned} \tag{4.14}$$

Reorganizando os termos que são comuns, pode-se escrever a equação (4.14), na forma linear como refere (Patankar, 1980 e Maliska, 1995):

$$A_P M_P^* = A_E M_E^* + A_W M_W^* + A_N M_N^* + A_S M_S^* + A_T M_T^* + A_F M_F^* + B \tag{4.15}$$

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 (4.15) 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^o significa a influencia 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 4.3.

A equação (4.15), aplicada a todos os pontos internos do sólido gera um conjunto de equações algébrica. 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 (4.16) foi satisfeito, em cada ponto do domínio computacional.

$$|M^{*n-1} - M^{*n}| \leq 10^{-8} \dots\dots\dots(4.16)$$

onde \underline{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), 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.

Nos problemas de difusão com D variável, de acordo com a Figura 4.4, 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:

$$D_i = \left(\frac{1-\hat{f}_i}{D_P} - \frac{\hat{f}_i}{D_E} \right)^{-1} \dots\dots\dots(4.17)$$

onde \hat{f}_i é o fator de interpolação, dado por $\hat{f}_i = \frac{(\delta d)_i^+}{(\delta d)_i^-}$

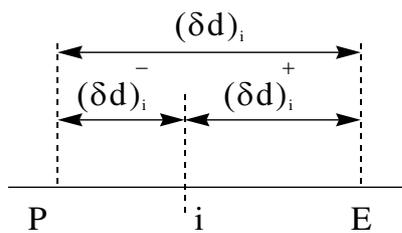


Figura 4.4 – Posição da interface i entre os pontos P e E.

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:

$$D_i = \frac{2D_P D_E}{D_P + D_E} \dots\dots\dots(4.18)$$

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.

4.3.2.2 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:

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

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

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

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

$$x_i = x_{i-1} + \frac{\Delta x}{2}, \quad \text{para } i = 3, \dots, n_{px}-1;$$

$$y_j = y_{j-1} + \frac{\Delta y}{2}, \quad \text{para } j = 3, \dots, n_{py}-1;$$

$$z_k = y_{k-1} + \frac{\Delta z}{2}, \quad \text{para } k = 3, \dots, n_{pz}-1;$$

$$x_i = R_1, \quad \text{para } i = n_{px};$$

$$y_j = R_2, \quad \text{para } j = n_{py};$$

$$z_k = R_3, \quad \text{para } k = n_{pz}.$$

4.2.3 Estimativa dos pontos de simetria

Os pontos de simetria não entram no conjunto de equações a serem resolvidas. Após o sistema de equações ter sido resolvido, 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≤z≤R₃) e (0≤y≤R₂):

$$-D_w \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_w = -D_e \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_e \dots\dots\dots(4.19)$$

Na forma discretizada, tem-se:

$$-D_w \left(\frac{M_p - M_w}{\delta x_w} \right) = -D_e \left(\frac{M_e - M_p}{\delta x_e} \right) \dots\dots\dots(4.20)$$

ou ainda:

$$M_w = \left(\frac{D_e \delta x_w}{D_w \delta x_e} + 1 \right) M_p - \frac{D_e \delta x_w}{D_w \delta x_e} M_e \dots\dots\dots(4.21)$$

Para os demais planos o procedimento é semelhante.

4.3.3 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:

$$\bar{M}^* = A_1 \exp(-K_1 t) + A_2 \exp(-K_2 t) + A_3 \exp(-K_3 t) \dots\dots\dots(4.22)$$

onde t é dado em horas. A estimação não-linear dos parâmetros da equação 4.22 foi realizada utilizando o Software Statistica® e o método numérico de Hooke-Jeeves e quasi-Newton, com critério de convergência de 0,00001. A escolha da forma desta equação foi baseada nos trabalhos de 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 do material de acordo com a seguinte equação:

$$D = D_0 \text{Exp}(\eta \bar{M}) \dots\dots\dots(4.23)$$

com D dado em m²/s. Nesta equação D₀ e η são constantes.

O coeficiente de difusão foi obtido variando as constantes D₀ e η 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):

$$\text{ERMQ} = \sum_{i=1}^n (\bar{M}_{i,\text{Num}}^* - \bar{M}_{i,\text{Exp}}^*)^2 \dots\dots\dots(24a)$$

$$S^2 = \frac{\text{ERMQ}}{(\hat{n} - 1)} \dots\dots\dots(24b)$$

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

Inicialmente considerou-se $\eta=0$ e pelo critério do ERMQ obteve-se D_0 . Em seguida fixou-se o D_0 obtido e variou-se η até que o menor ERMQ fosse obtido. Posteriormente, fixou-se o η obtido na etapa anterior e variou-se D_0 até que um novo ERMQ fosse obtido. Este procedimento foi executado até obter o menor ERMQ.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Experimental

No presente trabalho foram estudados dois sistemas de compósitos à base de resina poliéster. O primeiro é um sistema poliéster/tecido de juta e o segundo um sistema híbrido poliéster /tecido de juta-vidro.

5.1.1 – Propriedades mecânicas

5.1.1.1 - Sistema Poliéster /tecido de juta

Os resultados obtidos para as propriedades mecânicas de compósitos poliéster tecido não-híbrido (juta pura) como função do teor total de fibras estão mostrados na Tabela A1 (anexo A) e ilustrados nas Figuras 5.1 – 5.5. Vale ressaltar, que do teor total de fibras encontrado nos compósitos desse sistema só 50% das fibras estão na direção do esforço.

Analisando a Figura 5.1 fica evidenciado que a introdução do tecido de juta na matriz poliéster provocou um decréscimo de 34% na resistência à tração dos compósitos com 1 camada de tecido de juta (14% em massa). Porém, com o aumento dos teores de fibras a resistência à tração atingiu valores de até 41,5% superiores ao da matriz, para os compósitos com 50% em massa de juta. Comportamento análogo foi reportado por Joseph e Carvalho (1999), para sistema afim, reforçado por tecidos híbridos algodão-juta e algodão-sisal. Segundo os autores quando tecidos tramados são utilizados como reforço, as fibras alinhadas ortogonalmente ao esforço agem como inclusões ou defeitos. Para baixos teores de fibras, este efeito sobrepuja o efeito reforçante das fibras sendo solicitadas na direção longitudinal e o resultado é um decréscimo na resistência do compósito.

Para saber se o teor de fibra empregado está abaixo do valor crítico, foi realizada uma estimativa da fração de volume crítico usando a equação de aproximação micromecânica de compósito, (Anexo B). O valor do volume crítico de fibra de juta encontrado foi de aproximadamente 24,0%, como o teor de fibras presente no compósito com 1 camada de tecido de juta é de 14% em massa que corresponde 11,5% em volume, e que só 50% deste teor está na direção do esforço, isto é volume de fibras inferior ao volume crítico, significando que as fibras presentes no compósito são insuficientes para carregar a carga transferida da matriz, resultando além do decréscimo na resistência a falha do compósito. A elevados teores de fibras, isto é, acima do valor crítico, as fibras suportam a carga carregada originalmente pela matriz, conseqüentemente as propriedades do compósito passam a ser dominadas pelas fibras sendo solicitadas na direção longitudinal e o tecido passa a atuar como elemento de reforço.

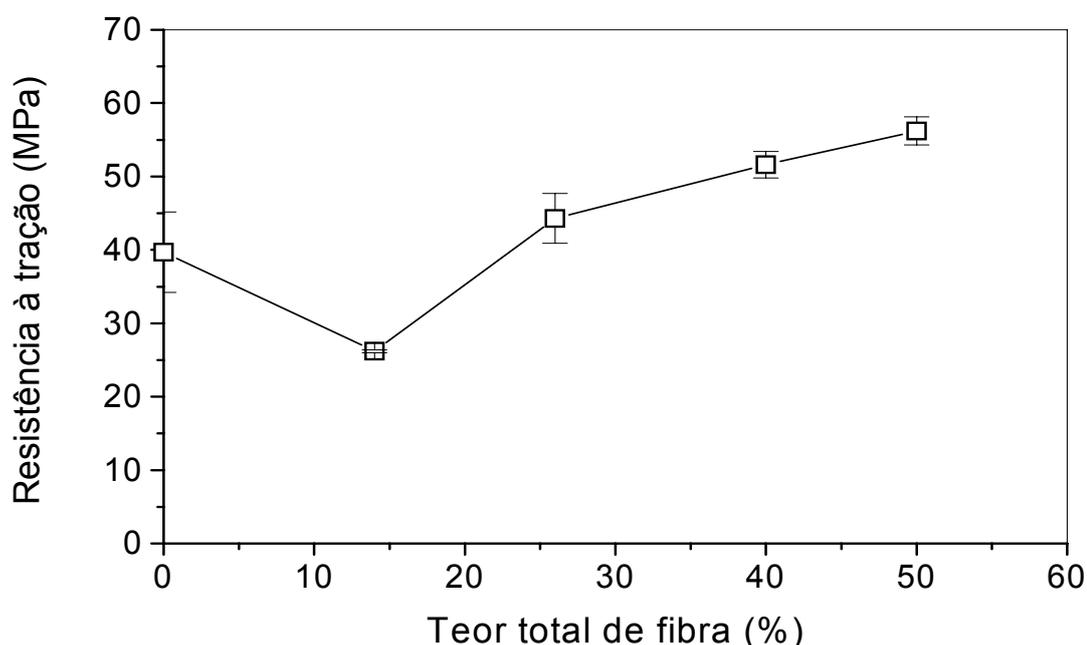


Figura 5.1 - Resistência à tração em função do teor de fibra para o compósito poliéster/tecido de juta moldado por compressão.

Na Figura 5.2 observa-se que o módulo Young (módulo de elasticidade sob tração) aumentou em cerca de 89,6% em relação ao poliéster, com a incorporação de 1 camada de tecido de juta bruta (14% em massa) e que com o subsequente aumento do teor de fibras módulo de até 160% superior a matriz chegou a ser obtido

para o compósito com 50% em massa de juta. Isto demonstra que a inclusão das fibras eleva a rigidez do compósito. Este comportamento já era esperado, visto que a resistência e o módulo das fibras utilizadas são superiores ao da matriz. Além disto, as fibras diminuem o movimento livre das cadeias poliméricas resultando num aumento no módulo de elasticidade do compósito com o teor de fibras (d’Almeida, 1987).

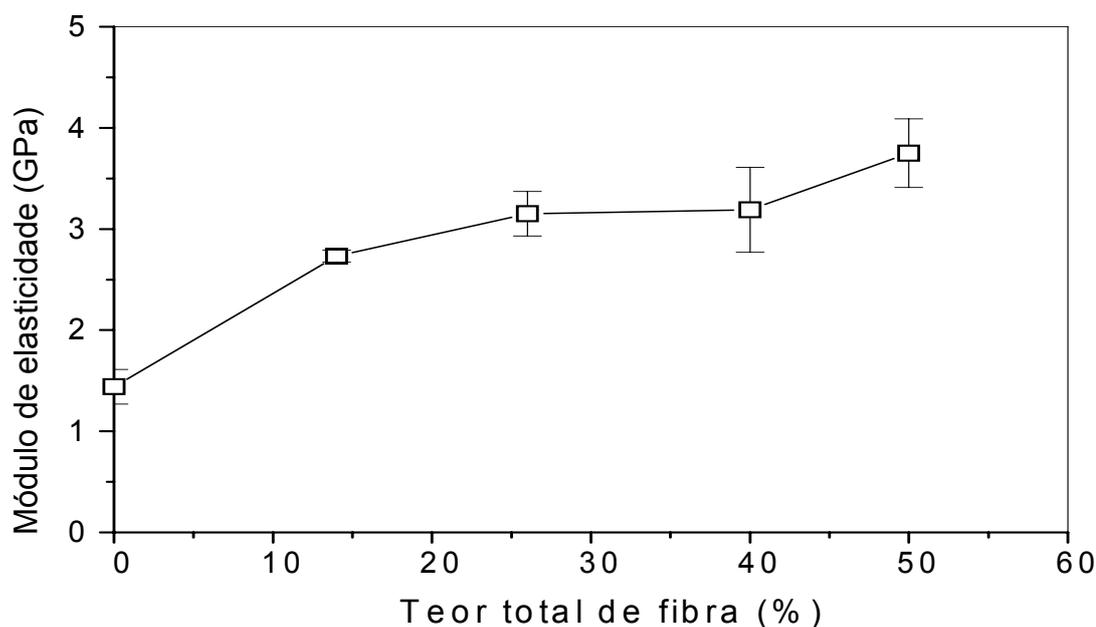


Figura 5.2 - Módulo de elasticidade em função do teor de fibra para o compósito poliéster/tecido de juta moldado por compressão.

Na Figura 5.3 evidencia-se que a incorporação do tecido de juta reduziu o alongamento em função do teor de fibra, mantendo-se inferior ao da matriz. Isto é atribuído à maior rigidez da fibra, elevando a rigidez do compósito.

Na Figura 5.4 observa-se que o módulo em flexão aumentou consideravelmente com o aumento do teor de fibras atingindo valores até 192% superiores ao da matriz, nos compósitos com 4 camadas (50% em massa) de tecido. Isto comprova o que foi discutido anteriormente, maior rigidez da fibra eleva a rigidez do compósito.

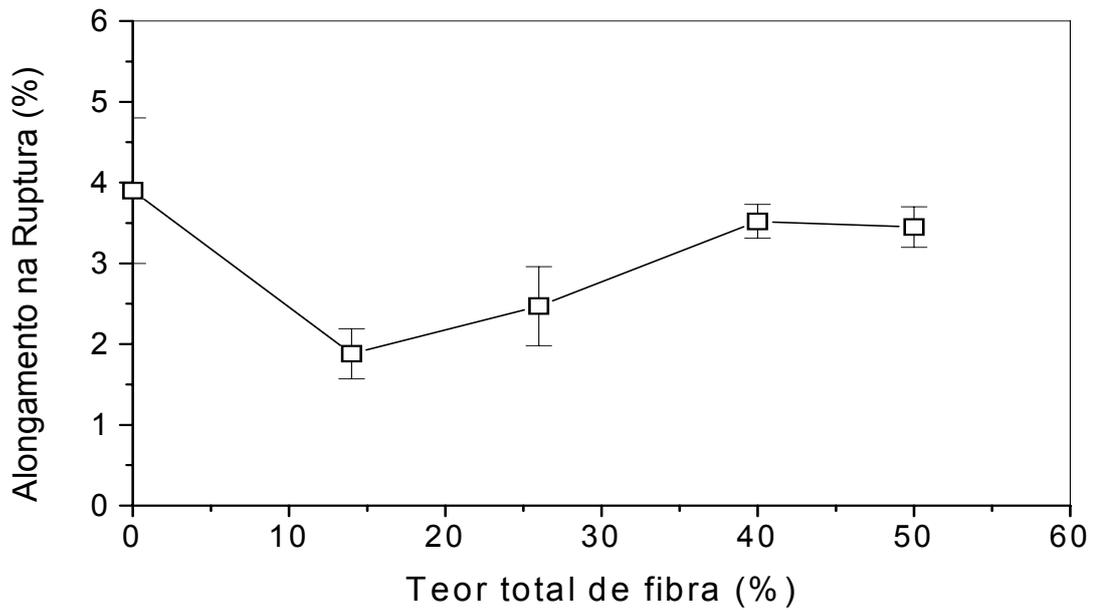


Figura 5.3 - Alongamento na ruptura em função do teor de fibra para o compósito poliéster/tecido de juta moldado por compressão.

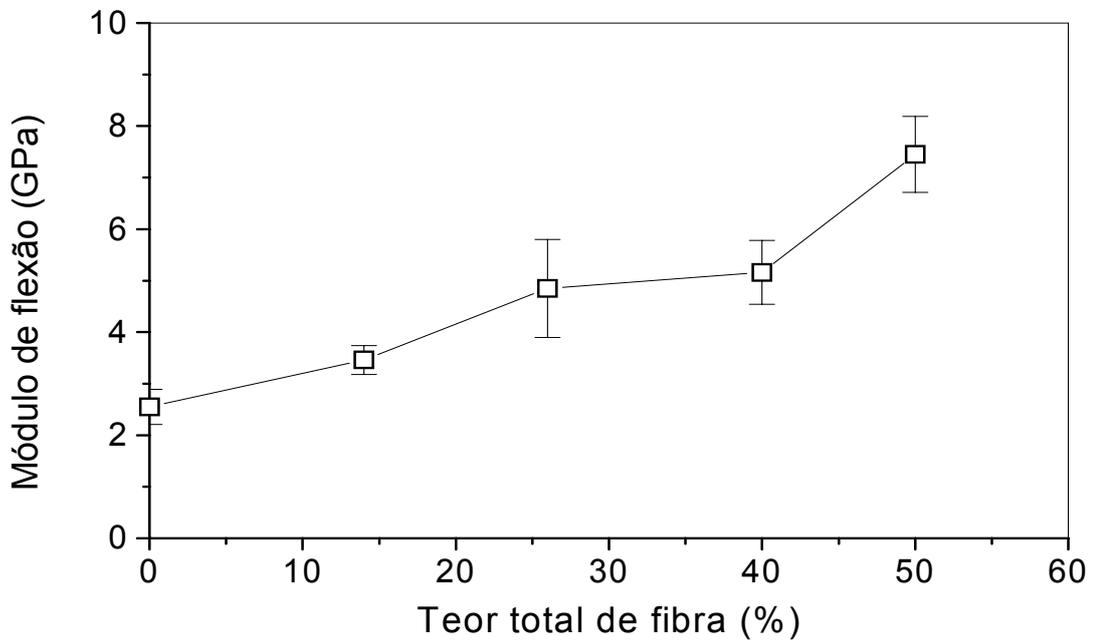


Figura 5.4 – Módulo de flexão em função do teor de fibra para o compósito poliéster/tecido de juta moldado por compressão.

Na Figura 5.5 observa-se que a resistência ao impacto dos compósitos aumentou consideravelmente com o teor de fibra. O compósito reforçado com 4 camadas de tecido de juta (50% em massa) apresentou uma resistência ao impacto 492% maior do que a da matriz. Estes dados demonstram que compósitos poliéster/tecido de juta apresentam resistência e tenacidade bastante superiores à da matriz poliéster. A inclusão de reforços rígidos tende a fragilizar materiais compósitos e reduzir sua resistência ao impacto. Porém, fibras longas, resistentes e com deformação próximas ou superiores às da matriz são capazes de absorver o impacto e divergir a frente de fratura retardando a ruptura.

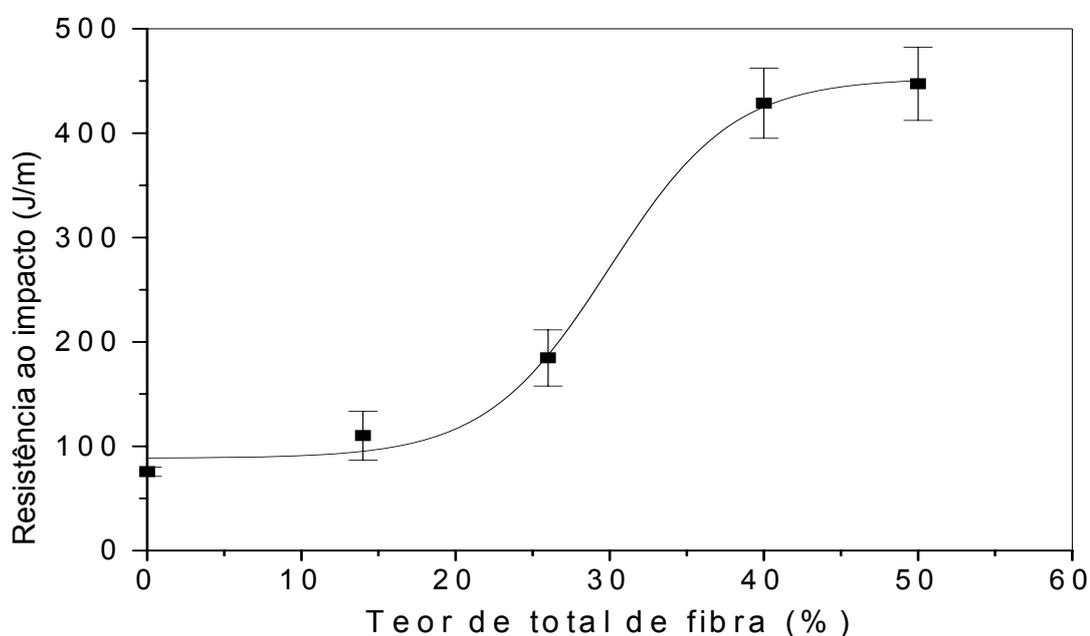


Figura 5.5 – Resistência ao impacto em função do teor de fibra para o compósito poliéster/tecido de juta moldado por compressão.

5.1.1.2 Sistema juta/vidro

Os resultados obtidos para as propriedades mecânicas de compósitos poliéster/tecido híbrido juta-vidro como uma função do teor total e individual de fibras estão apresentados na Tabela 1A (anexo) e ilustrados nas Figuras 5.6 - 5.10 em função do teor individual da fibra. Como esperado a resistência mecânica dos compósitos investigados aumentou com o teor de fibras e, as amostras testadas na direção das fibras de vidro, apresentaram resistência bem mais elevada. Este tipo de

comportamento, verificado em compósitos afins reforçados por tecidos híbridos a base de algodão/juta e juta/vidro, é reflexo da maior resistência e rigidez das fibras de vidro, comparadas à da juta (Carvalho et al., 1999, Nóbrega e Carvalho, 2000).

As Figuras 5.6a e 5.6b ilustram o efeito do tipo de tecido e do teor individual de fibras na resistência à tração dos compósitos em função da direção do teste.

Para o caso dos compósitos testados na direção da juta (Fig. 5.6a), houve um decréscimo inicial na resistência a tração em relação à matriz a baixos teores de fibra, 20% (9% de juta, 11% de vidro e 80% de poliéster insaturado), a fração volumétrica de juta corresponde a aproximadamente 8%, isto é, teor da fibra de juta (<10%), indicando com isso que o teor crítico de fibra não foi atingindo conforme os cálculos do Anexo B. Seguido de aumentos a medida em que o teor de juta aumenta, atingindo uma resistência à tração de 34%, em relação a matriz, para compósitos com um teor total de fibras de 58% (26% de juta, 32% de vidro e 42% de poliéster insaturado). Atribui-se este comportamento ao fato que a fração volumétrica de fibra de juta (aproximadamente 26%) é maior do que o volume crítico de fibra encontrado neste tipo de sistema (Anexo B).

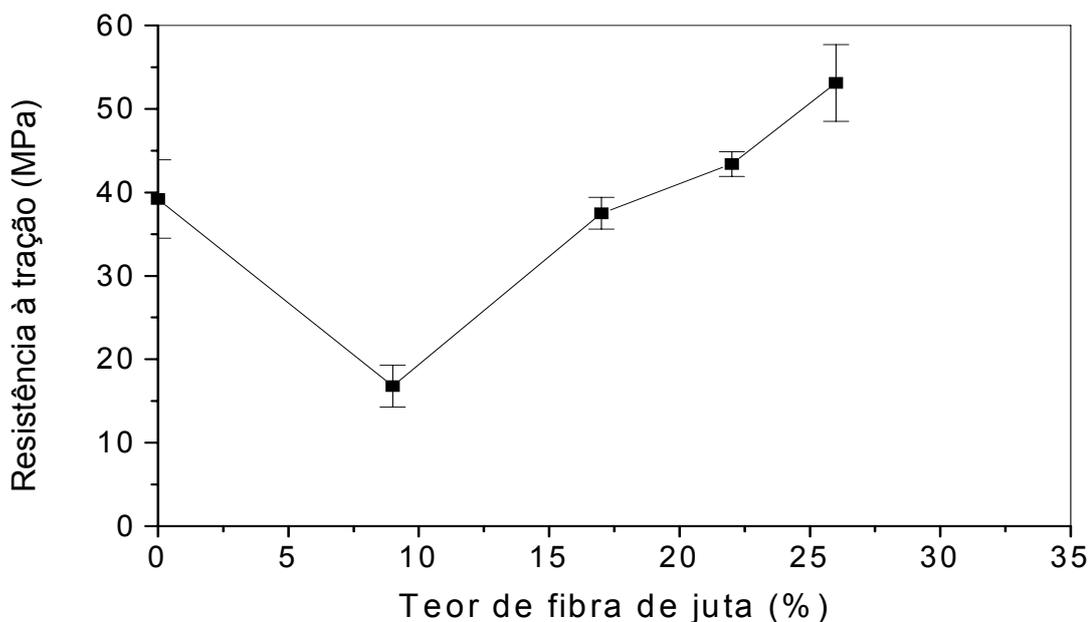


Figura 5.6a – Resistência à tração dos compósitos juta-vidro/poliéster insaturado em função do teor individual de fibras, e direção do teste. Compósito testado na direção longitudinal à juta.

A Figura 5.6b mostra os resultados obtidos para os compósitos reforçados com tecido híbrido juta/vidro, quando testado na direção das fibras de vidro.

Neste caso observa-se que, comparado aos resultados obtidos para sistemas equivalentes testados na direção das fibras de juta (Figura 5.6a), houve um aumento considerável na resistência à tração dos compósitos mesmo para baixas frações em massa. Em relação à matriz, aumentos na resistência à tração de até 494% na direção das fibras de vidro foram obtidos para compósitos com um teor total de fibras de 58% (26% de juta, 32% de vidro e 42% de poliéster insaturado). Este tipo de resultado já era esperado, pois, as propriedades mecânicas das fibras de vidro são superiores às das fibras de juta e já que são mais resistentes apresentam um volume crítico de fibra menor, como mostrado no Anexo B, além disso, no tecido híbrido juta/vidro, as fibras de vidro estão dispostas na trama, ou seja, estão perfeitamente alinhadas e não descrevem movimento ondulatório.

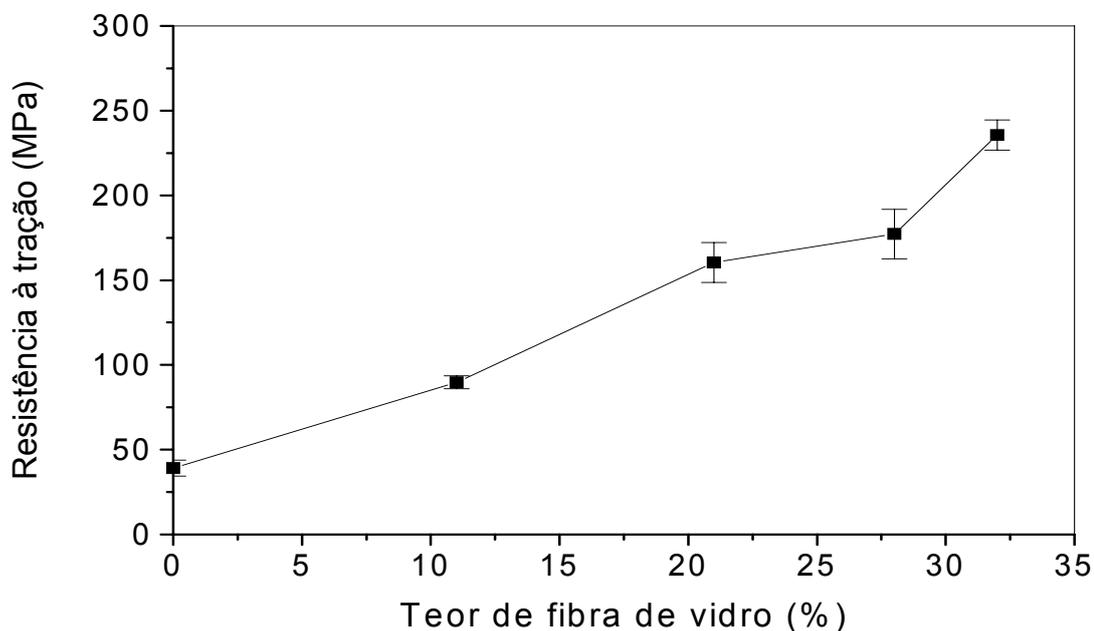


Figura 5.6b – Resistência à tração dos compósitos juta-vidro/poliéster insaturado em função do teor individual de fibras, identidade e direção do teste. Compósito testado na direção longitudinal ao vidro.

As Figuras 5.7a e 5.7b ilustram o efeito do tipo de tecido e do teor individual de fibras no módulo dos compósitos em função da direção do teste.

Fica evidenciado que o módulo dos compósitos aumentou com o aumento do teor de fibra e que os valores obtidos foram sempre superiores aos da matriz. Aumentos de até 169 e 263 % no módulo dos compósitos, com teor máximo de reforço, foram obtidos em testes realizados na direção das fibras de juta e de vidro, respectivamente. Este comportamento era esperado pois, tanto as fibras de juta quanto as fibras de vidro, possuem módulos de elasticidade mais elevados que o da matriz. Portanto, a adição destas fibras à matriz polimérica leva ao seu enrijecimento. Além disto, as fibras restringem o movimento livre das cadeias poliméricas e o resultado é um aumento no módulo de elasticidade do compósito com o teor de fibra (Carvalho et al., 1999, Nóbrega e Carvalho, 2000, Carvalho et al., 2002).

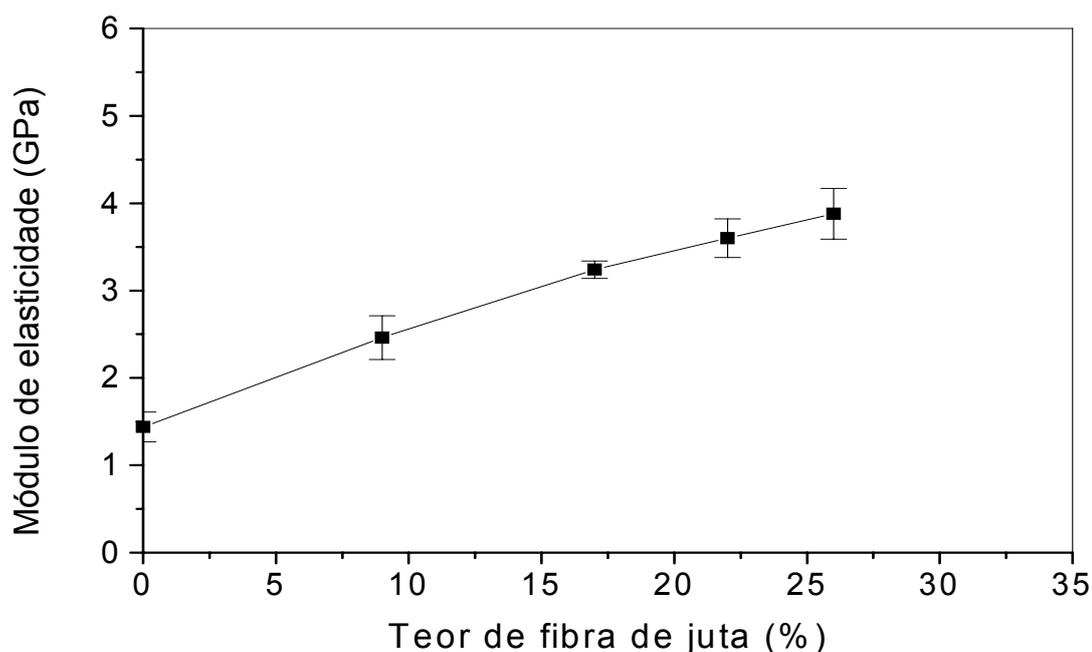


Figura 5.7a - Módulo de elasticidade dos compósitos juta-vidro/poliéster insaturado em função do teor individual de fibras, identidade e direção do teste. Compósito testado na direção longitudinal à juta.

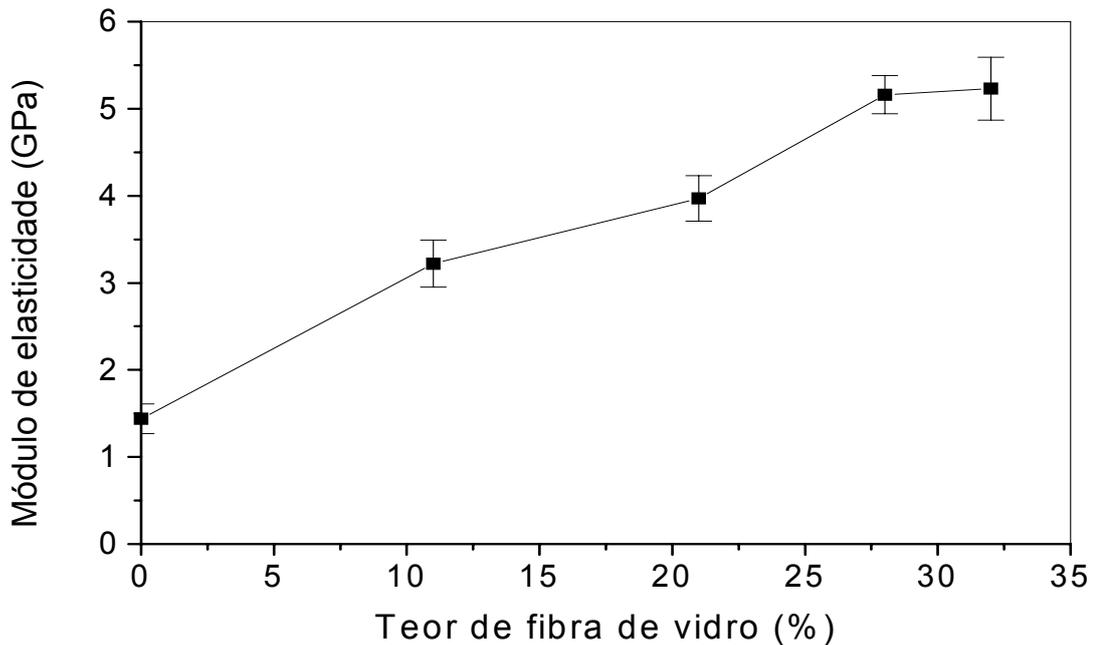


Figura 5.7b - Módulo de elasticidade dos compósitos juta-vidro/poliéster insaturado em função do teor individual de fibras, identidade e direção do teste. Compósito testado na direção longitudinal ao vidro.

As Figuras 5.8a e Fig 5.8b ilustram o efeito do tipo de tecido e do teor individual de fibras no alongamento, na ruptura dos compósitos em função da direção do teste.

O alongamento na ruptura dos compósitos tendeu a aumentar levemente com o teor de fibras e direção do teste. Resultados semelhantes foram reportados em sistemas afins (Carvalho et al., 1999; Joseph e Carvalho 1999; Nóbrega e Carvalho 2000; Carvalho et al., 2002) e foram tomados como indicativos de um aumento na tenacidade do material pela incorporação das fibras. O aumento mais significativo nesta propriedade para os compósitos testados na direção das fibras de vidro é atribuído à melhor umectação das fibras de vidro pela matriz já que estas são superficialmente tratadas.

As Figuras 5.9a e 5.9b ilustram o efeito do tipo de tecido e do teor individual de fibras no módulo de flexão dos compósitos em função da direção do teste. Os resultados indicam que aumentos de 177 e 267% em relação a matriz foram obtidos para os compósitos com um teor de fibra total de 58% (26% juta e 32% vidro) quando testado na direção perpendicular à juta e ao vidro, respectivamente.

Analisando a 5.9b observa-se que modulo de flexão é naturalmente dominado pela fibra de vidro devido as suas propriedades serem superiores.

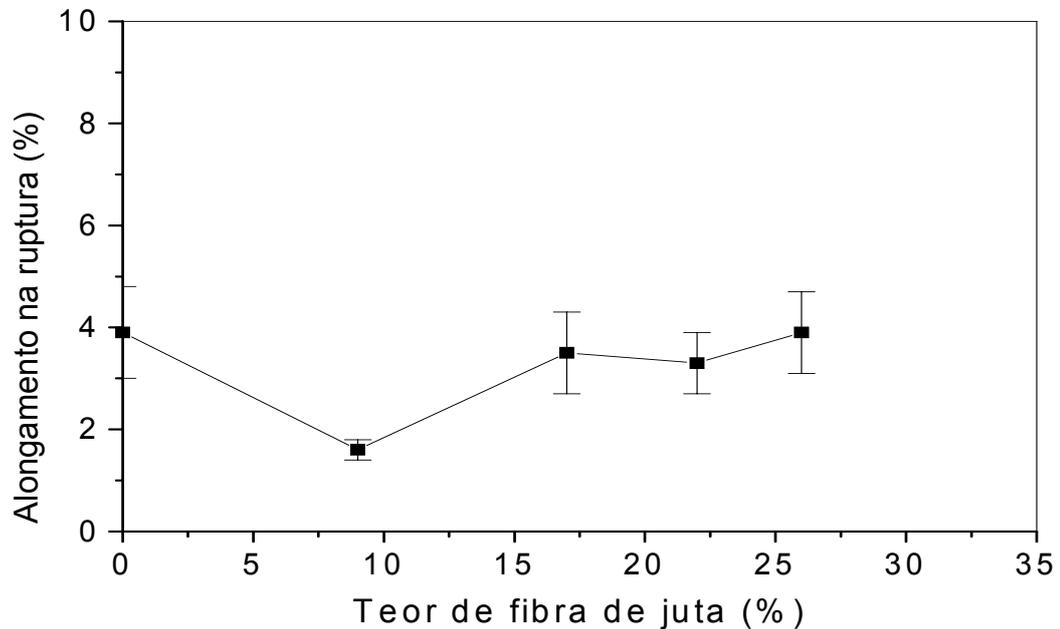


Figura 5.8a - Alongamento na ruptura dos compósitos juta-vidro/poliéster insaturado em função do teor total de fibras, identidade e direção do teste. Compósito testado na direção longitudinal à juta.

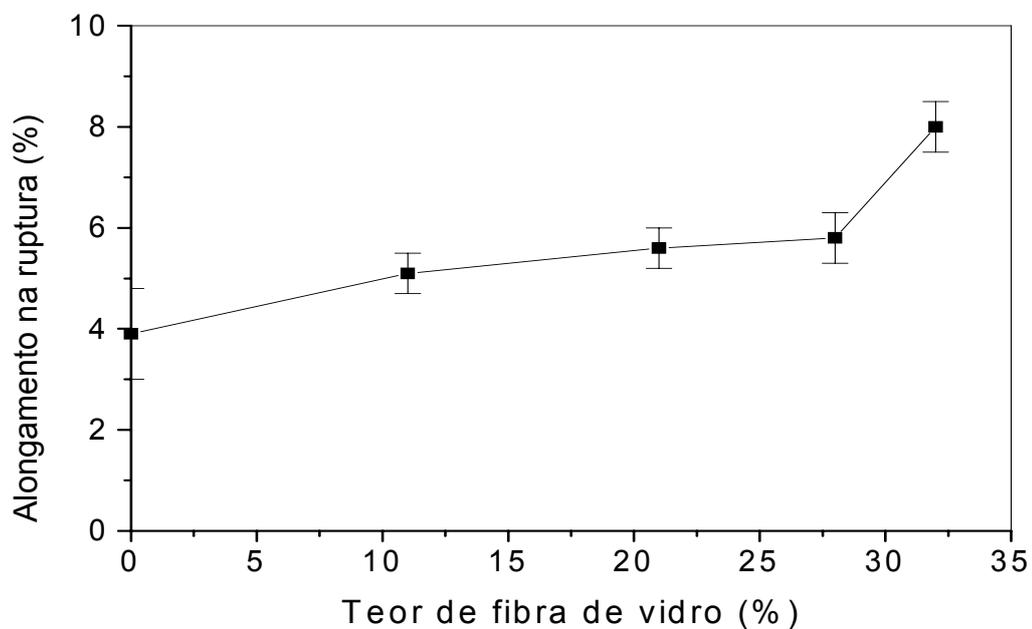


Figura 5.8b - Alongamento na ruptura dos compósitos juta-vidro/poliéster insaturado em função do teor total de fibras, identidade e direção do teste. Compósito testado na direção longitudinal ao vidro.

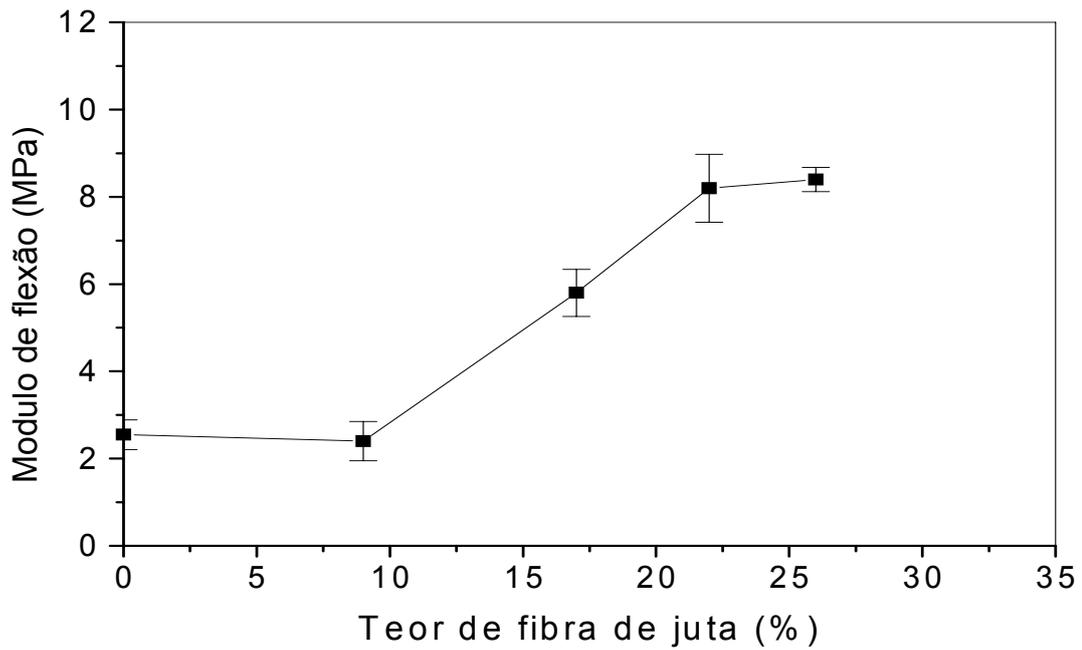


Figura 5.9a – Módulo de flexão dos compósitos juta-vidro/poliéster insaturado em função do teor total de fibras, identidade e direção do teste. Compósito testado na direção perpendicular à juta.

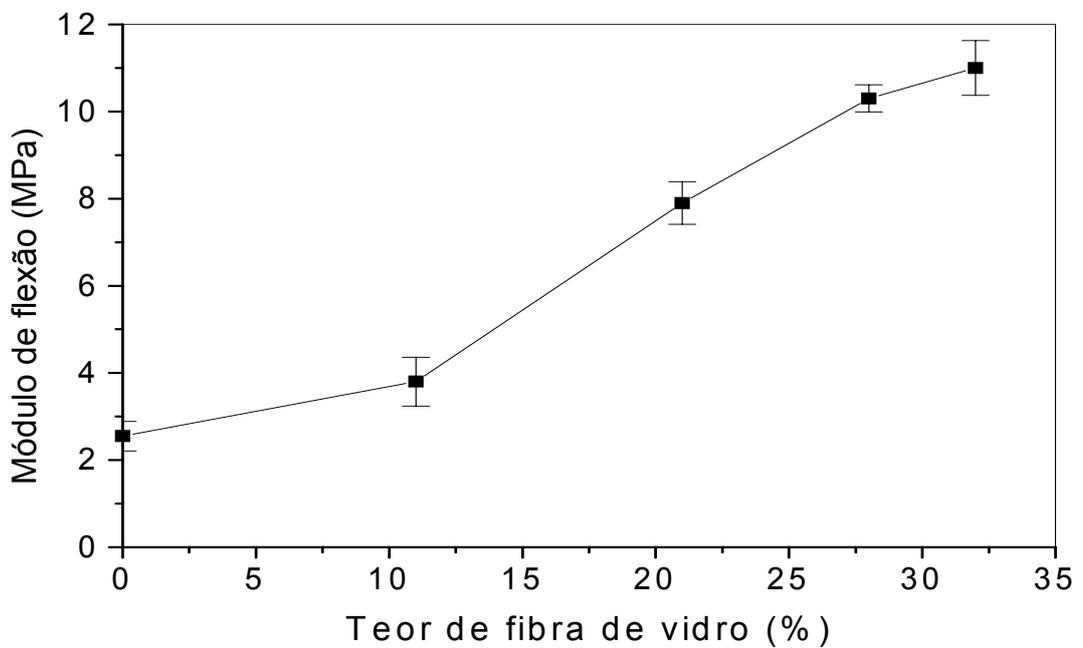


Figura 5.9b – Módulo de flexão dos compósitos juta-vidro/poliéster insaturado em função do teor total de fibras, identidade e direção do teste. Compósito testado na direção perpendicular ao vidro.

As Figuras 5.10a e 5.10b ilustram o efeito do tipo de tecido e do teor total de fibras a resistência ao impacto dos compósitos em função da direção do teste. Os resultados encontrados evidenciam que a resistência ao impacto dos compósitos é fortemente dependente do teor, identidade e orientação das fibras utilizadas como reforço no compósito. Melhores propriedades foram obtidas em amostras cujo impacto foi perpendicular à orientação das fibras de vidro. Amostras com um teor total de fibras de 50% (22% de juta e 28% de vidro) apresentaram resistência superior à capacidade da máquina com pêndulo de 5,5J. Já que as amostra com 28% de fibra de vidro não romperam, não foram realizados o teste para as amostras com teor de 32% de fibra de vidro. Estas mesmas amostras, testadas ortogonalmente à juta, apresentaram resistência ao impacto 402% maior do que a da matriz. Amostras com um teor total de fibras de 38 % (17% de juta e 21% de vidro) apresentaram resistências ao impacto de 114 e 1484% superiores às da matriz, respectivamente. Os dados obtidos indicam que compósitos poliéster/tecido híbrido de juta-vidro apresentam resistência e tenacidade bastante superiores à da matriz poliéster e que estas propriedades, apesar de otimizadas na direção do vidro, são superiores tanto para os testes conduzidos na direção do vidro quanto na direção da juta.

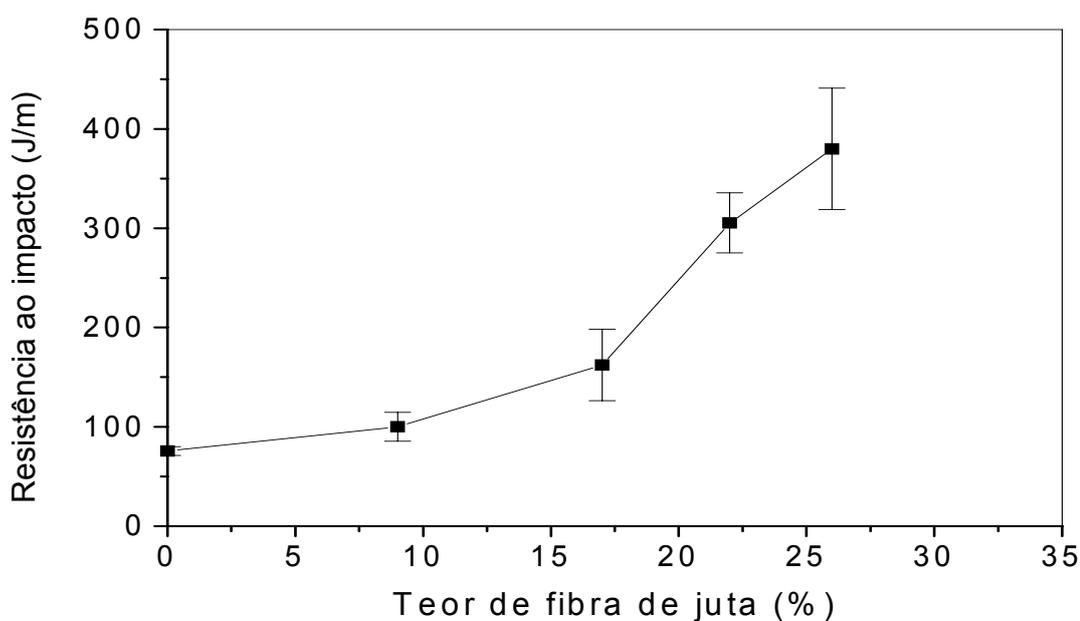


Figura 5.10a – Resistência ao impacto dos compósitos juta-vidro/poliéster insaturado em função do teor total de fibras, identidade e direção do teste. Compósito testado na direção perpendicular à juta.

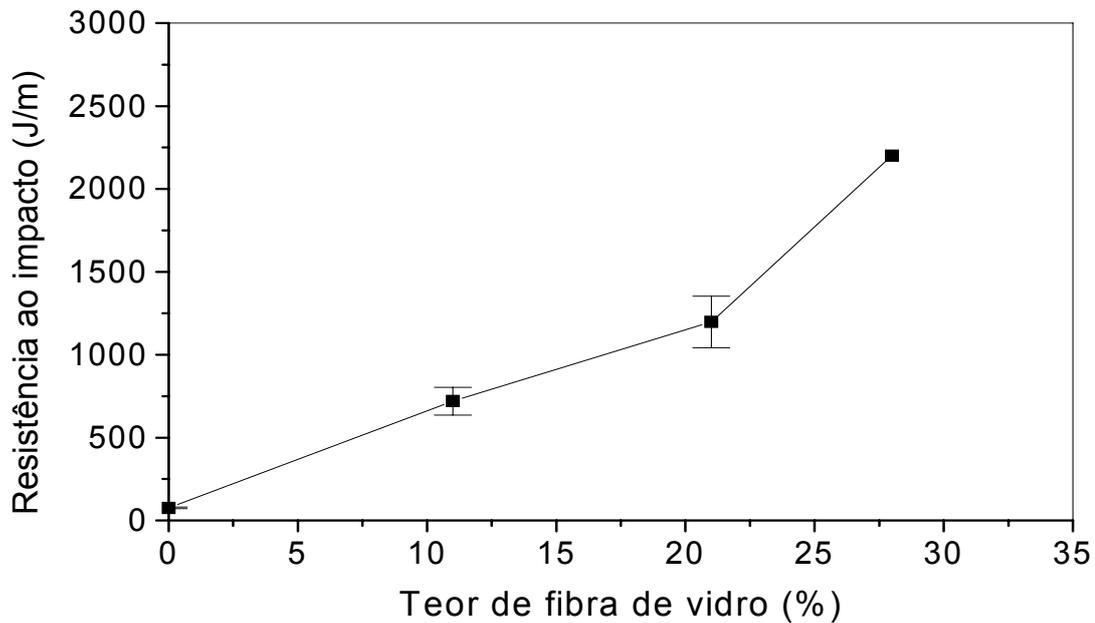


Figura 5.10b – Resistência ao Impacto dos compósitos juta-vidro/poliéster insaturado em função do teor total de fibras, identidade e direção do teste. Compósito testado na direção perpendicular ao vidro.

De forma geral fica evidenciado que a resistência mecânica dos compósitos investigados aumenta com o teor total de fibras e que, de modo geral, propriedades superiores foram obtidas para as amostras com elevados teores de fibras de vidro testadas na direção do vidro. Este tipo de comportamento era esperado e foi verificado anteriormente para compósitos reforçados por tecidos híbridos a base de algodão/juta e juta/vidro por Carvalho (1999) e Nóbrega (2000).

As propriedades mecânicas de materiais compósitos reforçados por fibras depende, principalmente, da resistência e módulo das fibras de reforço; teor, orientação e comprimento das fibras; estabilidade química e resistência da matriz e qualidade da interface fibra/matriz. Em tecidos tramados e urdidos, o grau de entrelaçamento das fibras no tecido é determinado pelo padrão da tecitura, e as fibras deformam ou dobram de maneira regular e reversível. O motivo para o elevado desempenho mecânico exibido pelos compósitos testados na direção longitudinal às fibras dispostas na trama (vidro) é atribuído ao fato que, neste arranjo, as fibras não só encontram-se mais perfeitamente orientadas e alinhadas, como também, suas propriedades são superiores às das fibras dispostas no urdume

(juta). Além disto, as fibras de vidro já são superficialmente modificadas por agente silano de modo que sua adesão com a matriz poliéster é superior à exibida pela fibra vegetal em estudo. Este conjunto de fatores - propriedades individuais, maior alinhamento e melhor adesão - facilitam a transferência efetiva de tensões da matriz para as fibras. Quando os laminados foram testados paralelamente às fibras da urdidura (juta) observou-se que a resistência dos compósitos testados nesta direção tendeu a ser inferior à apresentado quando o teste foi realizado na direção das fibras da trama, o que era esperado.

Os resultados aqui obtidos corroboram com a literatura onde vários estudos mostram que as propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras vegetais aumentam significativamente para elevados teores de fibras (Chawla e Bastos, 1979; Mohanty e Misra, 1995; Carvalho, 1996; Dash et al., 1999; Wambua et al., 2003).

5.1.2 Ensaio de sorção de Água

É crescente o interesse no uso de fibras vegetais como reforço em polímeros, pois estas fibras são de baixo custo, baixa densidade, resistentes, abundantes no País e constituem fonte renovável de matéria-prima. Um dos problemas associados a compósitos poliméricos reforçados por fibras vegetais é a presença de água, que geralmente enfraquece a interação fibra/matriz afetando as propriedades mecânicas e podendo acelerar o envelhecimento. A alta resistência à umidade e boa propriedade ao envelhecimento são melhorias fundamentais requeridas para estes materiais no intuito de ampliar mais a faixa de aplicações e competir mais eficazmente contra compósitos com fibras sintéticas (Rouison et al., 2005).

A Tabela 5.1 e 5.2 apresentam as denominações atribuída neste trabalho às amostras, tipo de material, as condições de umidificação, a composição, dimensões, valores dos teores de umidade de equilíbrio, bem como as áreas, volumes e relações área/volume e o tempo total de absorção.

Tabela 5.1 Apresentação das condições de umidificação, composição, bem como as dimensões das amostras usadas para cada experimento.

Amostra	Água	Amostras			
	T °C	Composição (%)	R ₁	R ₂	R ₃
Poliéster	Ambiente	100%Poliéster	20,00	3,00	20,00
1c Juta	Ambiente	14%J/86%P	20,00	2,15	20,00
2c Juta	Ambiente	26%J/74%P	20,00	2,30	20,00
3c Juta	Ambiente	40%J/60%P	20,00	2,40	20,00
4c Juta	Ambiente	50%J/50%P	20,00	2,55	20,00
1c Juta/Vidro	Ambiente	20%(9%J/11%V)/80%P	20,00	2,29	20,00
2c Juta/Vidro	Ambiente	38%(17%J/21%V)/62%P	20,00	2,38	20,00
3c Juta/Vidro	Ambiente	50%(22%J/28%V)/50%P	20,00	2,50	20,00
4c Juta/Vidro	Ambiente	58%(26%J/32%V)/42%P	20,00	2,82	20,00

Tabela 5.2 Apresentação dos teores de umidade, dados geométricos e tempo final de absorção de cada amostra

Amostra	M _e (base.seca)	S _o x 10 ⁴ (m ²)	V _o x 10 ⁷ (m ³)	S _o /V _o (m ² /m ³)	Tempo (horas)
Poliéster	1,255	5,20	12,0	433,3	600
1c Juta	5,564	4,86	8,60	565,1	840
2c Juta	8,587	4,92	9,20	534,8	480
3c Juta	12,382	4,96	9,60	516,7	240
4c Juta	15,017	5,02	10,20	492,2	312
1c Juta/Vidro	3,057	4,92	9,16	536,7	312
2c Juta/Vidro	5,665	4,95	9,52	520,2	504
3c Juta/Vidro	7,831	5,00	10,00	500,8	840
4c Juta/Vidro	9,346	5,13	11,28	454,6	1080

Na Figura 5.11 está representada a curva de sorção de água em função do tempo para amostra de poliéster insaturado. Nas Figuras 5.12 – 5.15 estão representadas as curvas de sorção de água em função do tempo para amostras de compósitos de matriz poliéster insaturado reforçados por tecido tramado de juta.

Verifica-se, após análise das Figuras 5.11 - 5.15, que a sorção de água é rápida nos estágios iniciais (primeiras 50h), diminuindo e tendendo ao equilíbrio em tempos mais longos de exposição. Observa-se também, que para os compósitos (Figuras 5.12 – 5.15), um aumento no teor de umidade e diminuição no tempo para atingir o equilíbrio é encontrado com o aumento no teor de fibra. Obviamente, o aumento no teor de umidade apresentado por estes compósitos foi atribuído ao fato que a fibra de juta é higroscópica e que os compósitos contêm menos resina quando comparado com a resina pura (poliéster insaturado).

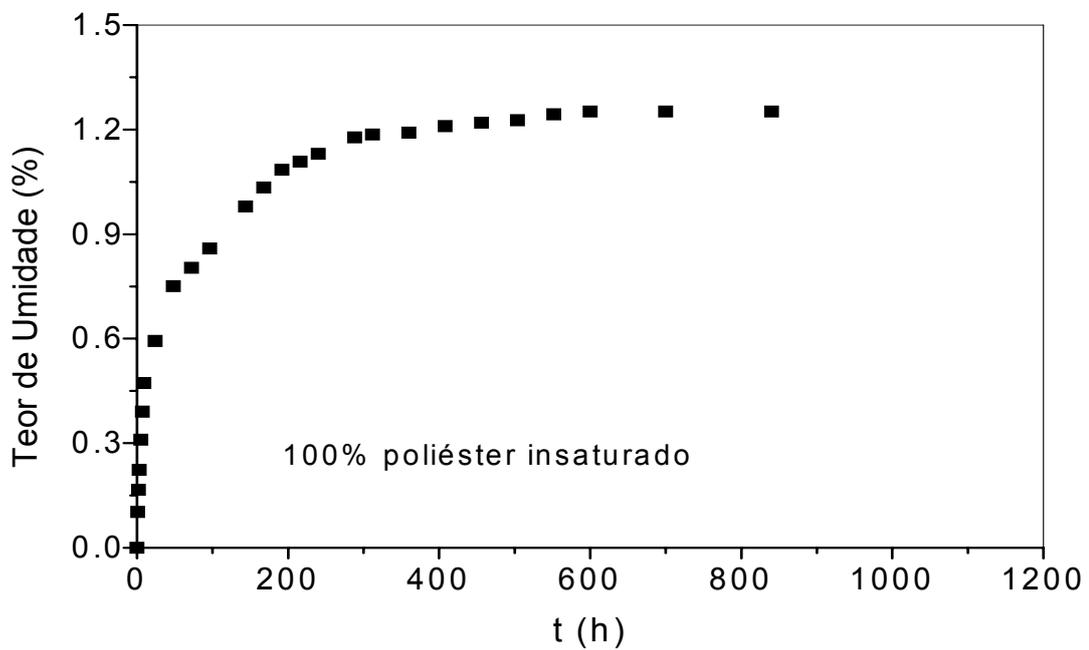


Figura 5.11 - Cinética de sorção de água da resina poliéster insaturado.

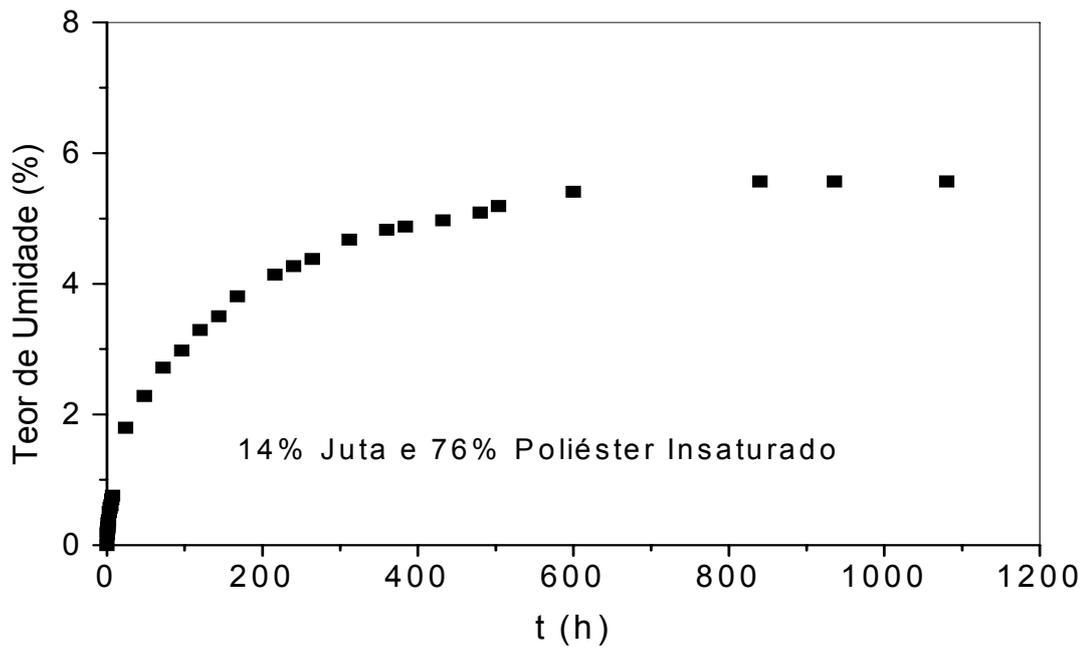


Figura 5.12 - Cinética de sorção de água dos compósitos poliéster reforçados por 1 camada de tecido de juta.

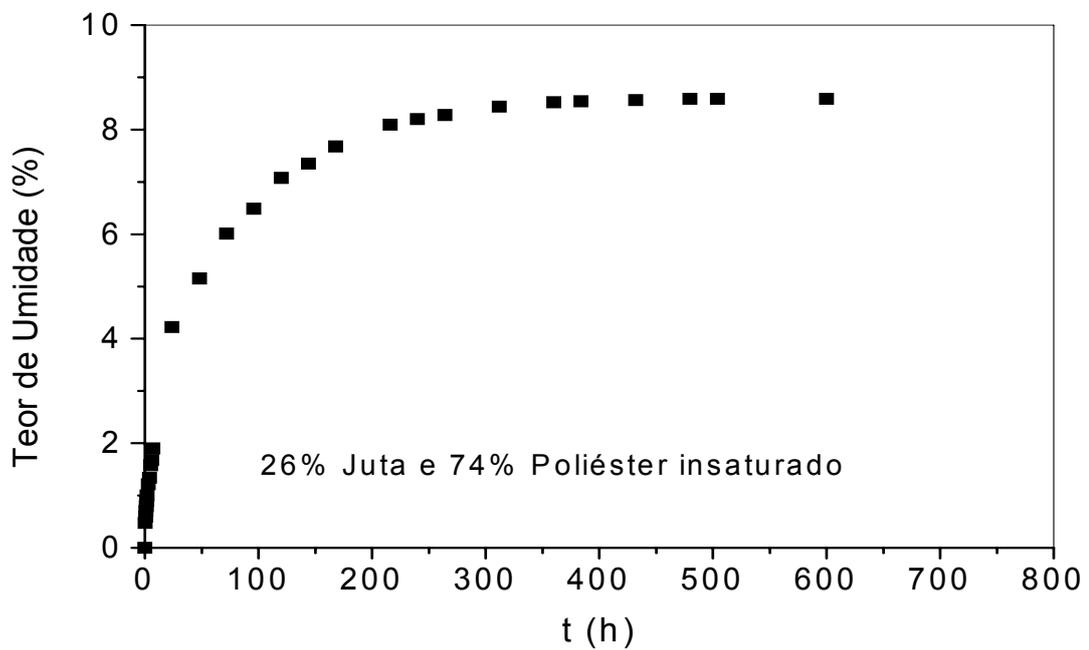


Figura 5.13 - Cinética de sorção de água dos compósitos poliéster reforçados por 2 camadas de tecidos de juta.

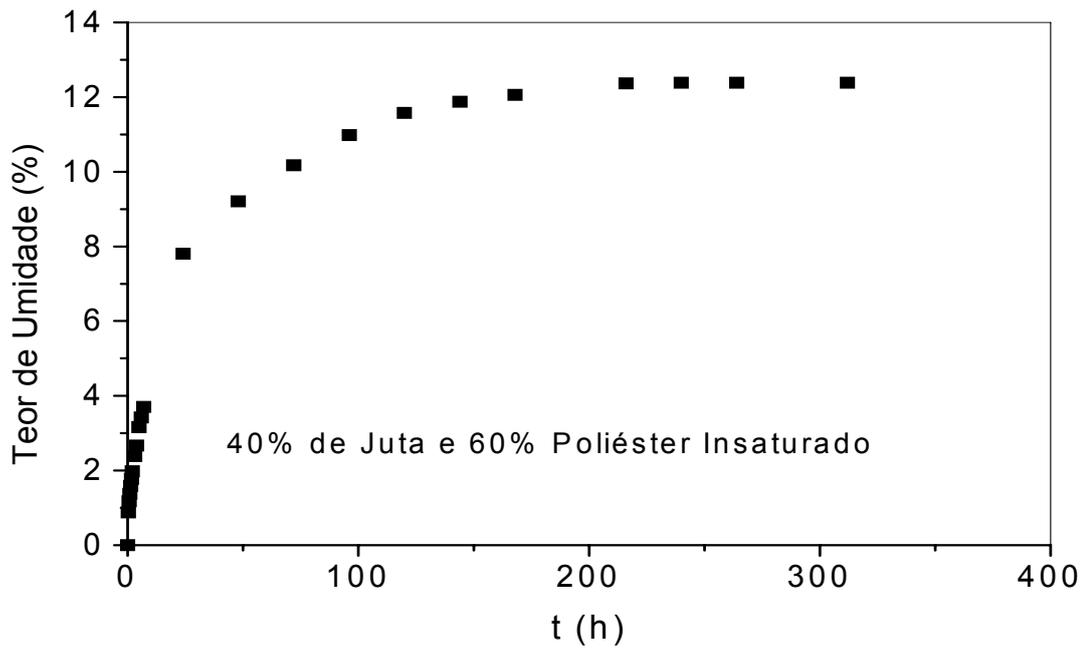


Figura 5.14 - Cinética de sorção de água dos compósitos poliéster reforçados por 3 camadas de tecidos de juta.

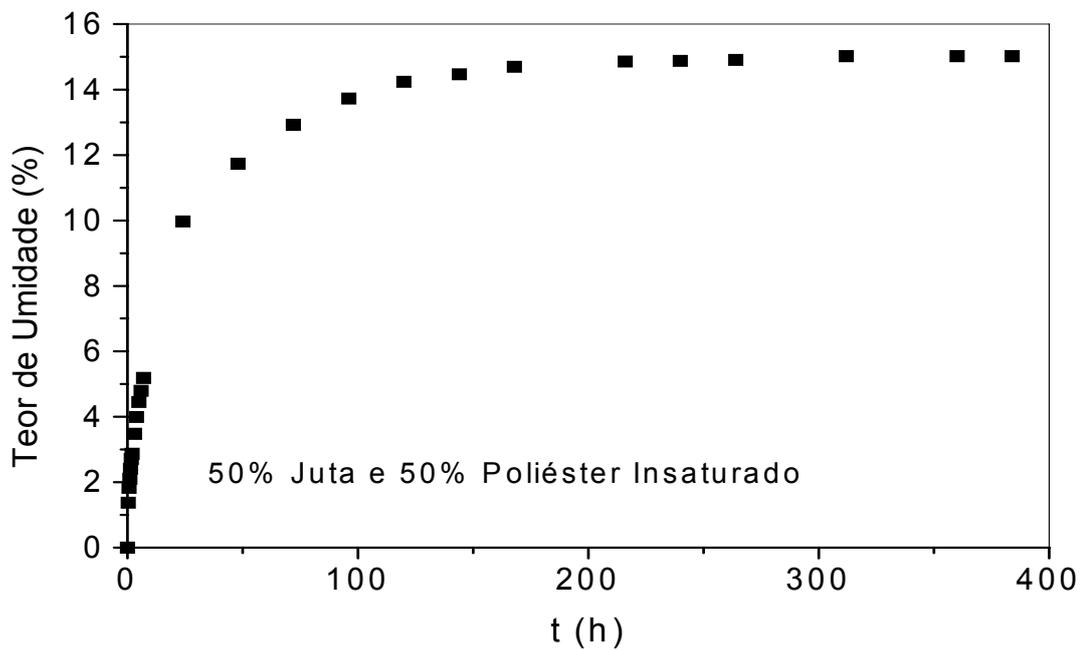


Figura 5.15 - Cinética de sorção de água dos compósitos poliéster reforçados por 4 camadas de tecidos de juta.

Já para os compósitos reforçados por tecidos híbridos juta-vidro (Figuras 5.16 – 5.19), os resultados indicam que, apesar da capacidade de sorção de água ter aumentado com o teor total de fibras no sistema, o processo apresenta taxas de

absorção menores que no caso quando o teor de vidro é nulo. Isto indica que o início do processo é mais lento. Esta diminuição no nível de sorção de água dos compósitos era esperada já que, devido à natureza hidrofóbica da fibra de vidro, os sítios de absorção de água devem estar praticamente todos localizados na juta.

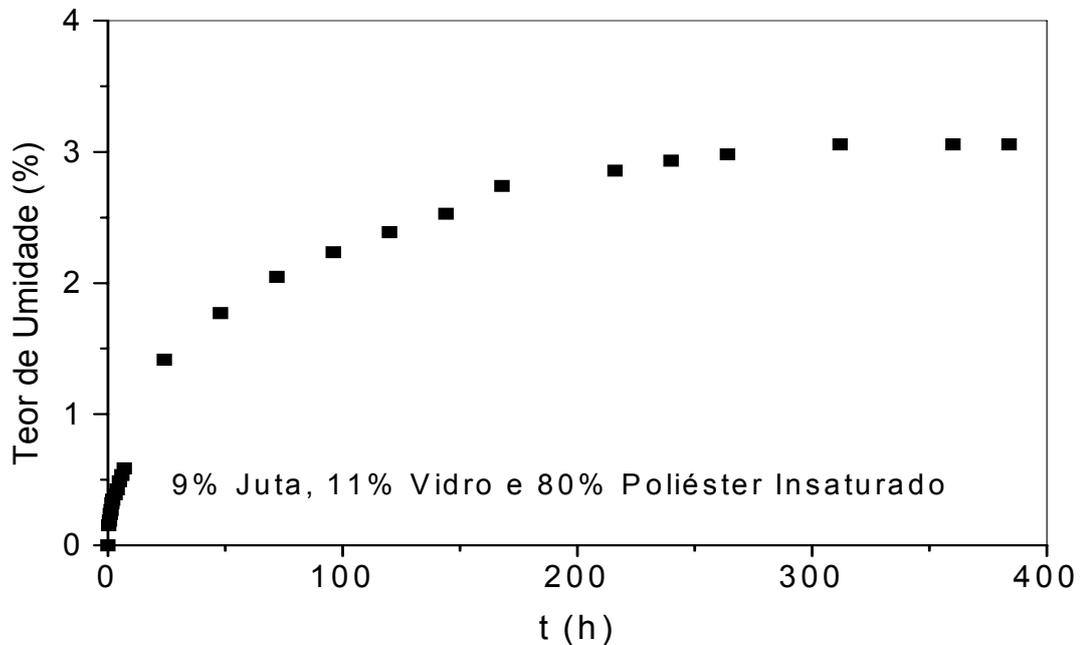


Figura 5.16 - Cinética de sorção de água dos compósitos reforçados por 1 camada de tecido híbrido juta/vidro.

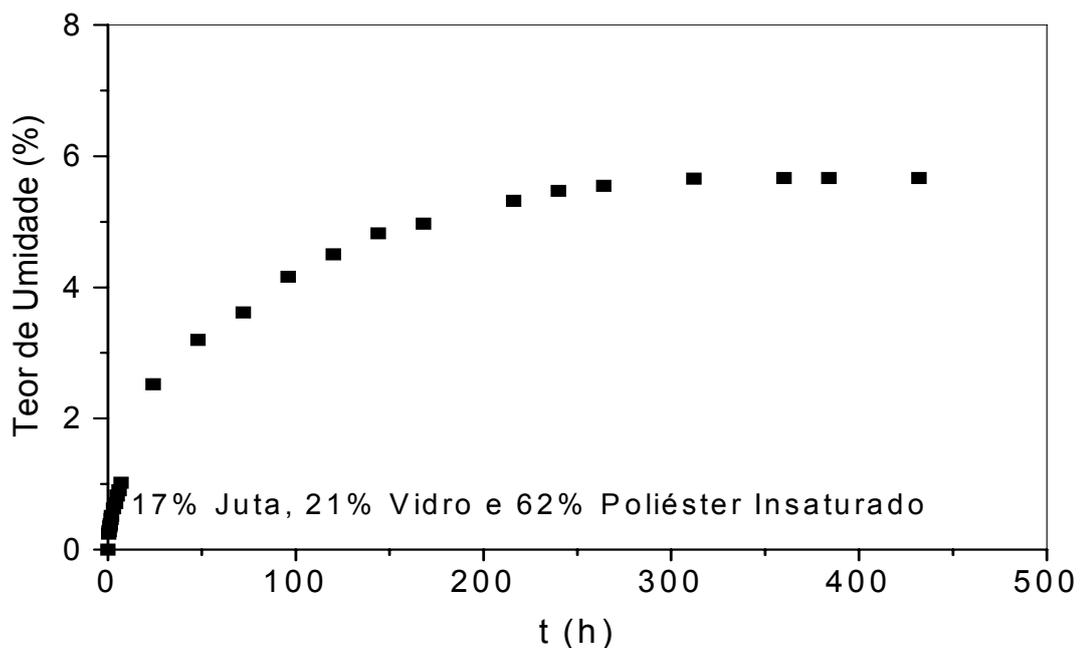


Figura 5.17 - Cinética de sorção de água dos compósitos reforçados por 2 camadas de tecidos híbrido juta/vidro.

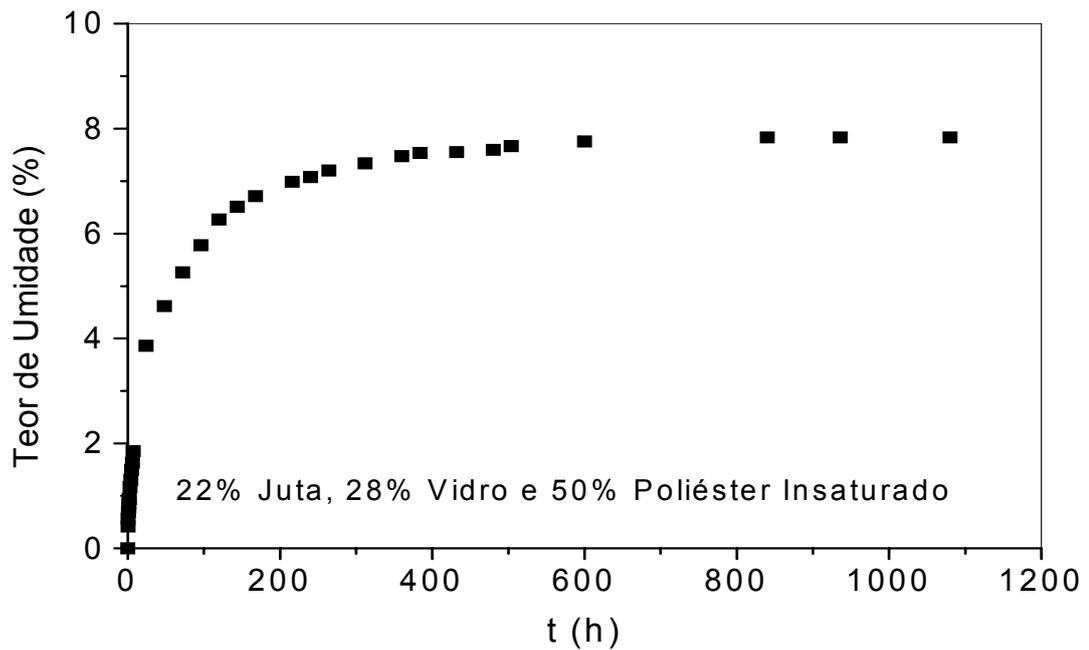


Figura 5.18 - Cinética de sorção de água dos compósitos poliéster reforçados por 3 camadas de tecido híbrido juta/vidro.

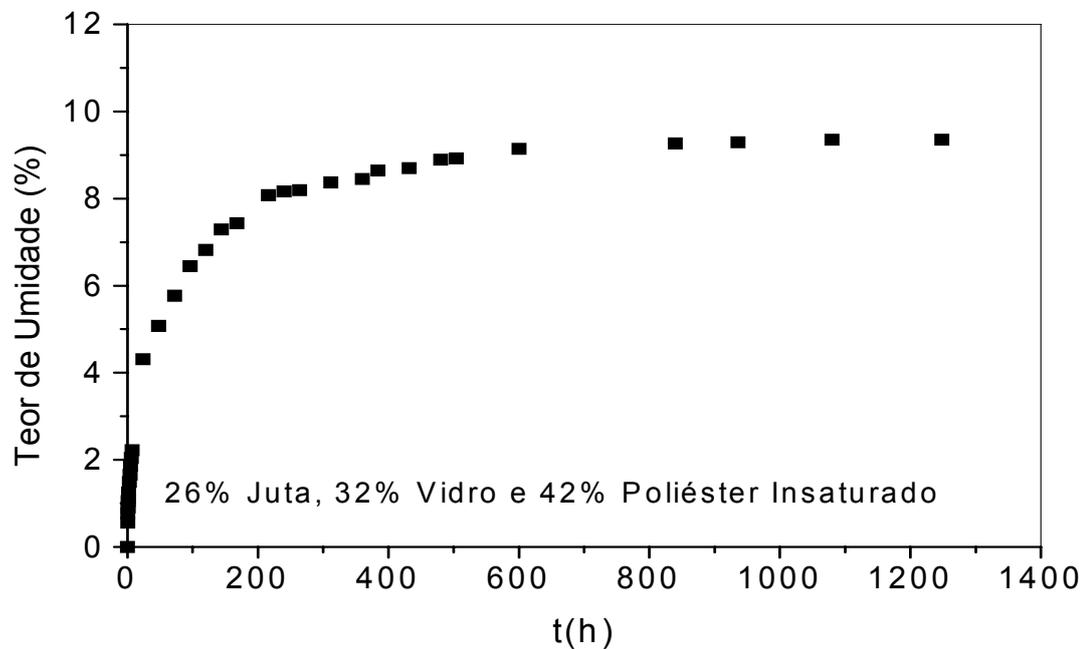


Figura 5.19 - Curvas da cinética de sorção de água dos compósitos poliéster reforçados por 4 camadas de tecidos híbrido juta/vidro.

As Figuras 5.20a e 5.20b mostram uma comparação entre os dois sistemas estudados. Ficou evidenciado que a sorção de água dos compósitos reforçados por tecidos híbridos juta-vidro foi sempre inferior ao dos compósitos poliéster/juta. Os resultados indicam que, enquanto a matriz poliéster insaturado chegou a absorver aproximadamente 1,3 % de água, os compósitos reforçados por 1 a 4 camadas de tecido de juta absorveram de 5 a 15 % de água (Figura 5.20a) Isto equivale a um acréscimo de 200% na absorção de água com o aumento do teor de fibras de 14 % para 50% em peso. Estes resultados são coerentes com os apresentados por Rao, (1981), Semsarzadeh (1984), Semsarzadeh et al. (1986), Carvalho (2000), Cavalcanti et al. (2001) e Sreekala, et al. (2002) que atribuem o aumento no nível de sorção de água dos compósitos reforçados por fibras vegetais à natureza hidrofílica e à permeabilidade deste tipo de reforço. Além do aumento da quantidade de água absorvida pelo material, percebe-se um decréscimo do tempo de processo até atingir o equilíbrio.

Já para o sistema híbrido (Figura 5.20b) a absorção de água para os compósitos reforçados por 1 a 4 camadas de tecidos híbridos juta-vidro absorveram 3 a 9% de água, equivalendo um acréscimo de 200% na absorção de água com o aumento do teor de fibra total de 20% para 58% em peso. Com isto, mostra-se que a hibridização de fibras naturais com fibras sintéticas resistentes, por exemplo, fibra de vidro, reduz a % de água absorvida dos compósitos. Alguns estudos têm sido publicados sobre a eficácia da hibridização no comportamento de absorção de água em compósitos (Thwe e Liao, 2002; Sreekala et al. 2002).

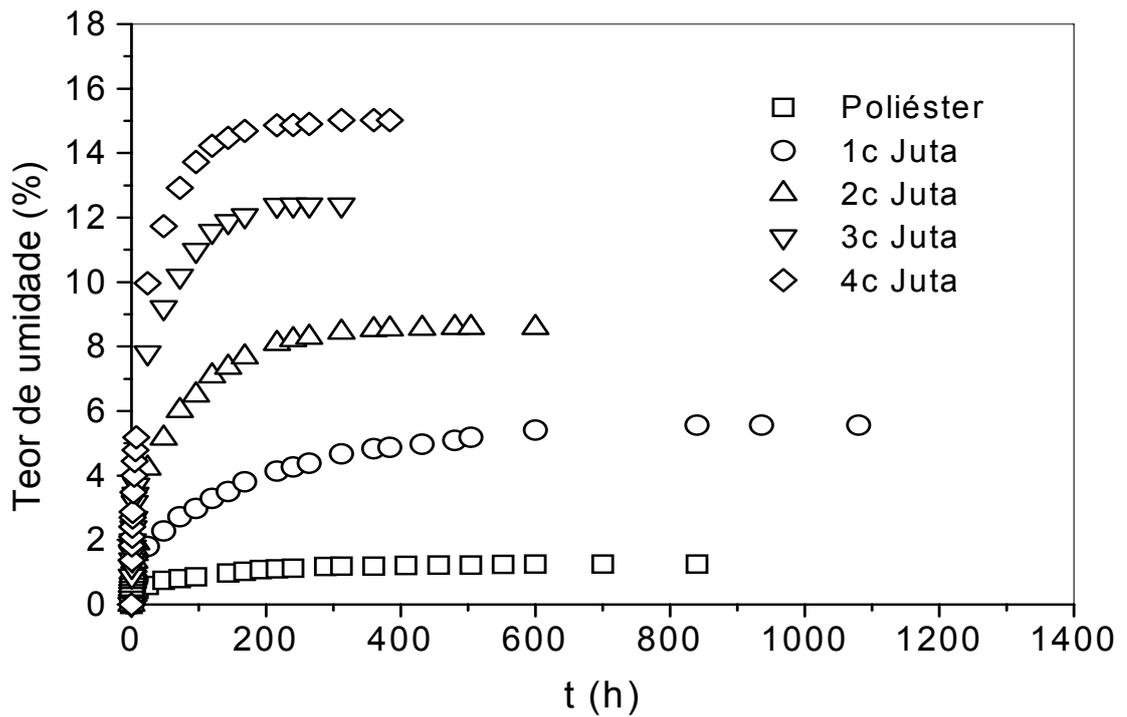


Figura 5.20a - Cinética de sorção de água dos compósitos poliéster reforçados por tecidos de juta.

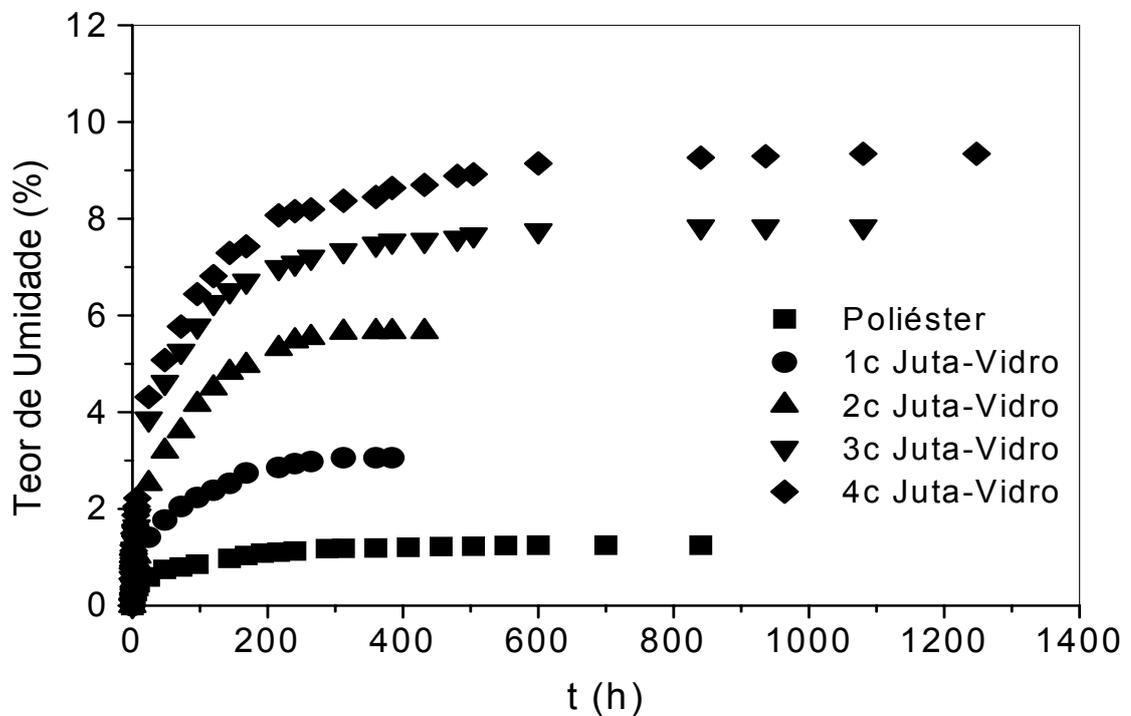


Figura 5.20b - Cinética de sorção de água dos compósitos poliéster reforçados por tecidos de híbrido juta-vidro.

Para uma melhor compreensão do efeito da presença de juta nos compósitos reforçados pelos tecidos de juta e juta/vidro, na capacidade de sorção de água, na Figura 5.21 estão representados os valores de teor de água no equilíbrio, obtidos experimentalmente, em função do teor de fibra de juta. Verifica-se que a sorção de água que é aproximadamente 3% no compósito híbrido com baixo teor de fibra de juta (9% em peso), aumenta até valores que podem alcançar 15% nos compósitos contendo elevada proporção de tecido de juta (50% em peso de fibras). Como se observa, a capacidade de sorção de água aumenta linearmente com o teor de juta, independentemente da presença ou não de vidro no compósito. Este comportamento já era esperado, devido à maior afinidade pela água do material celulósico.

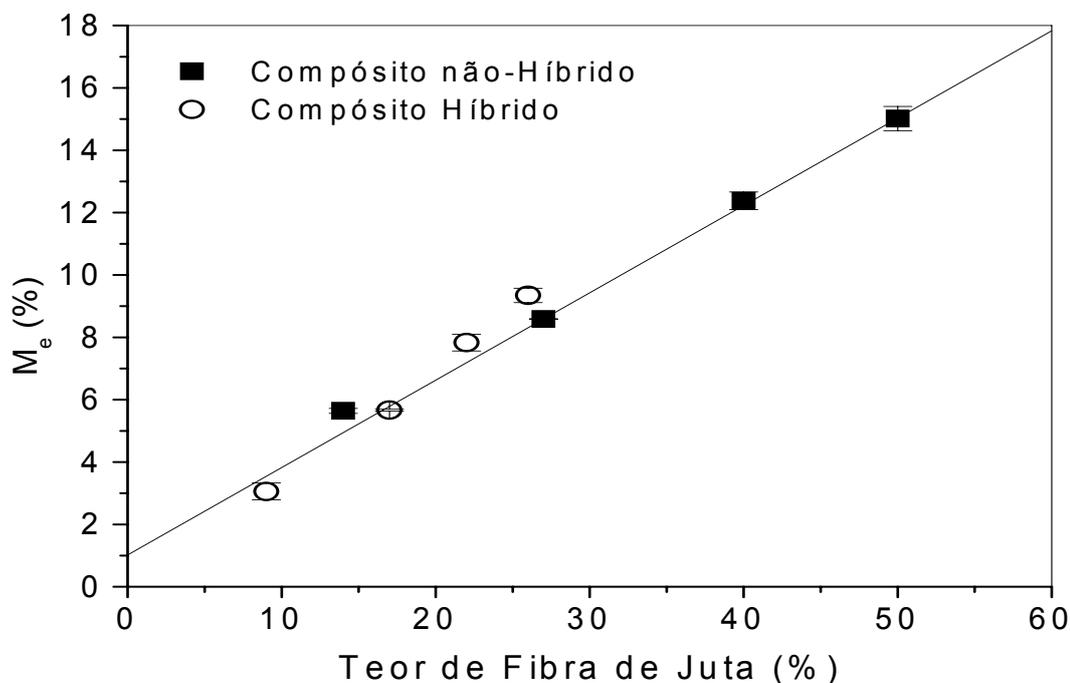


Figura 5.21 - Efeito do teor de fibras no teor de água no equilíbrio de compósitos poliéster/tecido de juta e poliéster/tecido híbrido juta-vidro.

Nas Figuras 5.22a e 5.22b mostram-se a influência da fibra de vidro nos compósitos com teores de fibra total similares. Comparando os compósitos não-híbridos com os compósitos híbridos com teores de fibra total similares (40 e 50%) observa-se uma diminuição na sorção de água em aproximadamente 118 e 92%, respectivamente. Isto já era esperado devido à natureza hidrofóbica da fibra de vidro. Isto mostra que a hibridização de fibras vegetais com fibras sintéticas, por

exemplo, com fibra de vidro, é eficaz para reduzir a absorção de umidade dos compósitos.

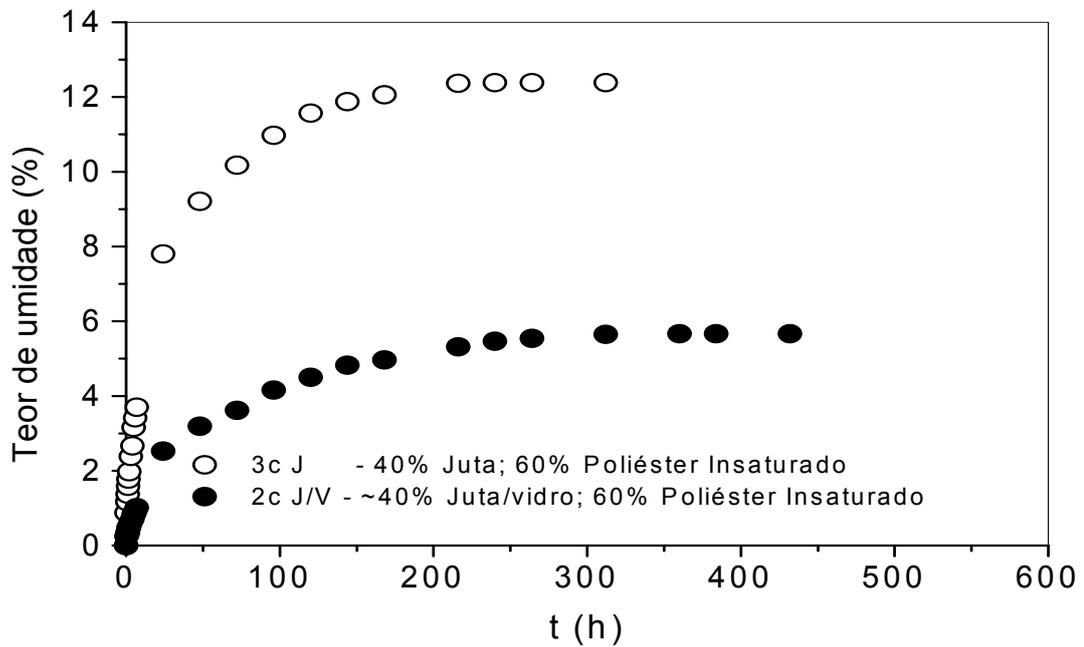


Figura 5.22a - Cinética de sorção de água dos compósitos poliéster reforçados por tecidos de juta e compósitos reforçados por tecidos híbrido juta/vidro.

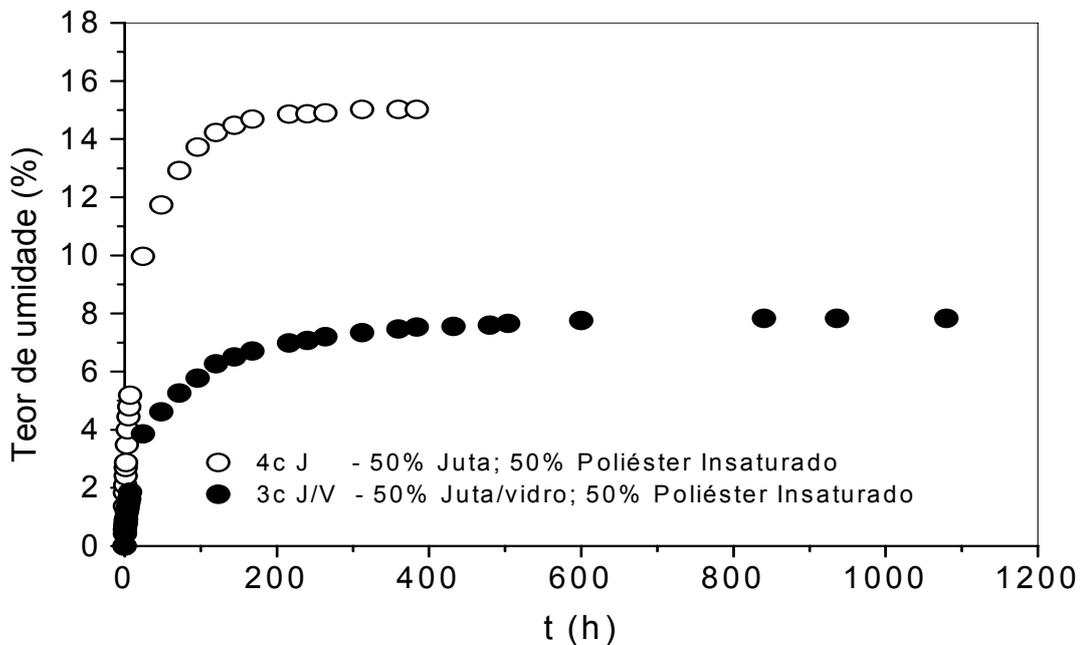


Figura 5.22b - Cinética de sorção de água dos compósitos poliéster reforçados por tecidos de juta e compósitos reforçados por tecidos híbrido juta/vidro.

A Figura 5.23 mostra a sorção de água para compósitos reforçados por tecidos de juta (26%) e de tecidos híbridos (26% juta e 32% de vidro). Os dados mostram que a quantidade de água absorvida pelos compósitos com similares teores de juta foi equivalente, indicando com isto que, a sorção de água destes compósitos foi dominada pelo aumento do teor de juta conforme identificado na Figura 5.2.1.

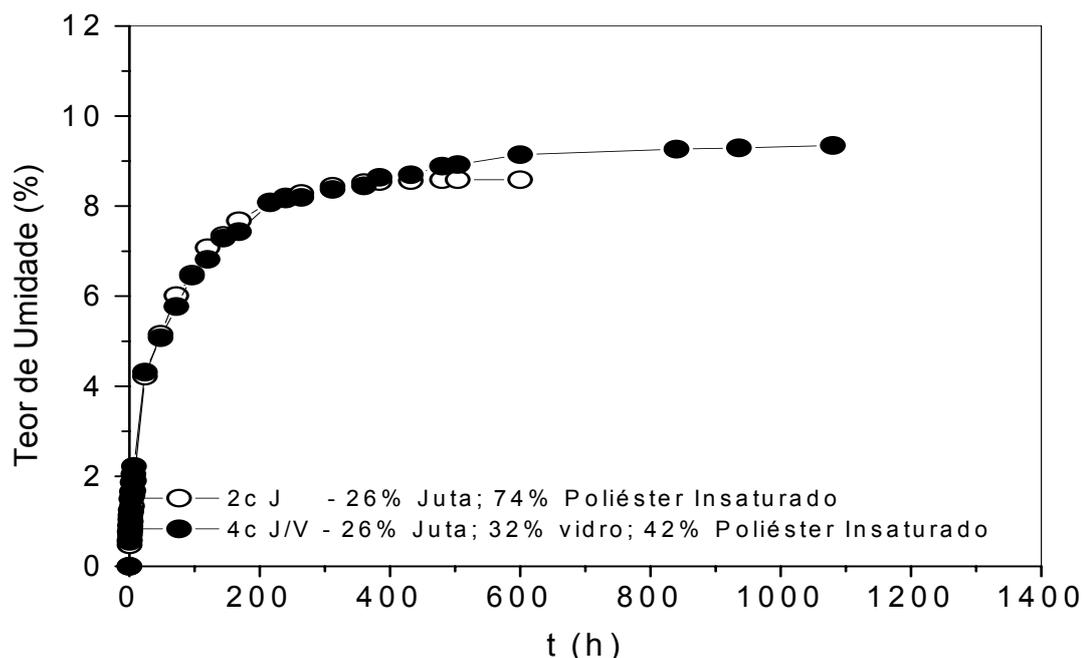


Figura 5.23 – Curvas de sorção de água em função do teor similar de juta

5.2 Aplicação dos modelos empíricos e numérico à umidificação de compósitos

5.2.1 Estimação não-linear dos parâmetros

Para obter os coeficientes de difusão durante o processo de absorção de água no sólido, tornou-se necessário obter a equação que se ajustasse aos pontos experimentais do teor de umidade ao longo do processo. A Tabela 5.3 apresenta os valores dos parâmetros obtidos bem como os coeficientes de correlação para todos os testes realizados. É evidenciado, a excelente concordância entre os pontos preditos e experimentais caracterizados pelo coeficiente de correlação e variância encontrados. 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.

Tabela 5.3 - Parâmetros da Equação (4.22) ajustados aos dados experimentais

Amostras	PARÂMETROS							
	A_1	k_1	A_2	k_2	A_3	k_3	S^2	R
Poliéster	0,2892455	-0,0074614	0,3187493	-0,0075275	0,388658	-0,184294	0,99909	0,99955
1c Juta	0,719141	-0,004699	0,0244924	-7,64168	0,2563584	-0,0693217	0,99964	0,99982
2c Juta	0,6365236	-0,0105853	0,0483983	-7,795354	0,3150616	-0,0819018	0,99957	0,99978
3c Juta	0,5239936	-0,016525	0,0690569	-5,083985	0,4069515	-0,0879623	0,99931	0,99965
4c Juta	0,451905	-0,0170548	0,1010093	-4,010743	0,446802	-0,0874444	0,99973	0,99986
1c Juta/Vidro	0,2693355	-0,0779599	0,0482237	-5,337117	0,682381	-0,0103272	0,99832	0,99916
2c Juta/Vidro	0,245505	-0,009117	0,2919117	-0,0774701	0,4385524	-0,009139	0,99887	0,99944
3c Juta/Vidro	0,523672	-0,0072312	0,0578951	-3,970157	0,4183077	-0,0656885	0,99944	0,99972
4c Juta/Vidro	0,5370046	-0,005533	0,0799745	-2,55928	0,381976	-0,063582	0,99902	0,99951

As Figuras 5.24 a 5.32 ilustram as cinéticas de sorção de água obtida pelo sistema não-híbrido poliéster/tecido juta e pelo sistema híbrido poliéster /tecido juta-vidro obtidas experimentalmente e comparadas com a curva ajustada pela equação (4.22) proposta. Observa-se uma pequena variação nos dados obtidos para tempos longos (principalmente para o sistema híbrido), que pode ser atribuída a vários fatores como: natureza do compósito estudado, isto é, o tecido híbrido que foi utilizado neste compósito é constituído por dois materiais, um de natureza higroscópica (juta) e o outro com alta resistência à umidade (vidro), a falta de uniformidade no diâmetro das fibras de juta usada na confecção do tecido híbrido, e a variação de temperatura durante as medições, mesmo os testes sendo realizado a temperatura ambiente.

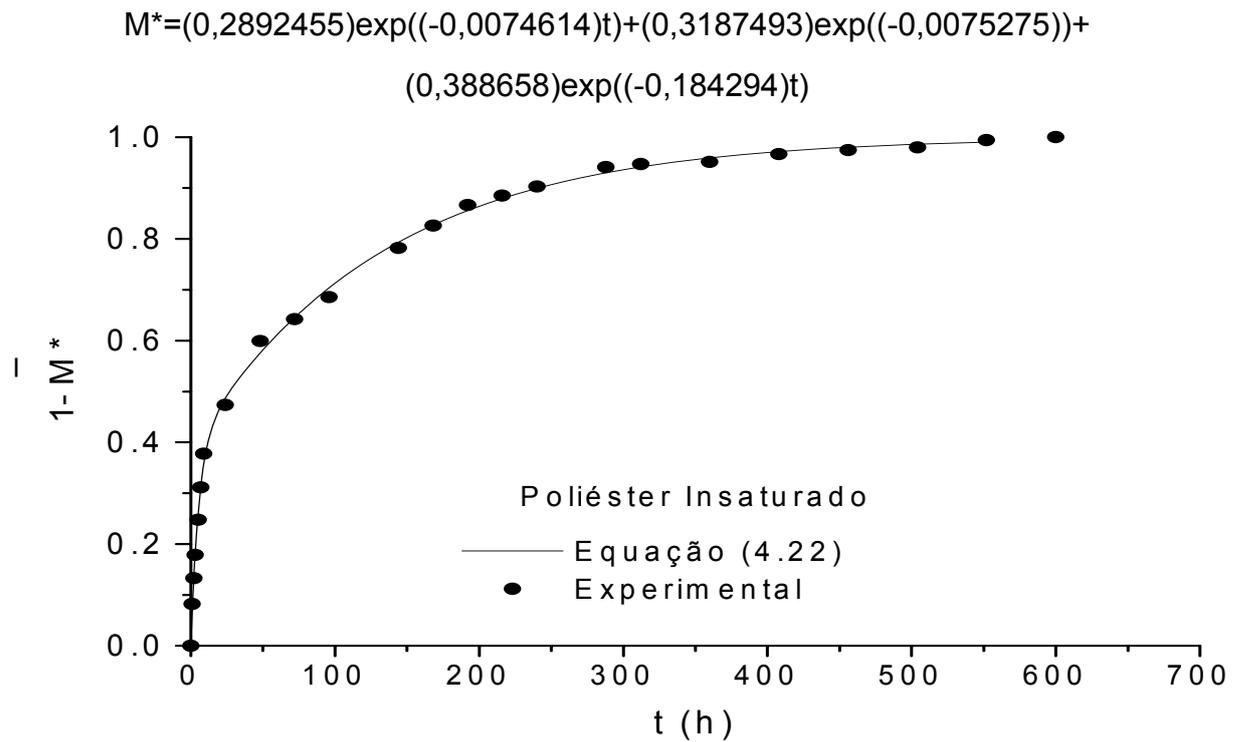


Figura 5.24 – Comparação entre teores de umidade médios da resina, experimental e predito pela equação (4.22).

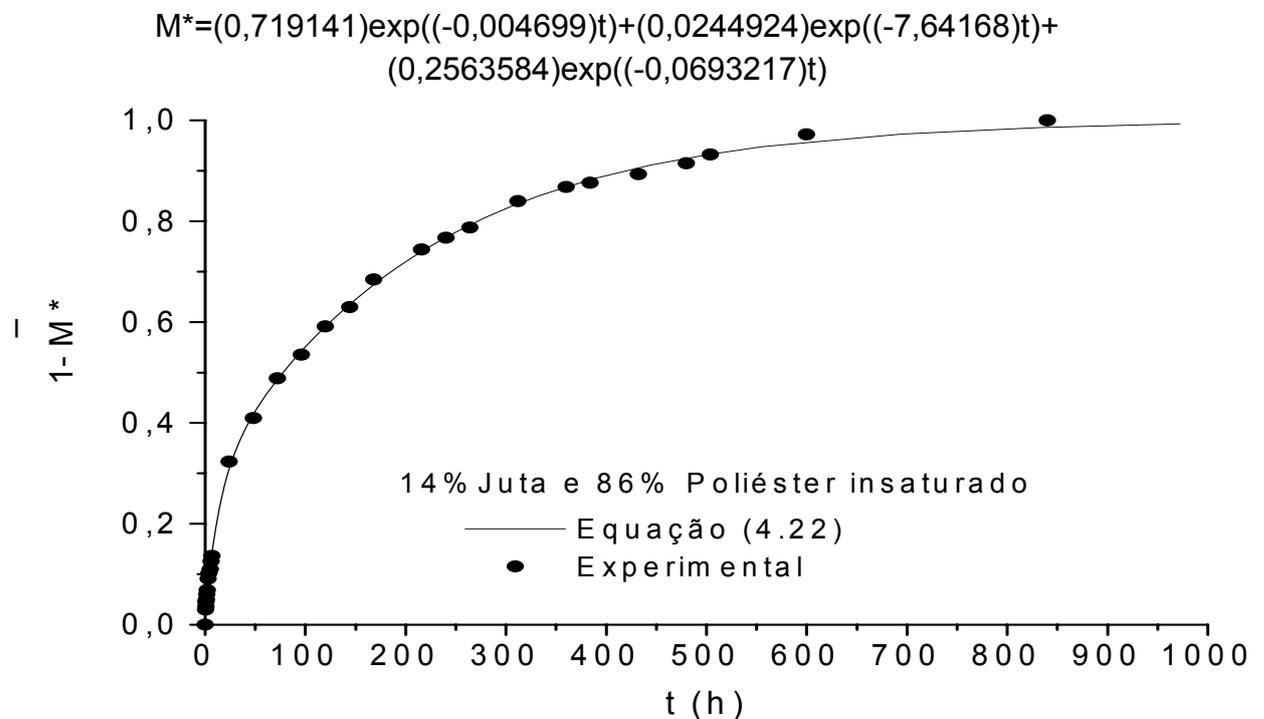


Figura 5.25 – Comparação entre teores de umidade médios do compósito reforçado por 1 camada de tecido de juta, experimental e predito pela equação (4.22).

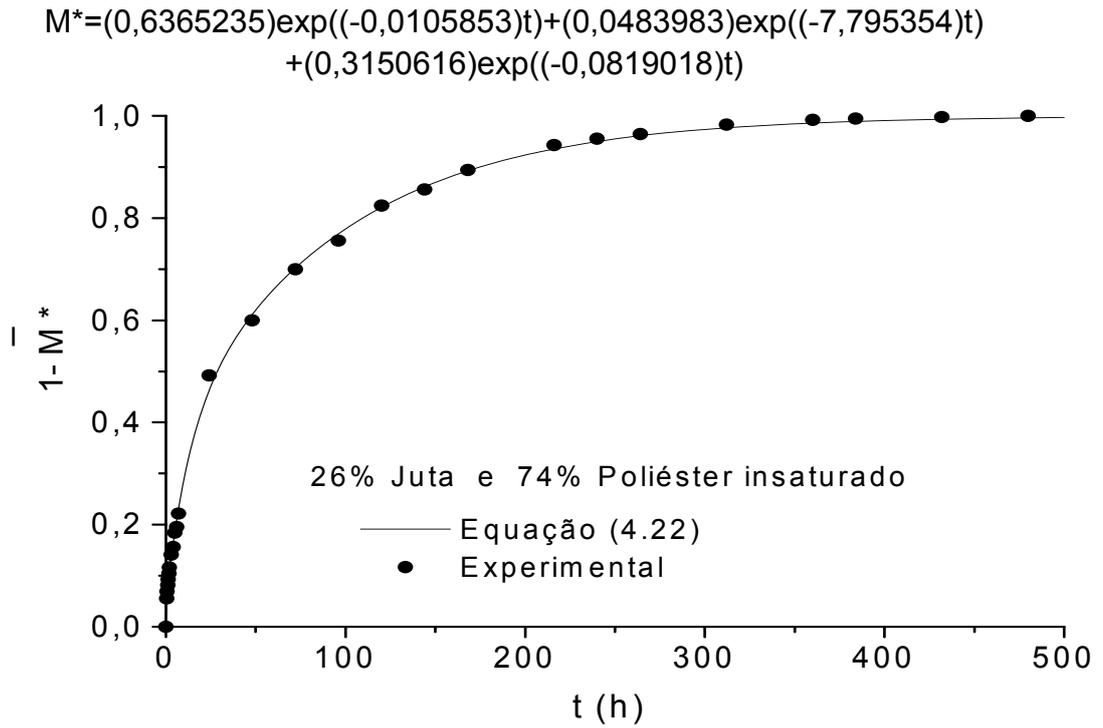


Figura 5.26 – Comparação entre teores de umidade médios do compósito reforçado por 2 camadas de tecidos de juta, experimental e predito pela equação (4.22).

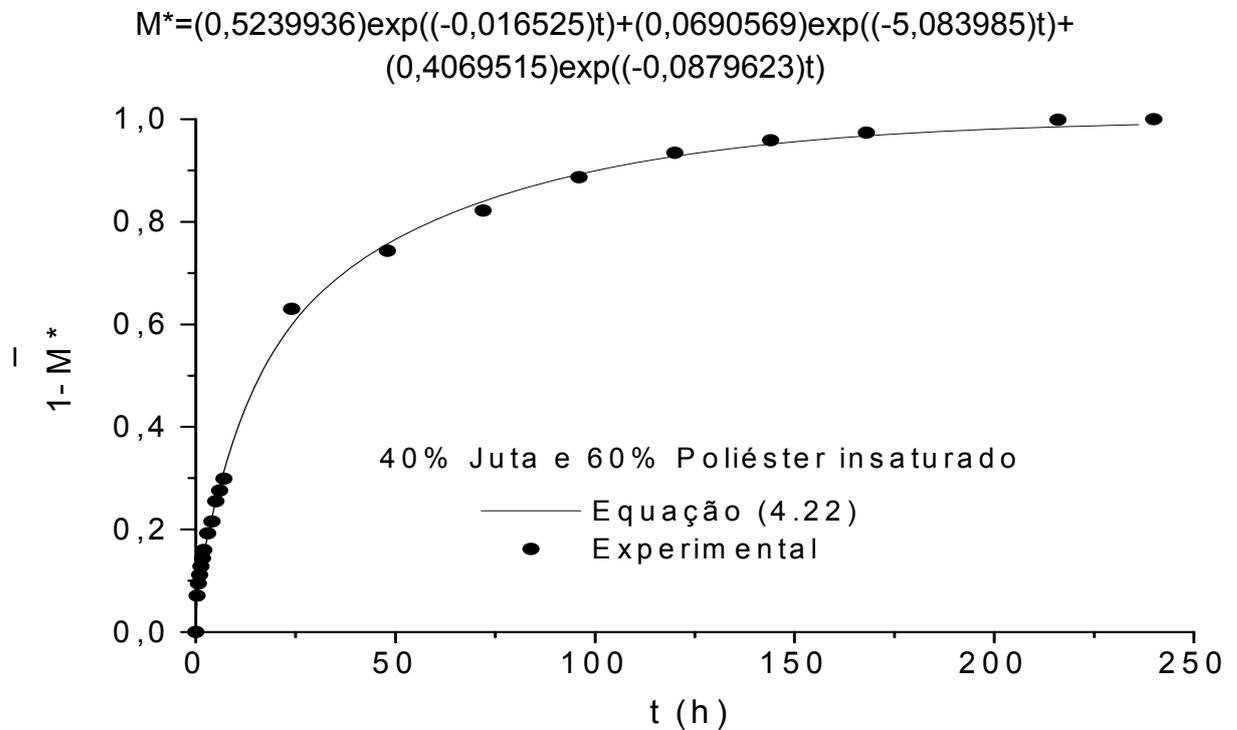


Figura 5.27 – Comparação entre teores de umidade médios do compósito reforçados por 3 camadas de tecidos de juta, experimental e predito pela equação (4.22).

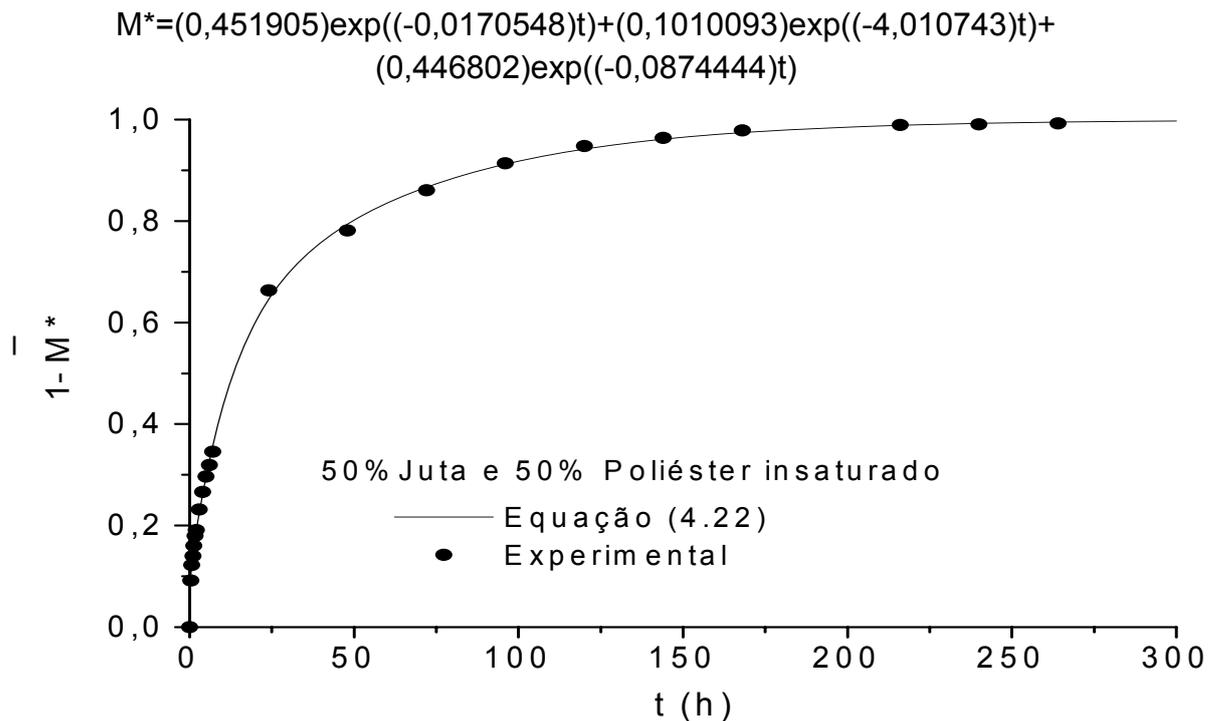


Figura 5.28 – Comparação entre teores de umidade médios do compósito reforçado por 4 camadas de tecidos de juta, experimental e predito pela equação (4.22).

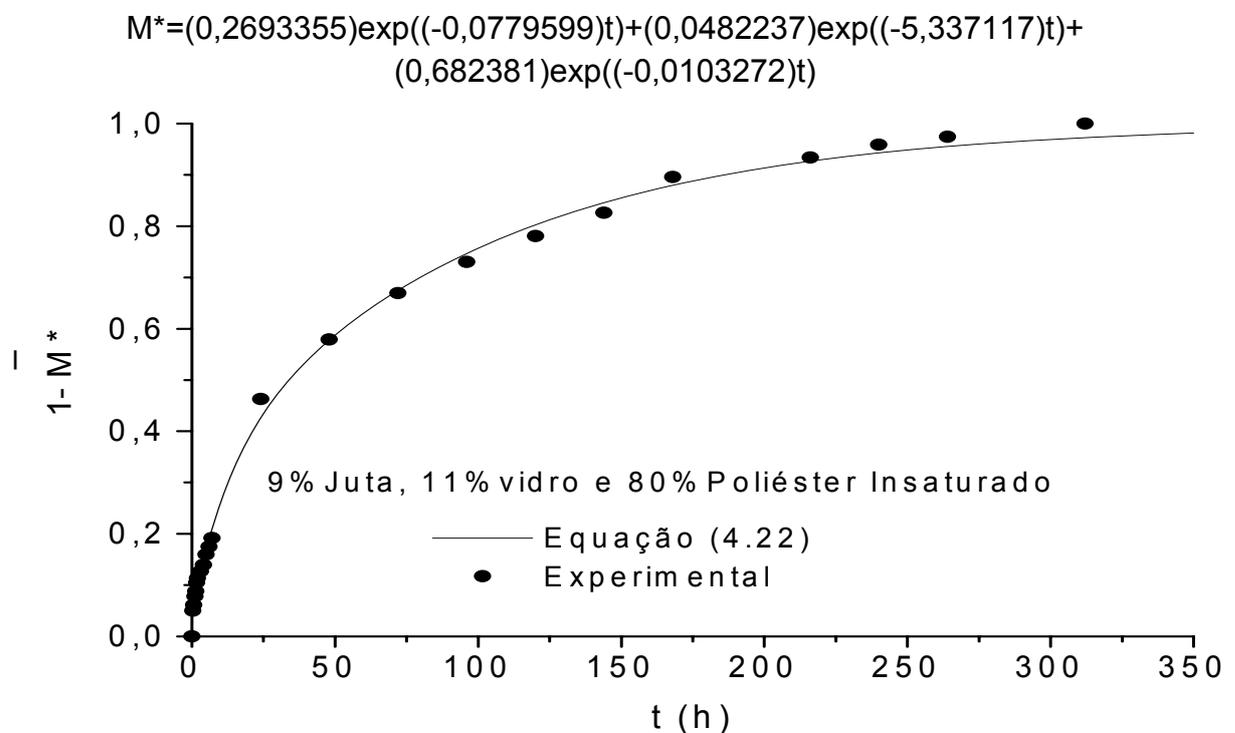


Figura 5.29 – Comparação entre teores de umidade médios do compósito reforçado por 1 camada de tecido híbrido juta/vidro, experimental e predito pela equação (4.22).

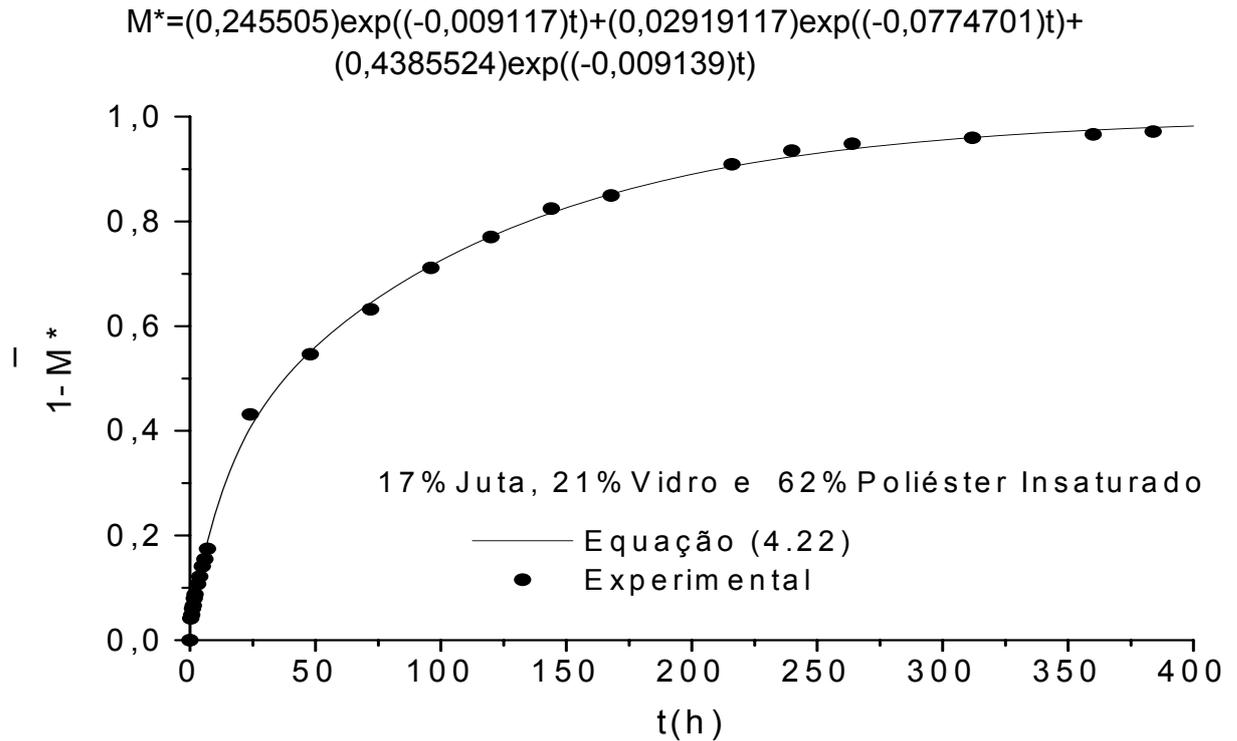


Figura 5.30 – Comparação entre teores de umidade médios do compósito reforçado por 2 camadas de tecidos híbridos juta/vidro, experimental e previsto pela equação (4.22).

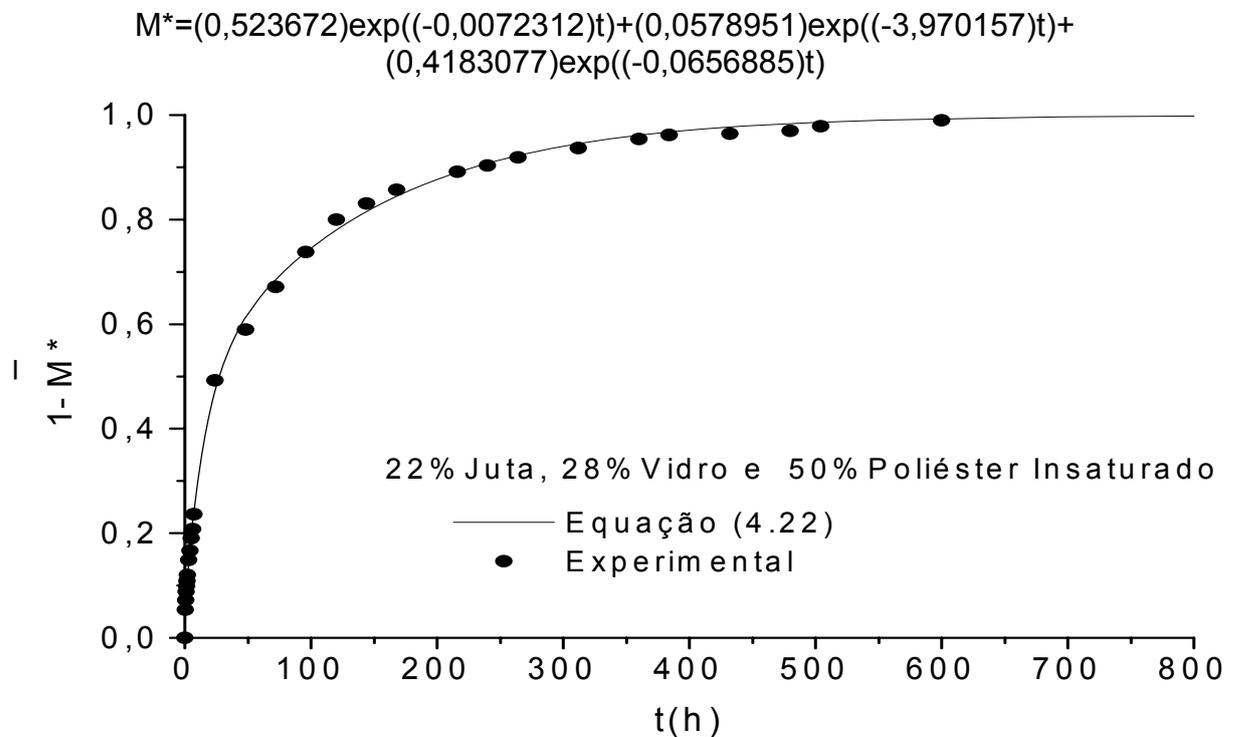


Figura 5.31 – Comparação entre teores de umidade médios do compósito reforçado por 3 camadas de tecidos híbridos juta/vidro experimental e previsto pela equação (4.22).

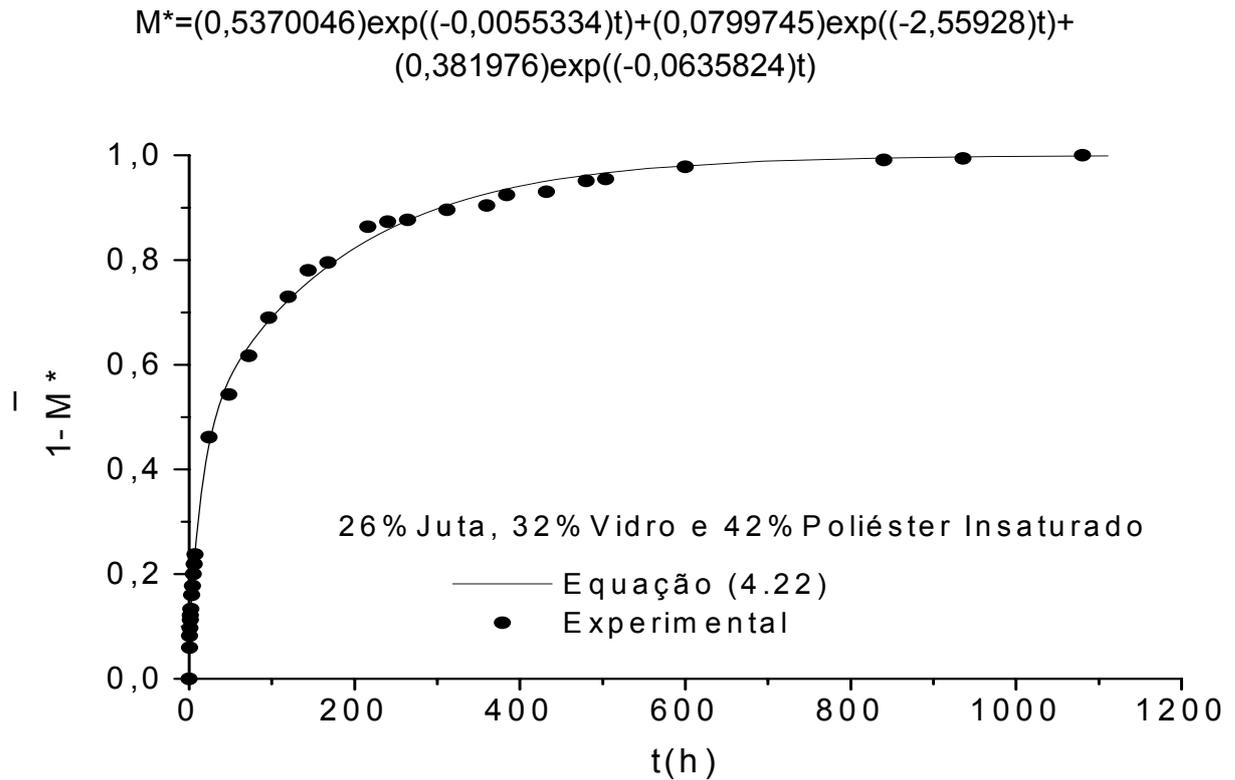


Figura 5.32 – Comparação entre teores de umidade médios do compósito reforçado por 4 camadas de tecidos híbridos juta/vidro, experimental e previsto pela equação (4.22).

5.3 Resultados da solução numérica

5.3.1 Refino de malha e de tempo

O uso de métodos numéricos, em particular o de volume finitos, resulta ser fortemente condicionado pelo valor de Δt e pelo número de pontos da malha utilizada na determinação dos valores de interesse. Para verificar o efeito destes parâmetros e obter resultados independentes destes, foram gerados vários resultados com três tipos de malhas e intervalos de tempo. As Figuras 5.33a e 5.33b apresentam os resultados de comparação entre os valores do teor de umidade médio adimensional previstos pelo modelo numérico no refino das malhas e dos intervalos de tempo de um compósito poliéster insaturado reforçado por 2 camadas de tecido de juta (26% juta/74% poliéster) nas dimensões (20 x 20x 2,3) mm³. A Tabela 5.4 apresenta alguns valores numéricos da propriedade da (1 - M^{*}) que possibilitam verificar os desvios entre os resultados obtidos em cada situação. A

análise final mostra que uma malha regular e ortogonal de 20x20x20 pontos e um passo Δt de 20 s apresentam resultados satisfatórios. Sendo assim, este parâmetro foi usado como base para obtenção de todos os resultados numéricos.

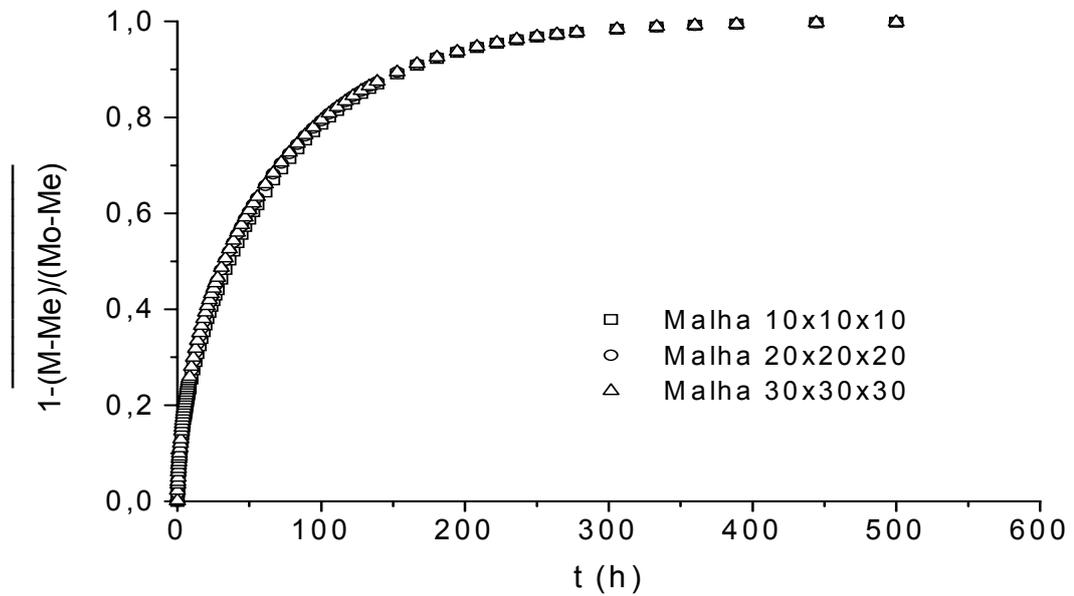


Figura 5.33a - Comparação entre os resultados numéricos do teor de umidade médio adimensional durante o refino de malha para $\Delta t=20s$.

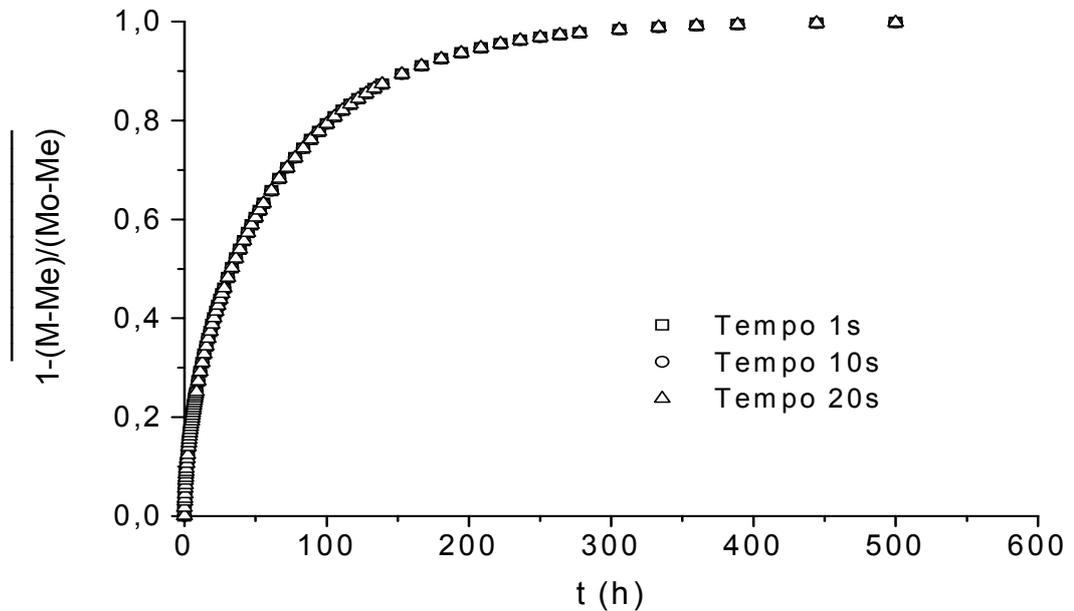


Figura 5.33b - Comparação entre os resultados numéricos do teor de umidade médio adimensional durante o refino de tempo para malha de 20x20x20 pontos.

Tabela 5.4 – Valores médios de $(1-M^*)$ obtidos com diferentes malhas, para vários intervalos de tempo de sólido, paralelepípedo com dimensões ($R_1 \times R_2 \times R_3$)

REFINO DE MALHAS				ERRO (%)	
$\Delta t = 20s$					
Tempo (h)	A: 10x10x10	B: 20x20x20	C: 30x30x30	(A-B)/A	(C-B)/C
25	0,41793	0,43809	0,44337	4,82	1,2
100	0,78576	0,79329	0,79427	0,96	0,12
208	0,94539	0,94693	0,94704	0,16	0,01
500	0,99845	0,99845	0,99840	-	0,005

REFINO DE TEMPO				ERRO (%)	
Malha 20x20x20					
Tempo (h)	A: $\Delta t = 1s$	B: $\Delta t = 10s$	C: $\Delta t = 20s$	(A-B)/A	(C-B)/C
25	0,43813	0,43811	0,43809	0,004	0,004
100	0,79329	0,79335	0,79329	0,007	0,007
208	0,94690	0,94697	0,94693	0,007	0,004
500	0,99851	0,99848	0,99845	0,003	0,003

5.3.2 Aplicação dos modelos numéricos

5.3.2.1 Cinética de sorção e distribuição da umidade

Os resultados numéricos obtidos de um particular modelamento matemático dependem muito das condições de contorno, propriedades termo-físicas e geometria do produto analisado. Discrepâncias observadas entre resultados experimentais e numéricos, muitas vezes estão concentradas na falta de condições de contorno adequadas para o modelo.

Diante da explanação, as Figuras 5.34 a 5.42 apresentam os resultados de comparação entre os valores do teor de umidade médio adimensional experimentais e preditos pelo modelo numérico proposto. Analisando estas figuras, observa-se a adequação do modelo matemático a curva experimental obtida a partir da umidificação do poliéster insaturado (Figura 5.34), dos compósitos de poliéster insaturado reforçado por tecido juta (Figuras 5.35 - 5.38) e dos compósitos híbridos

de juta/vidro (Figuras 5.39-5.42). Sendo assim pode-se dizer que o modelo é versátil e pode ser usado para descrever a umidificação de compósitos têxteis independente de sua composição química e dimensões da amostra.

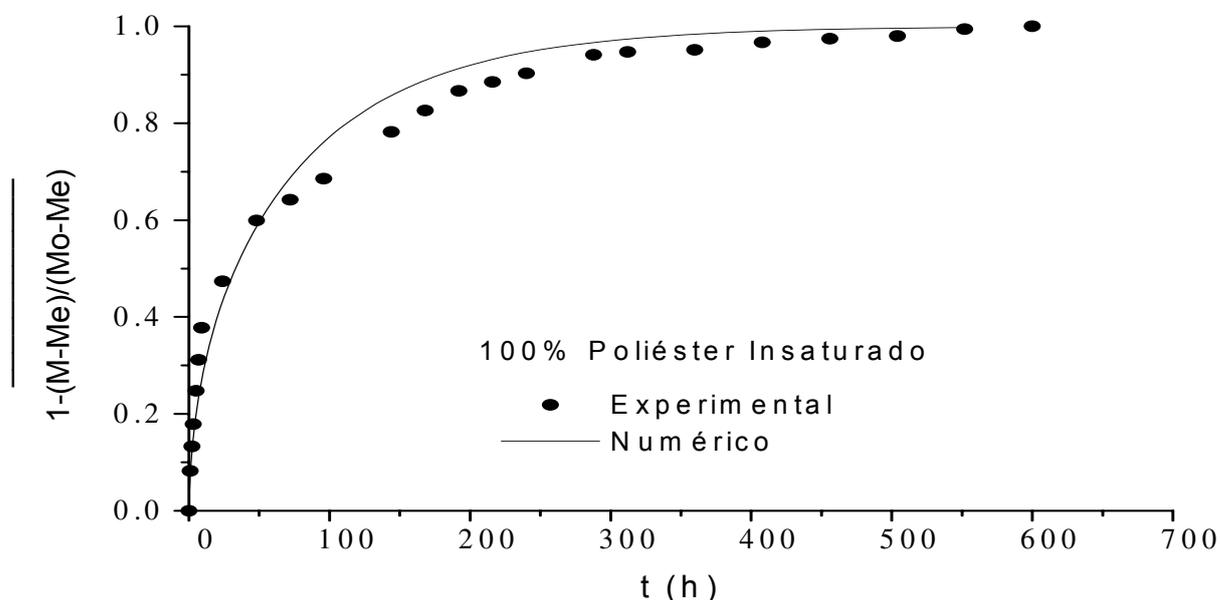


Figura 5.34 - Comparação entre os resultados teóricos (modelo proposto) e experimental do teor de umidade médio adimensional, durante a umidificação do poliéster insaturado.

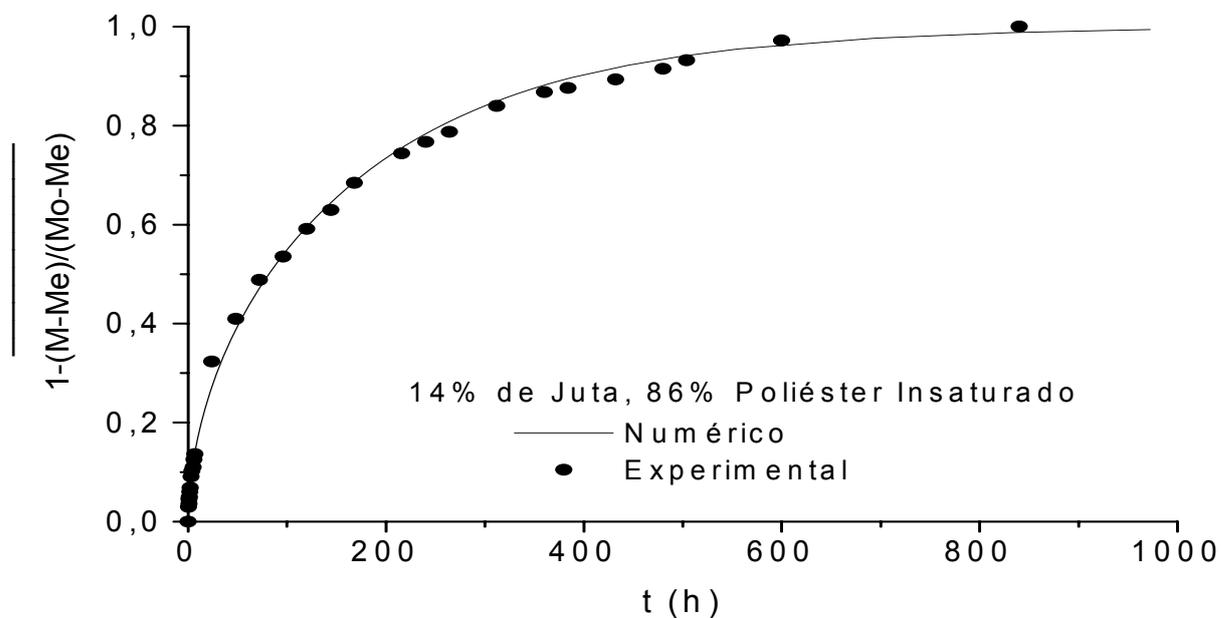


Figura 5.35 - Comparação entre os resultados teóricos (modelo proposto) e experimental do teor de umidade médio adimensional, durante a umidificação do compósito poliéster insaturado reforçado por 1 camada de tecido de juta.

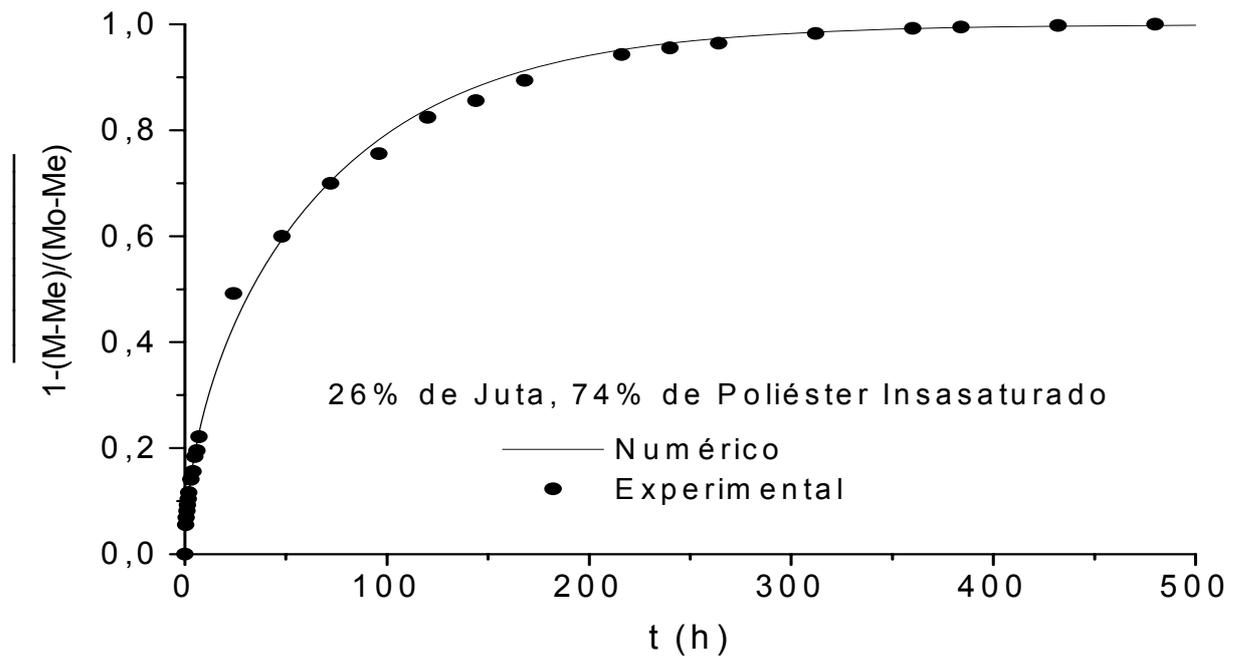


Figura 5.36 - Comparação entre os resultados teóricos (modelo proposto) e experimental do teor de umidade médio adimensional, durante a umidificação do compósito poliéster insaturado reforçado por 2 camadas de tecidos de juta.

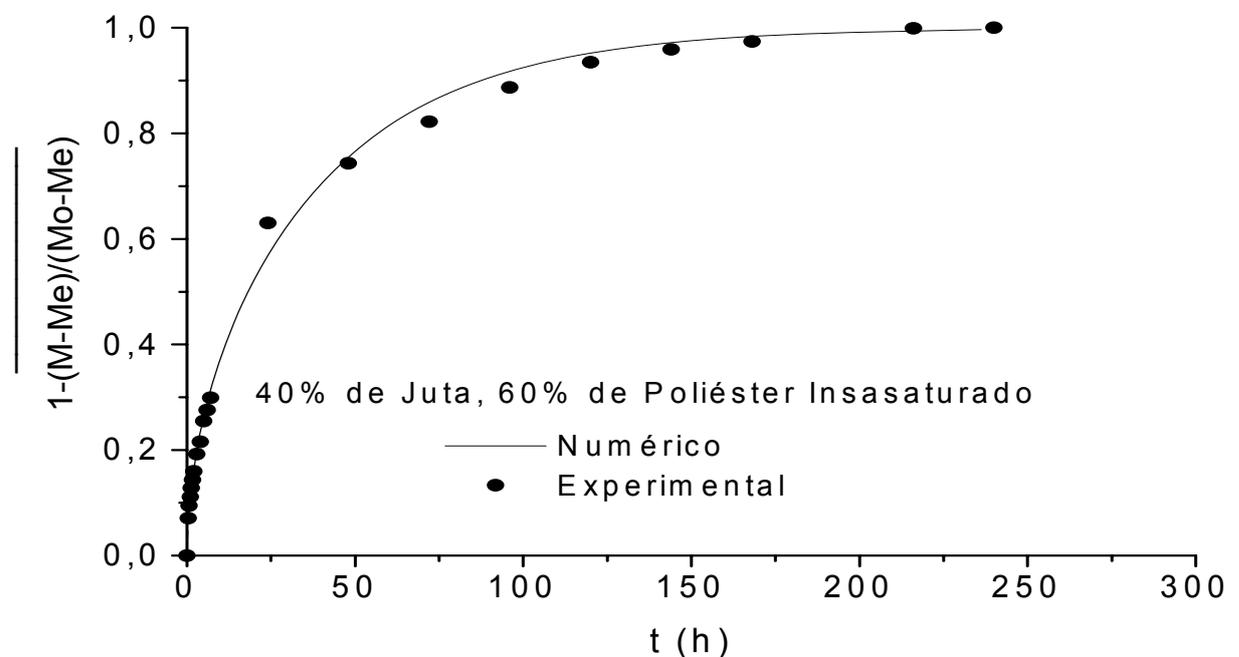


Figura 5.37 - Comparação entre os resultados teóricos (modelo proposto) e experimental do teor de umidade médio adimensional, durante a umidificação do compósito poliéster insaturado reforçado por 3 camadas de tecidos de juta.

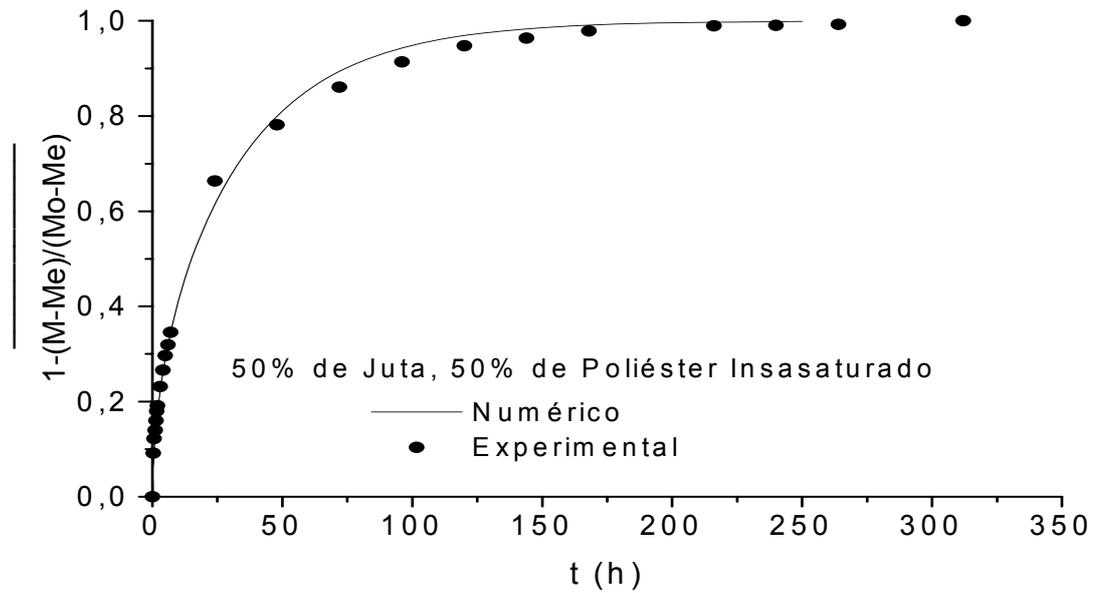


Figura 5.38 - Comparação entre os resultados teóricos (modelo proposto) e experimental do teor de umidade médio adimensional, durante a umidificação do compósito poliéster insaturado reforçado por 4 camadas de tecido de juta.

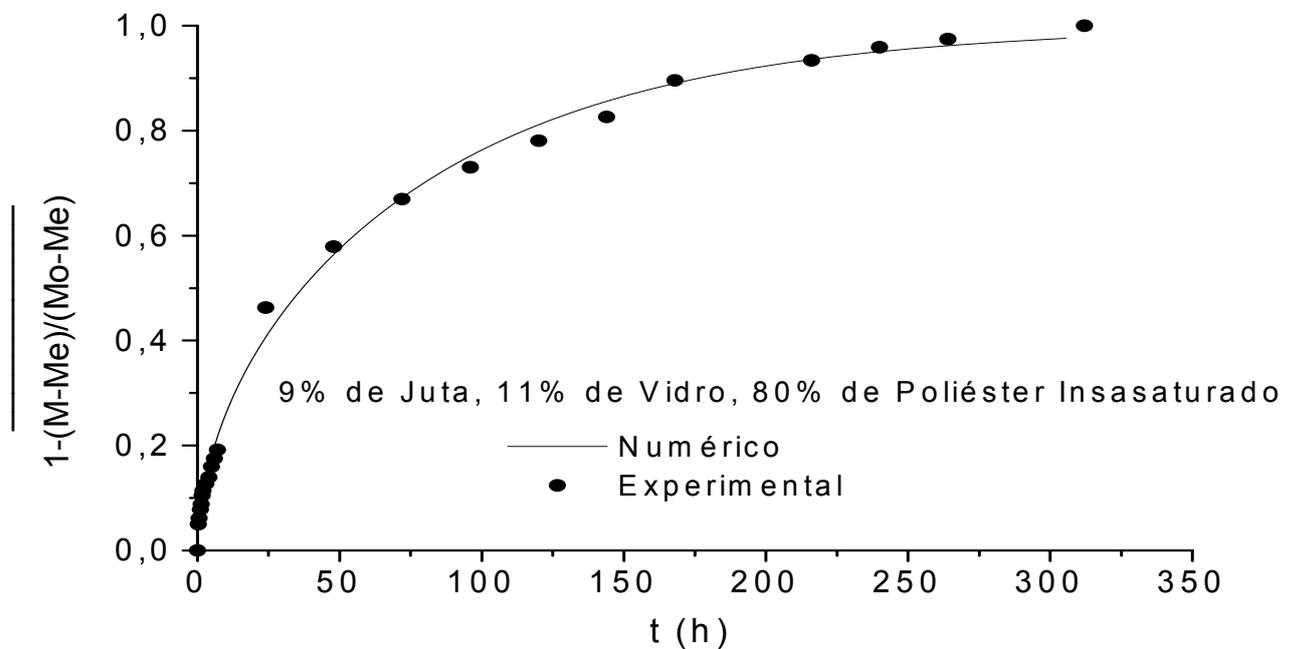


Figura 5.39 - Comparação entre os resultados teóricos (modelo proposto) e experimental do teor de umidade médio adimensional, durante a umidificação do compósito poliéster reforçado por 1 camada de tecido híbrido juta/vidro

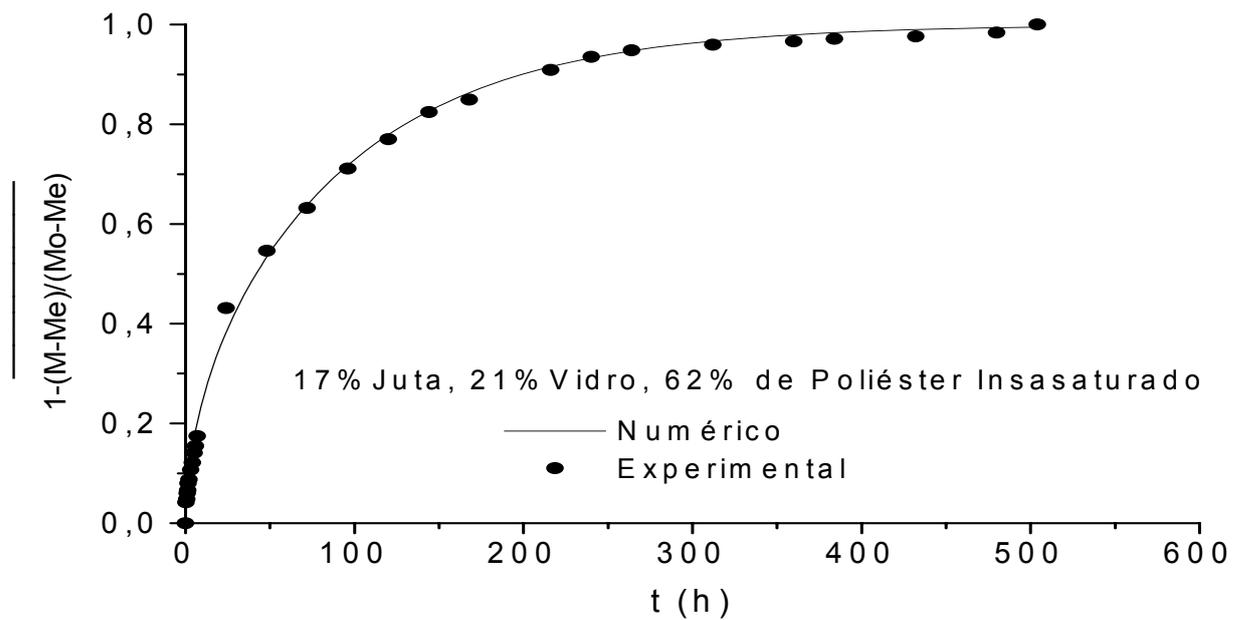


Figura 5.40 - Comparação entre os resultados teóricos (modelo proposto) e experimental do teor de umidade médio adimensional, durante a umidificação do compósito poliéster reforçado por 2 camadas de tecido híbrido juta/vidro

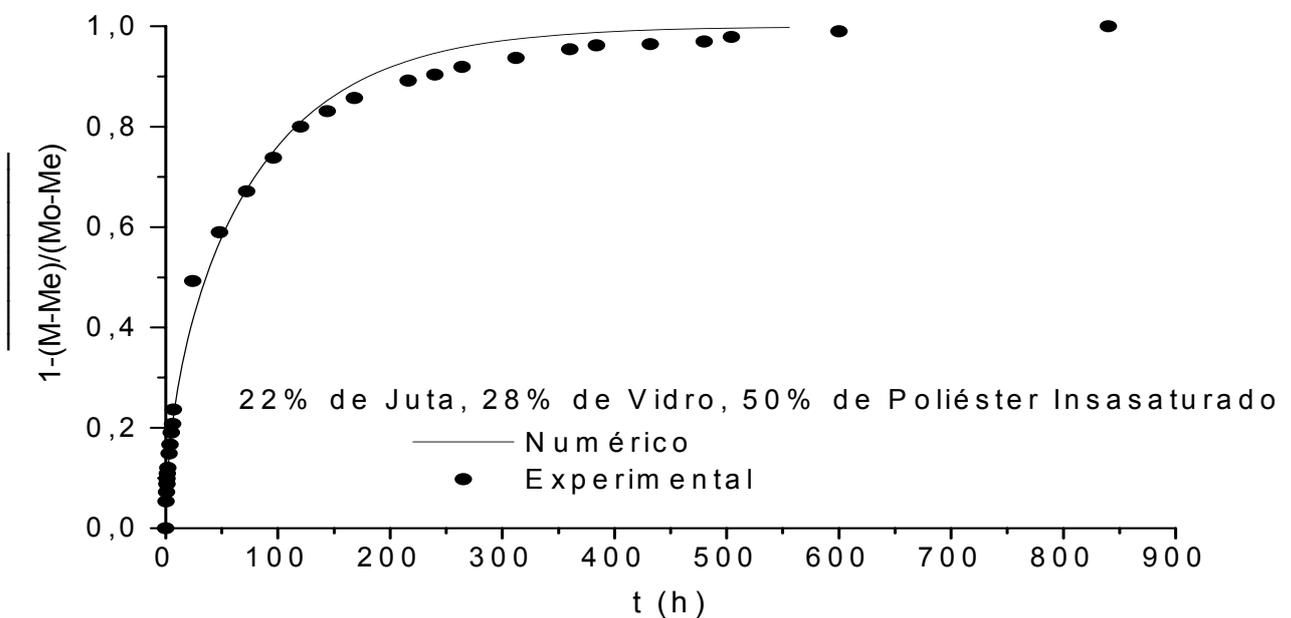


Figura 5.41 - Comparação entre os resultados teóricos (modelo proposto) e experimental do teor de umidade médio adimensional, durante a umidificação do compósito poliéster reforçado por 3 camadas de tecido híbrido juta/vidro

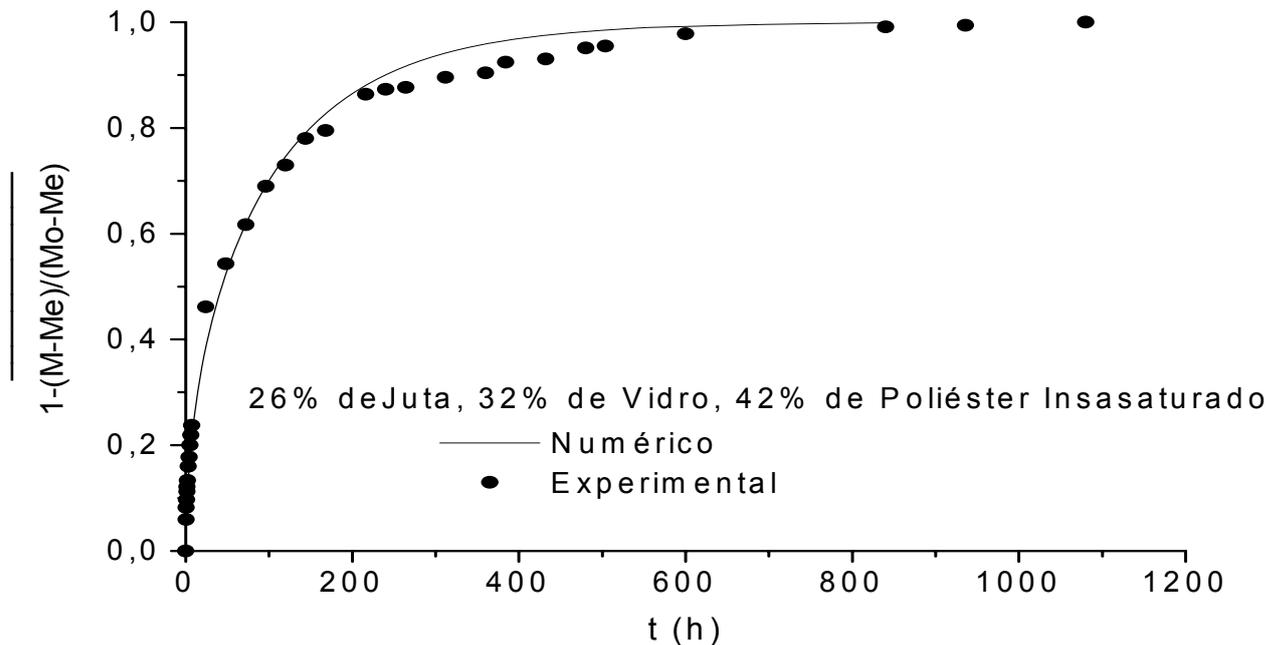


Figura 5.42 - Comparação entre os resultados teóricos (modelo proposto) e experimental do teor de umidade médio adimensional, durante a umidificação do compósito poliéster reforçado por 4 camadas de tecido híbrido juta/vidro

A distribuição do teor de umidade do poliéster insaturado, e dos compósitos poliéster insaturado/tecido de juta e poliéster insaturado/tecido híbrido juta-vidro no plano $x^* = x/R = 0,5$ nos tempos 3, 20, 44, 133 e 208 horas está representada nas Figuras 5.43 – 5.51. A existência de alto gradiente de umidade na região próximo aos vértices dos sólidos é observado. A distribuição do teor de umidade mostrou-se ser uniforme e aumentar com o teor de umidade e com o tempo de imersão. Nas áreas próximo aos pontos ($x=R_1$, $y=R_2$, $z=R_3$) o sólido umidifica mais rapidamente por está em contato direto com a água.

Uma comparação entre a distribuição de umidade dentro dos compósitos poliéster insaturado/tecido de juta e dos compósitos poliéster insaturado /tecido híbrido juta-vidro, indica que, apesar das diferenças na espessura, o processo de umidificação do compósito reforçado por tecido de juta foi mais rápido do que os compósitos reforçado por tecido híbrido. Este comportamento é atribuído a maior afinidade à água dos materiais celulósicos e corrobora os resultados mostrados na Figura 5.2.1 que indicam que o processo de absorção foi controlado pela

percentagem de fibra de juta. Isto indica que a hibridização de fibras vegetais com sintéticas como, por exemplo, fibra de vidro, é uma eficiente maneira de diminuir o processo de absorção de água de compósitos poliméricos.

Analisando os compósitos que tem as dimensões muito próximas (Fig. 5.45 e 5.49) observa-se que a distribuição do teor de umidade no interior dos compósitos é muito similar principalmente para tempos abaixo de 50h.

É muito importante conhecer os perfis e o teor de umidade dentro do material para predizer quais são as áreas mais sensíveis à tensão mecânica, que pode causar trincas e deformações, e conseqüentemente diminuir a qualidade do produto (Nascimento, 2002)

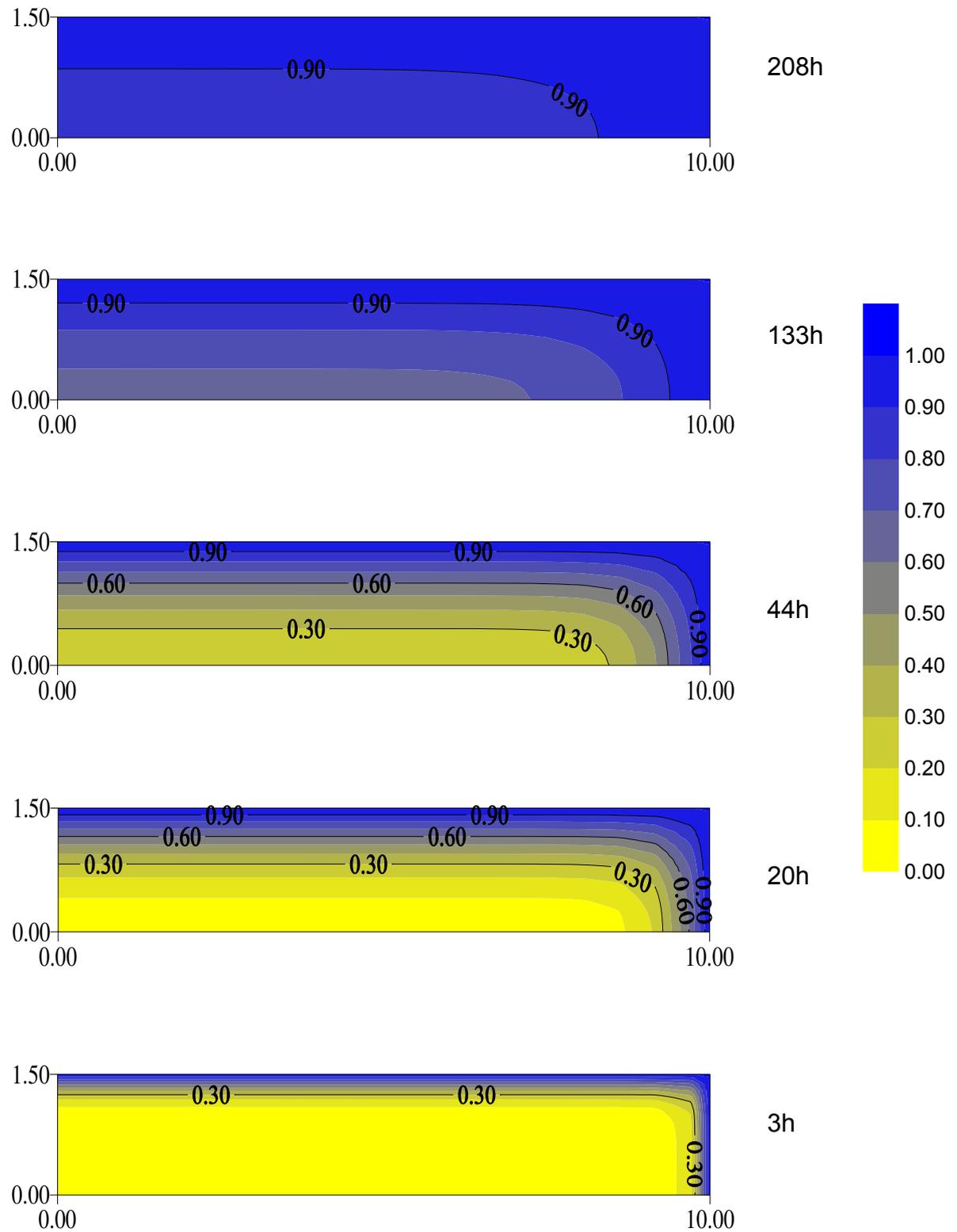


Figura 5.43 – Distribuição do teor de umidade no interior do poliéster insaturado no plano $x^*=x/R=0,5$ em alguns tempos.

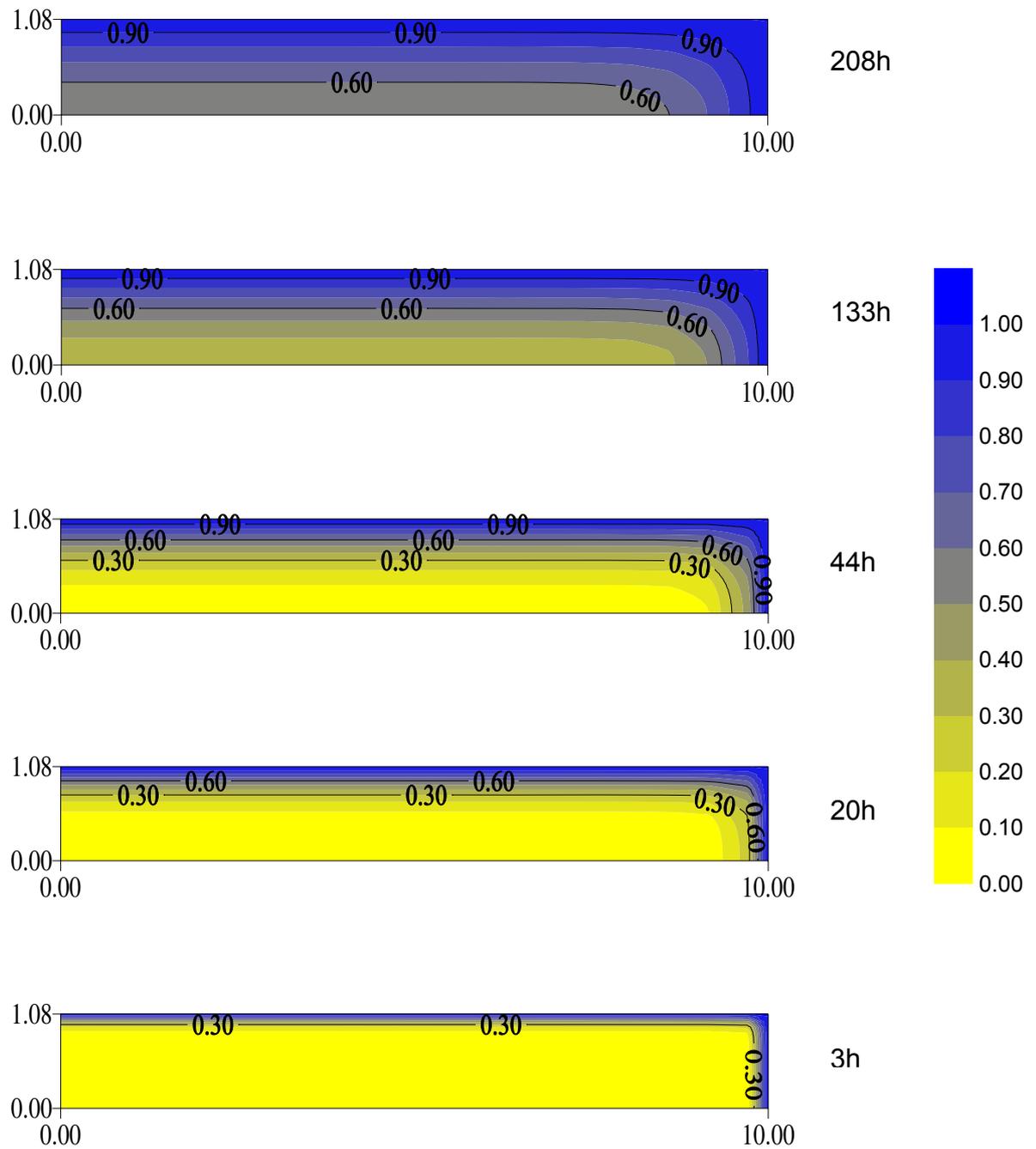


Figura 5.44 – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito 86% de poliéster insaturado reforçado por 1 camada de tecido (14% juta) no plano $x^* = x/R = 0,5$ em alguns tempos.

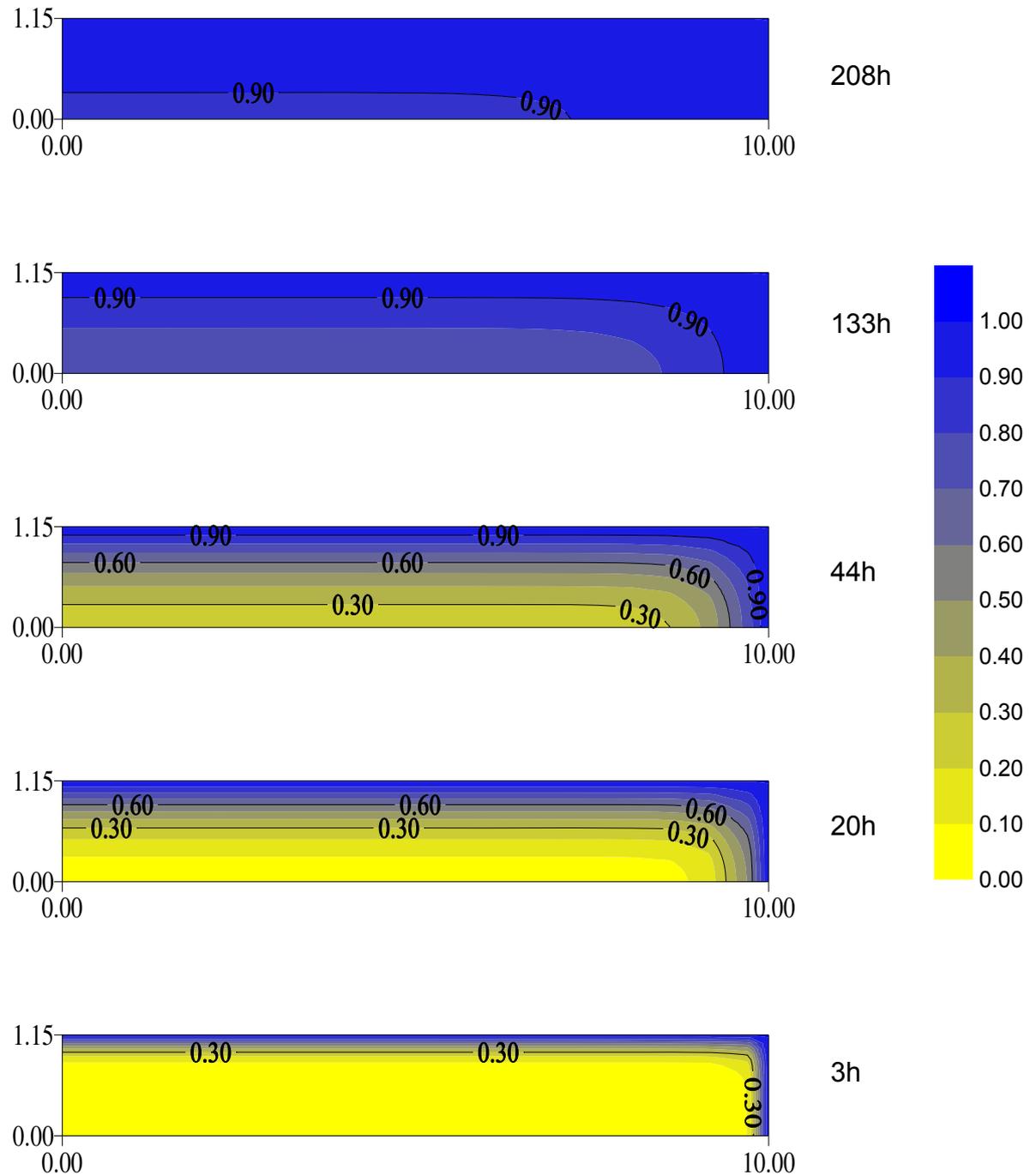


Figura 5.45 – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito 74% de poliéster insaturado reforçado por 2 camadas de tecido (26% juta) no plano $x^* = x/R = 0,5$ em alguns tempos.

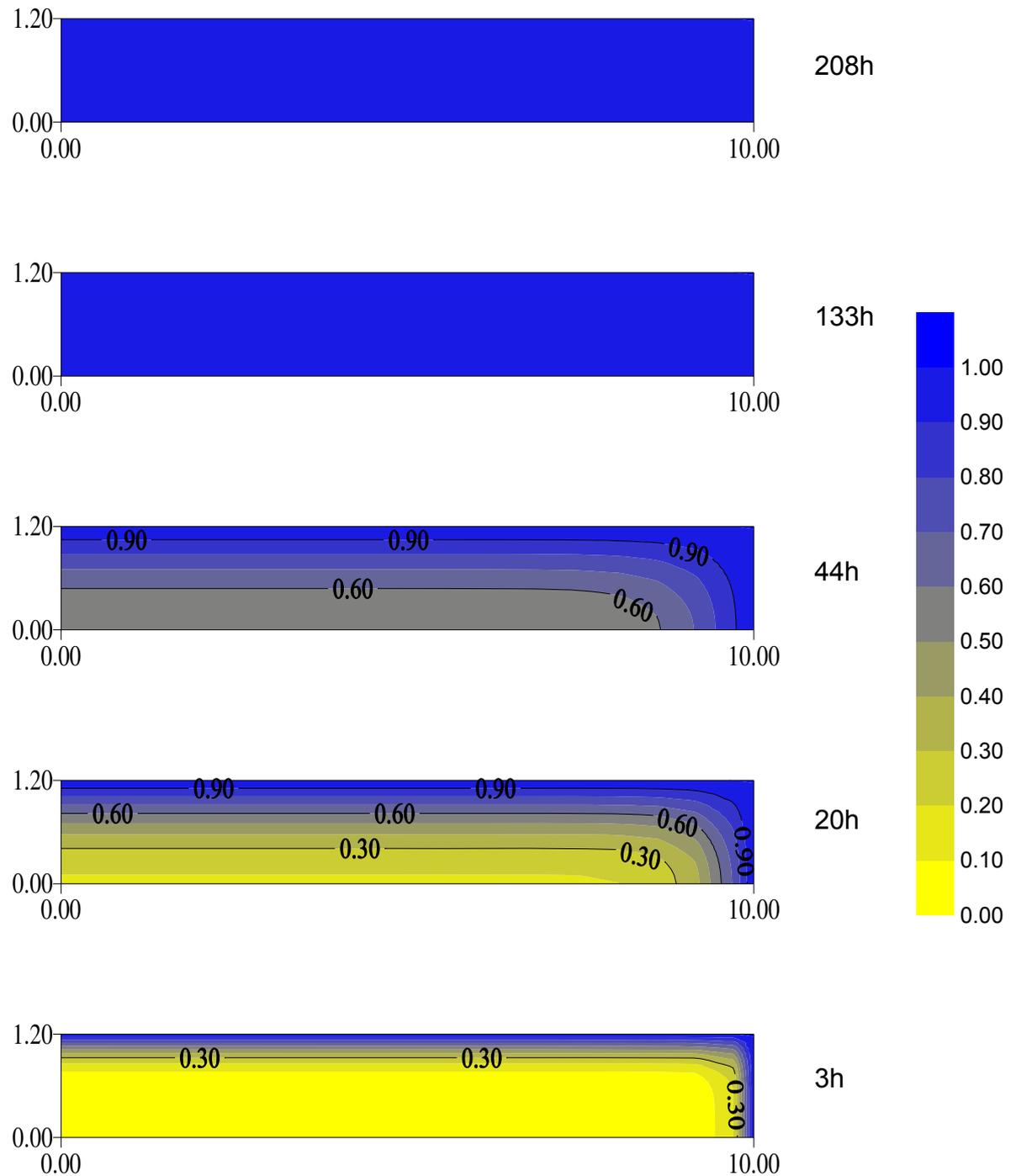


Figura 5.46 – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito 60% de poliéster insaturado reforçado por 3 camadas de tecido (40% juta) no plano $x^* = x/R = 0,5$ em alguns tempos.

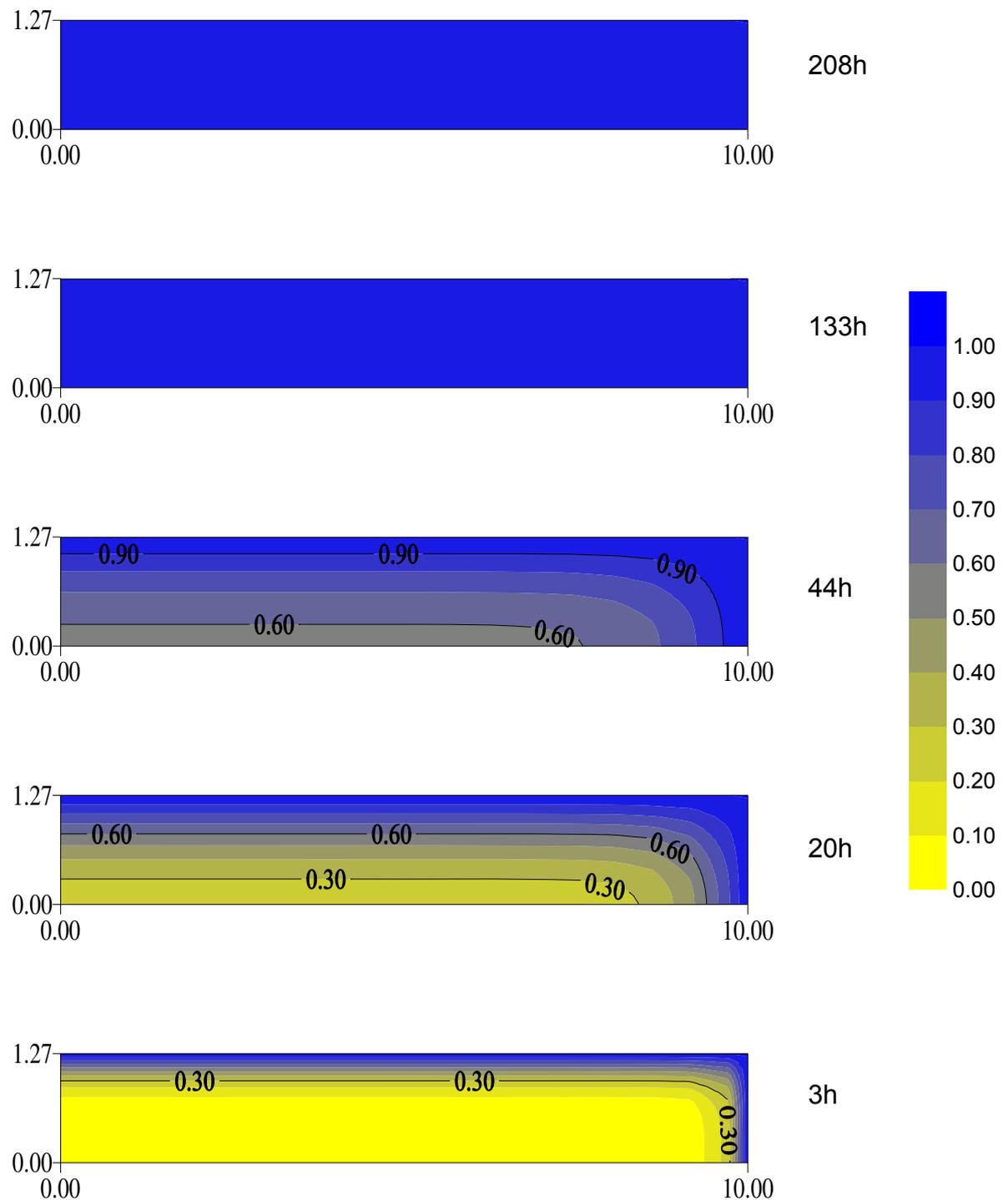


Figura 5.47 – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito 50% de poliéster insaturado reforçado por 4 camadas de tecido (50% juta) no plano $x^* = x/R = 0,5$ em alguns tempos.

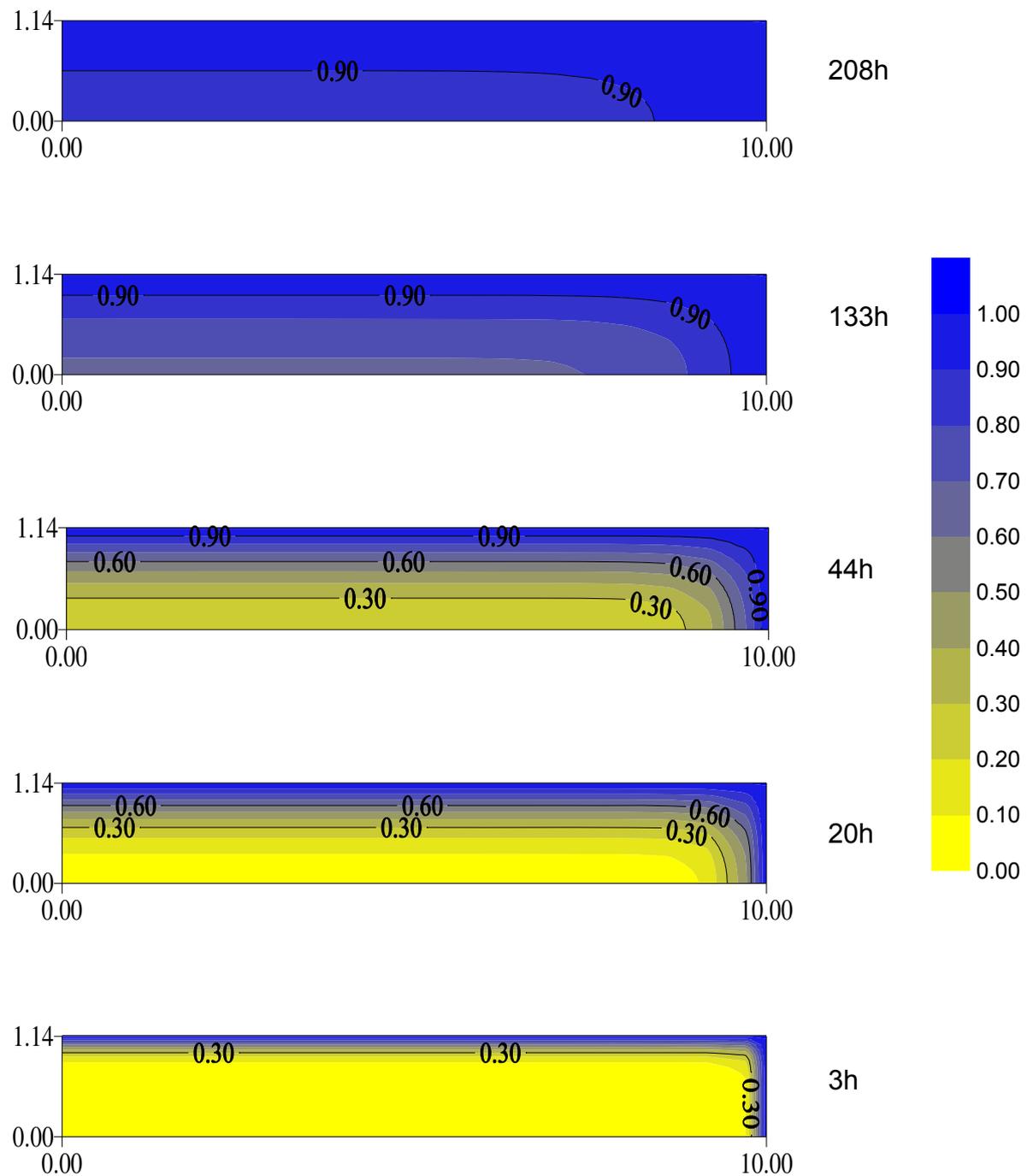


Figura 5.48 – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito 80% poliéster insaturado reforçado por 1 camadas de tecido híbrido (9% juta e 11%vidro) no plano $x^*=x/R=0,5$ em alguns tempos.

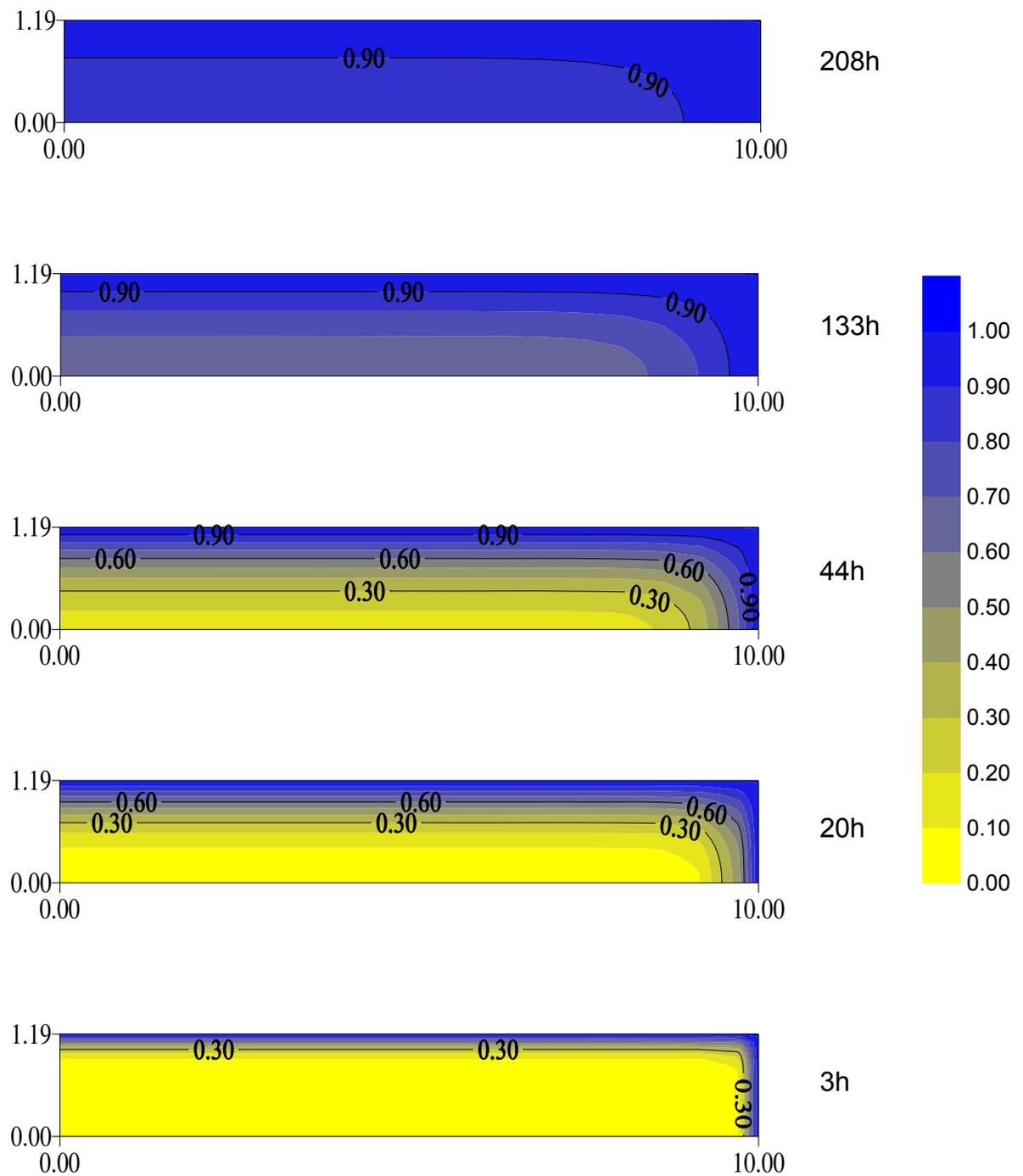


Figura 5.49 – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito 62% poliéster insaturado reforçado por 2 camadas de tecido híbrido (17% juta e 21%vidro) no plano $x^*=x/R=0,5$ em alguns tempos.

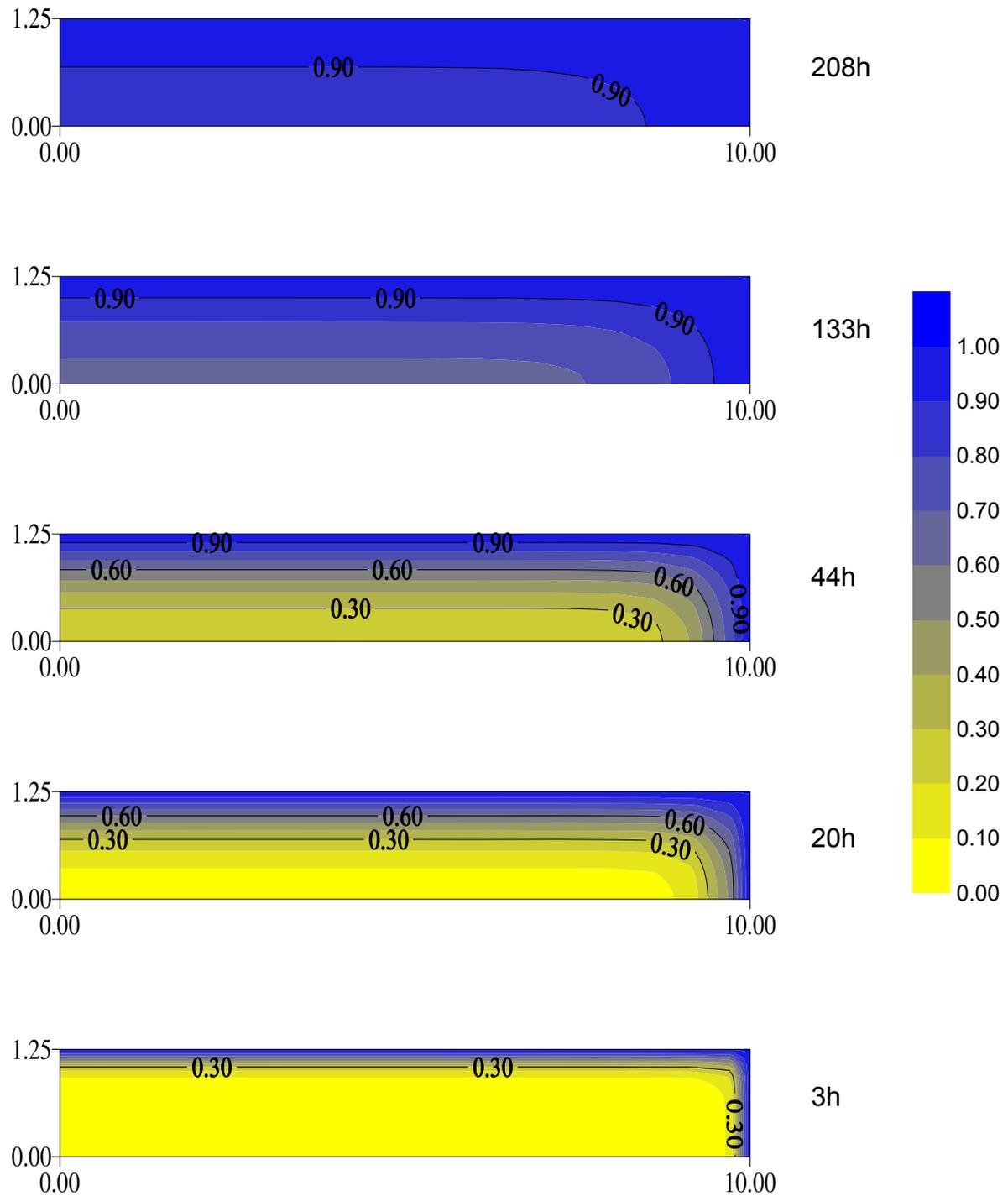


Figura 5.50 – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito 50% poliéster insaturado reforçado por 3 camadas de tecido híbrido (22% juta e 28%vidro) no plano $x^* = x/R = 0,5$ em alguns tempos.

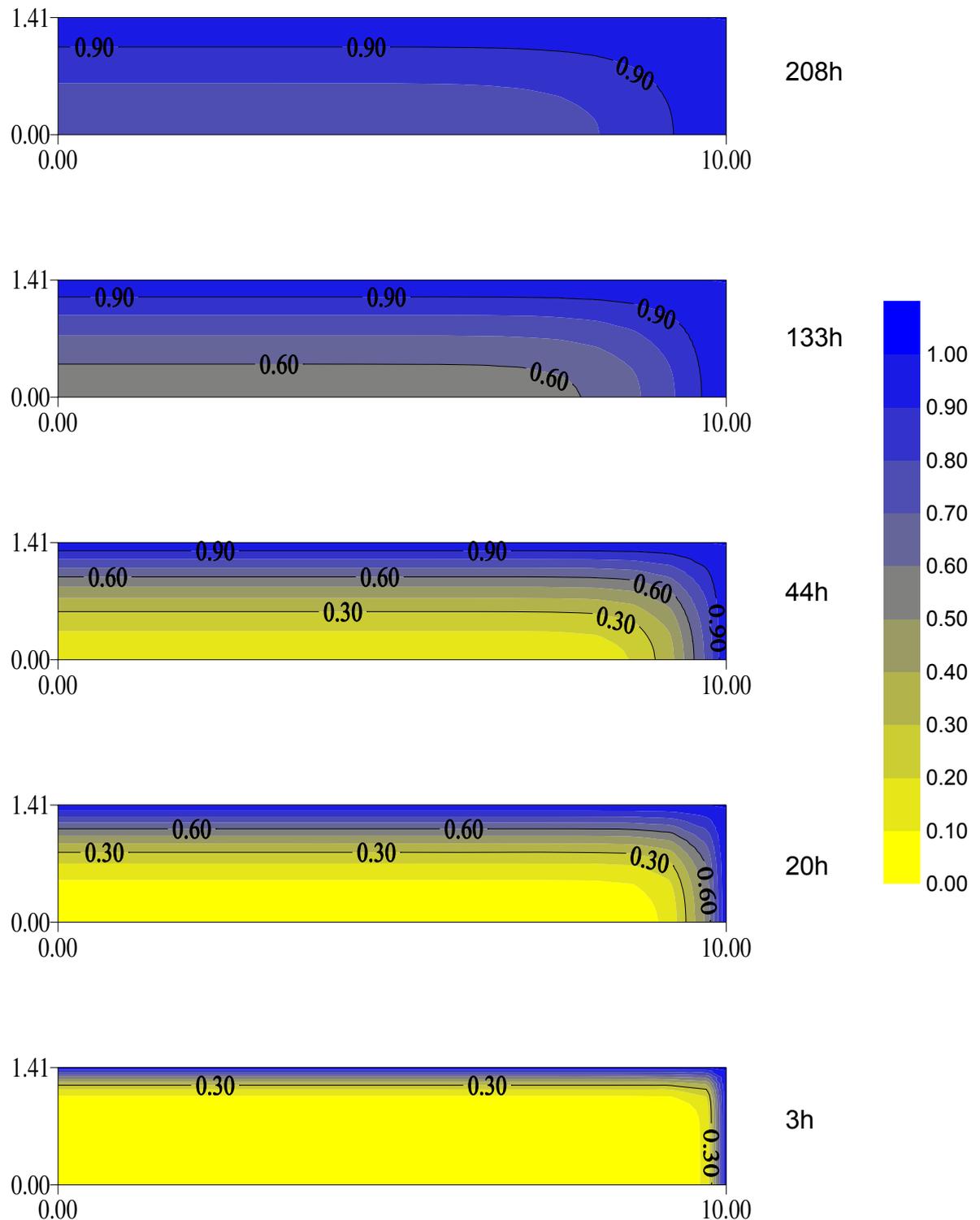


Figura 5.51 – Distribuição do teor de umidade no interior do compósito 42% poliéster insaturado reforçado por 4 camadas de tecido híbrido (26% juta e 32%vidro) no plano $x^*=x/R=0,5$ em alguns tempos.

5.3.2.2 Estimativa do coeficiente de difusão de massa

O coeficiente de transporte de massa foi estimado através da minimização da soma dos quadrados dos resíduos. A Tabela 5.5 mostra os valores dos coeficientes de transporte de massa bem como o erro relativo para cada teste experimental, obtido com o modelo numérico apresentado. A Tabela 5.6 e as Figuras 5.52 – 5.60 mostram o comportamento do coeficiente de difusão tanto do poliéster quanto dos compósitos em função do teor de umidade.

Como esperado, todos os coeficientes de transporte de massa tendem a diminuir com o tempo, e variam também 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 é utilizado por diversos pesquisadores.

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 η obtidos em todo o estudo realizado, foram negativos, o que indica a obtenção de valores coerentes da difusividade de massa durante todo o processo de umidificação. Os valores de η e do coeficiente de transferência de massa obtidos, bem como o ERMQ e variância estão sumarizados na Tabela 5.5. Os valores baixos do ERMQ indicam que os modelos ajustam-se muito bem aos dados experimentais.

Vale ressaltar que no caso do poliéster insaturado não foi possível obter um valor de ERMQ baixo usando apenas o primeiro termo da equação, sendo necessário adicionar um termo constante para minimizar o ERMQ.

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 (Lima, 1999). De uma forma geral, é importante ressaltar que diferenças no coeficiente de difusão de massa podem ser atribuídas aos seguintes fatores:

- 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 a expansão do produto durante a umidificação;
- f) dimensões das amostras;
- g) composição do material;
- h) teores de fibras higroscópicas presente.

Tabela 5.5 - Parâmetros estimados pelo modelo numérico, erro, variância, tempo total de processo

Amostra	Nº de pontos		$D_o \times 10^{13}$ m ² /s	η	ERMQ	$S^2 \times 10^4$	Tempo total (h)
	Exp*	Num*					
Poliéster	29	94	28,0	-26,0	0,267	28,7	600
1c juta	30	96	6,6	-1,7	0,028	2,94	840
2c juta	27	92	18,0	-0,5	0,023	2,57	480
3c juta	21	83	35,0	-0,3	0,023	2,76	240
4c juta	23	84	48,0	-0,6	0,032	3,90	312
1c juta/vidro	23	87	16,0	-1,3	0,010	1,19	312
2c juta/vidro	28	92	15,0	-0,3	0,022	2,42	504
3c juta/vidro	30	93	20,0	-2,1	0,087	9,45	840
4c juta/vidro	32	95	22,0	-4,2	0,215	22,88	1080

* Exp – experimental; Num – numérico

Tabela 5.6 – Dados obtidos do coeficiente de difusão e teores de umidade inicial e final.

Amostra	Teor Total de Fibra (%)	$D_o \cdot 10^{+13} - D_f \cdot 10^{+13}$ (m ² /s)	Teor de Umidade kg/kg de massa seca
Poliéster	0	28,0 – 23,12	0 – 0,01252
1c Juta	14	6,60 – 5,99	0 – 0,05564
2c Juta	26	18,00 – 17,24	0 – 0,08587
3c Juta	40	35,20 – 33,91	0 – 0,12382
4c Juta	50	48,00 – 43,86	0 – 0,15017
1c juta/vidro	20	16,00 – 15,37	0 – 0,03058
2c juta/vidro	38	15,00 – 14,56	0 – 0,05849
3c juta/vidro	50	20,00 – 16,96	0 – 0,07832
4c juta/vidro	58	22,00 – 14,86	0 - 0,09346

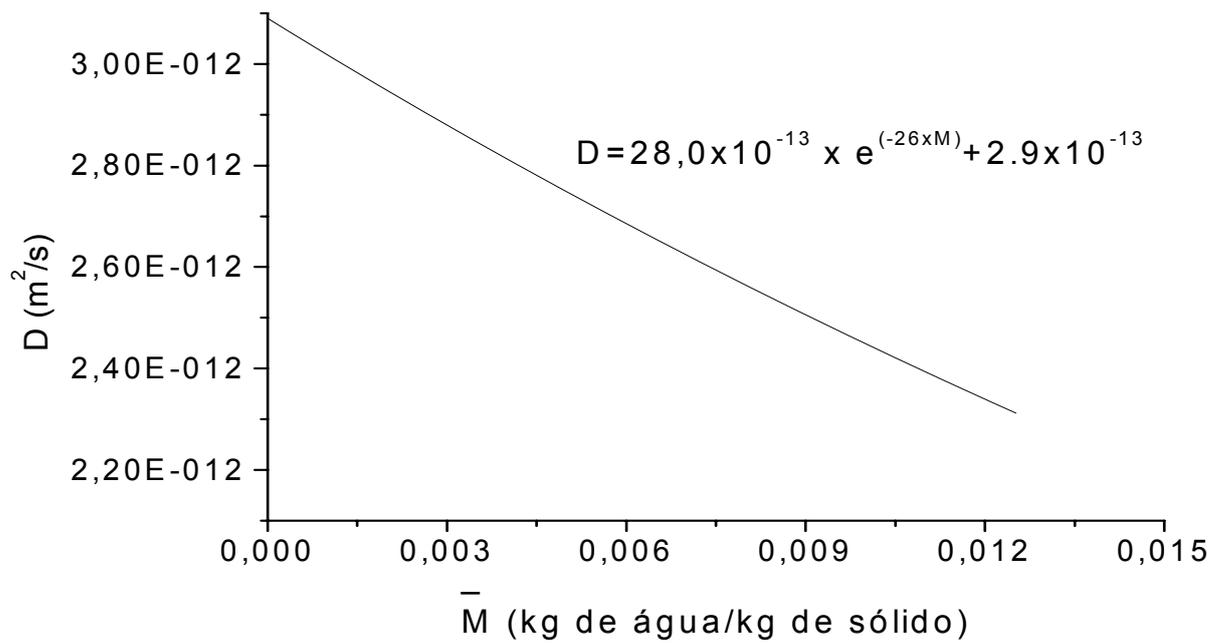


Figura 5.52 - Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do poliéster insaturado.

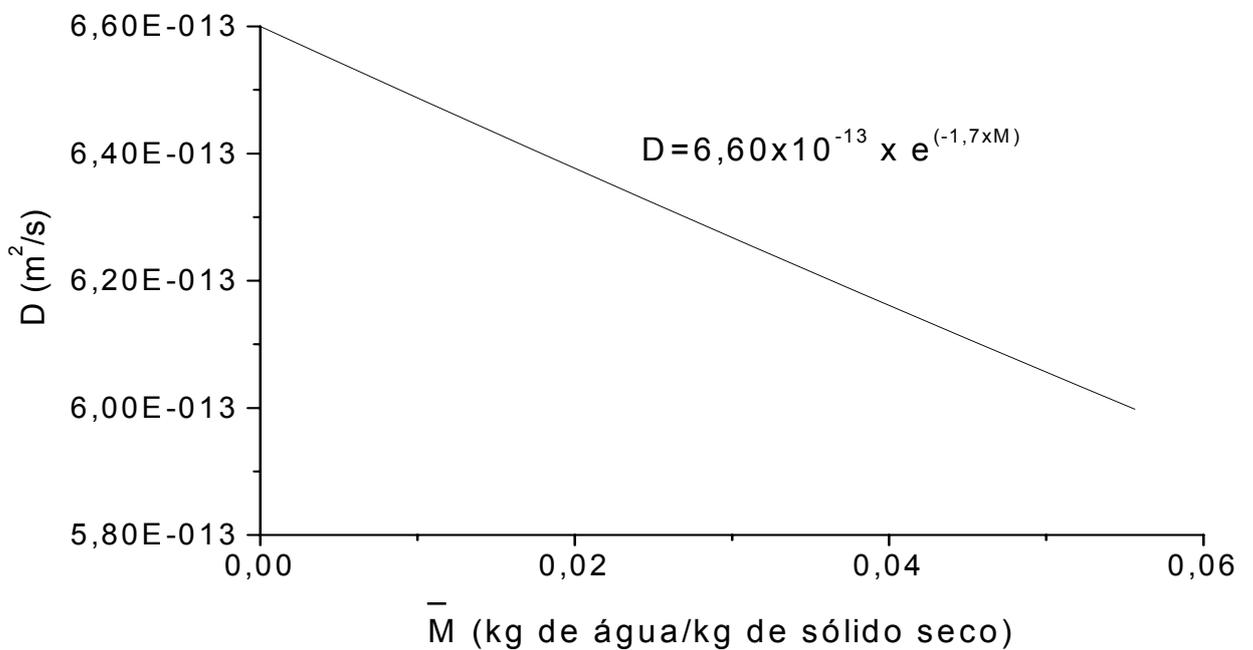


Figura 5.53 - Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do compósito 86% poliéster insaturado reforçado por 1 camada de tecido (14% juta).

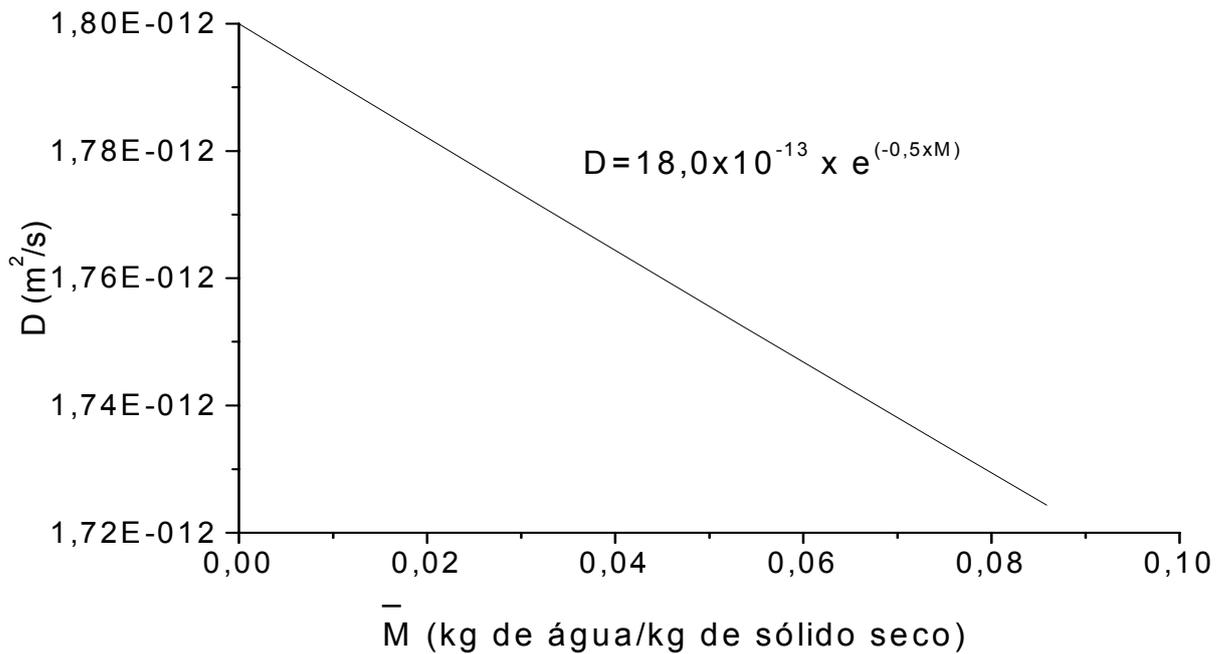


Figura 5.54 - Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do compósito 74% poliéster insaturado reforçado por 2 camadas de tecido (26% juta).

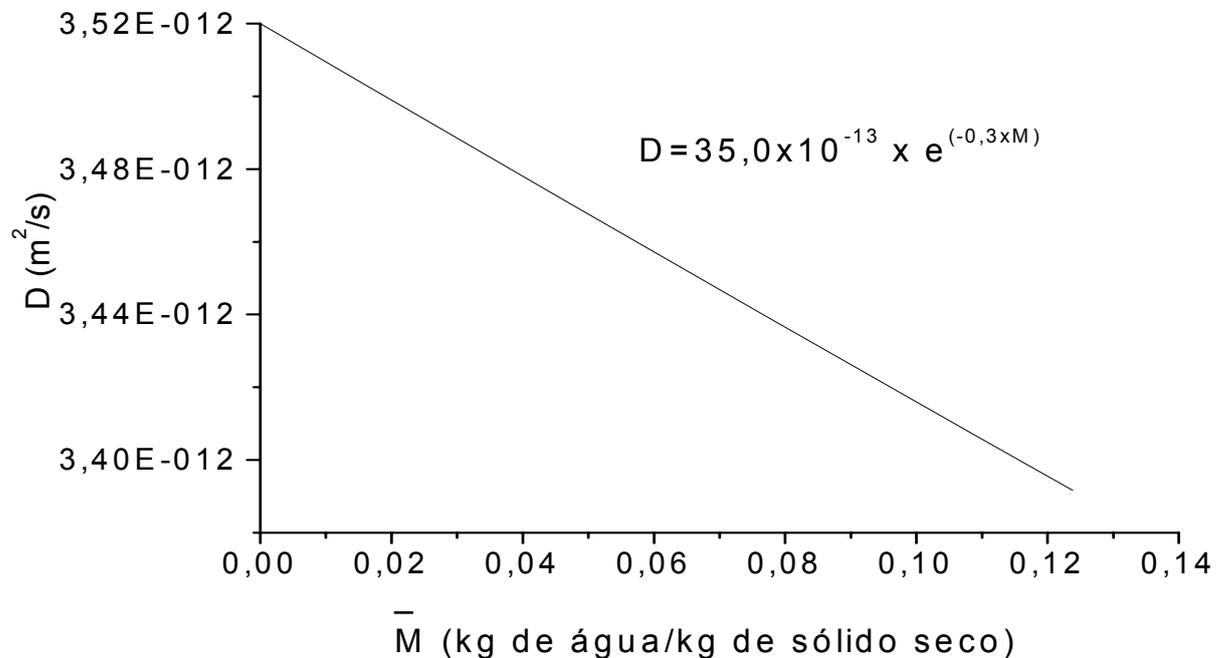


Figura 5.55 - Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do compósito 60% poliéster insaturado reforçado por 3 camadas de tecido (40% juta).

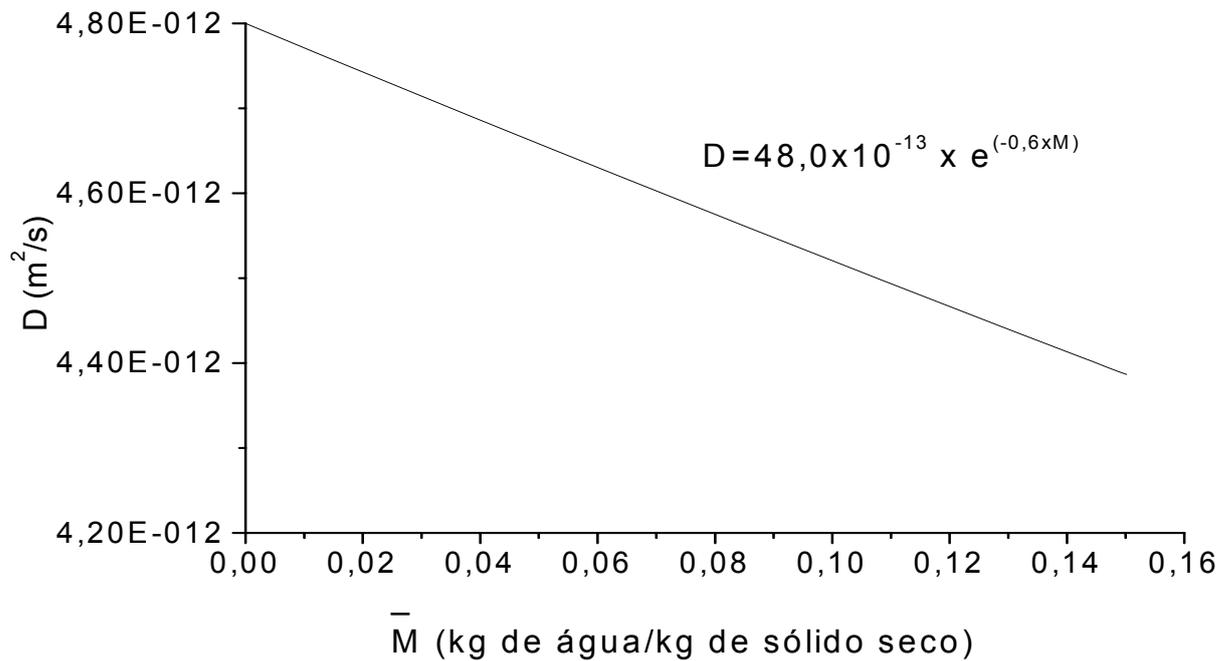


Figura 5.56 - Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do compósito 50% poliéster insaturado reforçado por 4 camadas de tecido (50% juta).

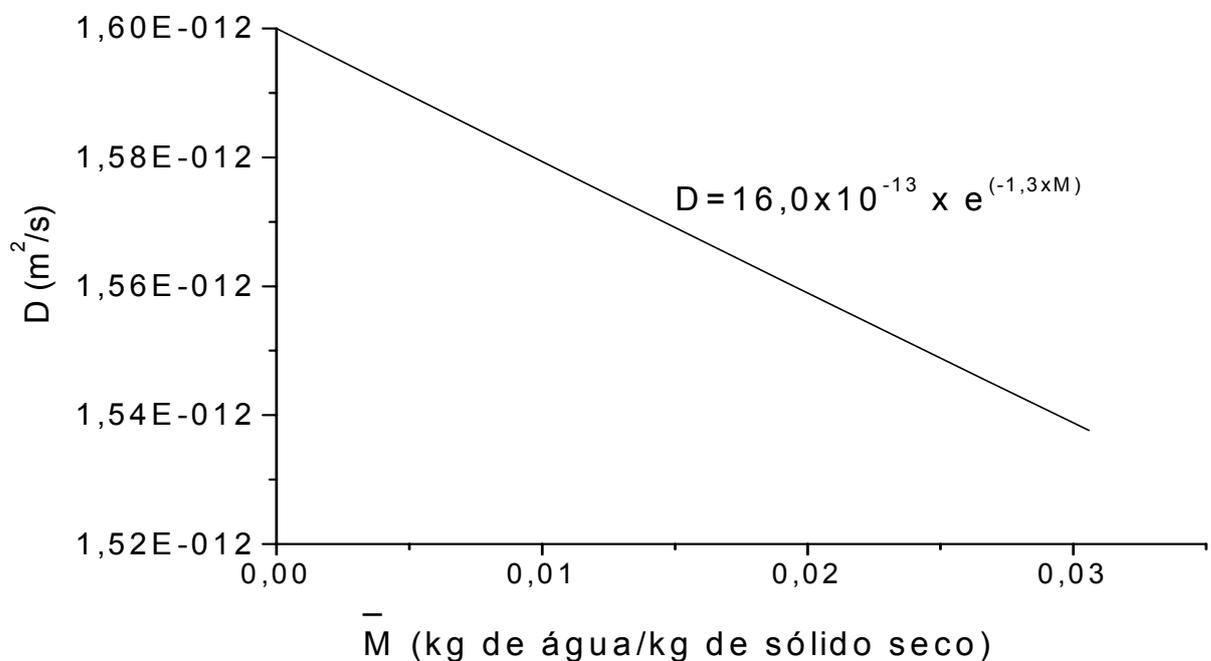


Figura 5.57 - Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do compósito 80% poliéster insaturado reforçado por 1 camada de tecido híbrido (9% juta e 11% vidro).

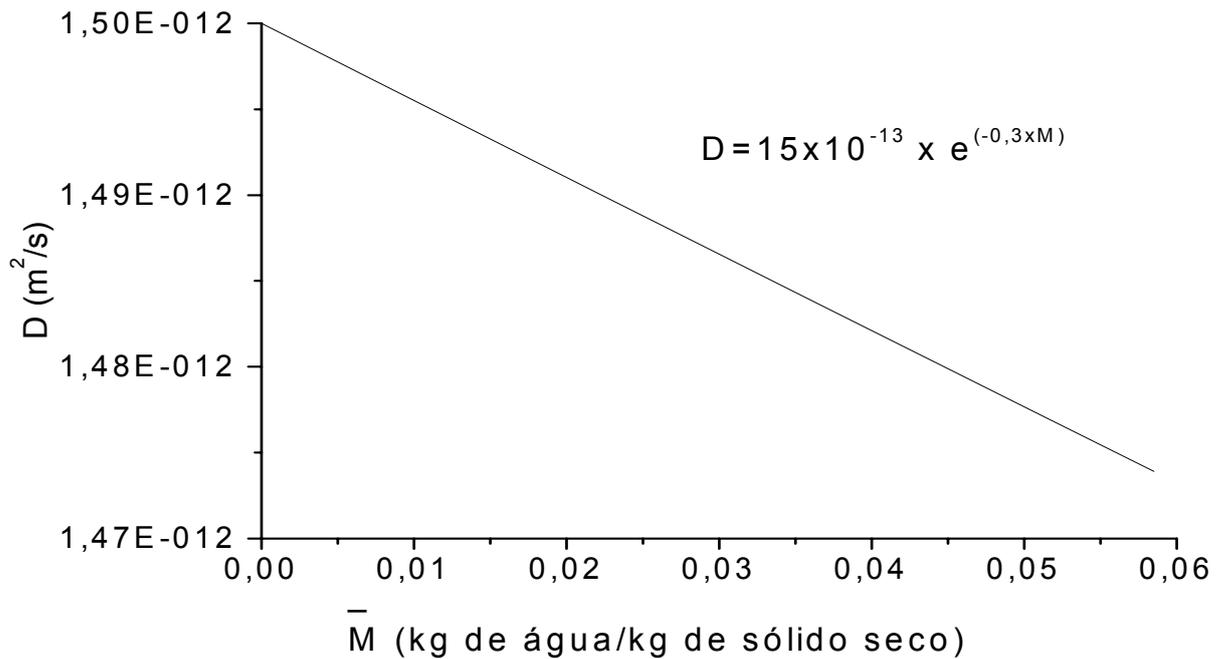


Figura 5.58 - Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do compósito 62% poliéster insaturado reforçado por 2 camadas de tecido híbrido (17% juta e 21% vidro).

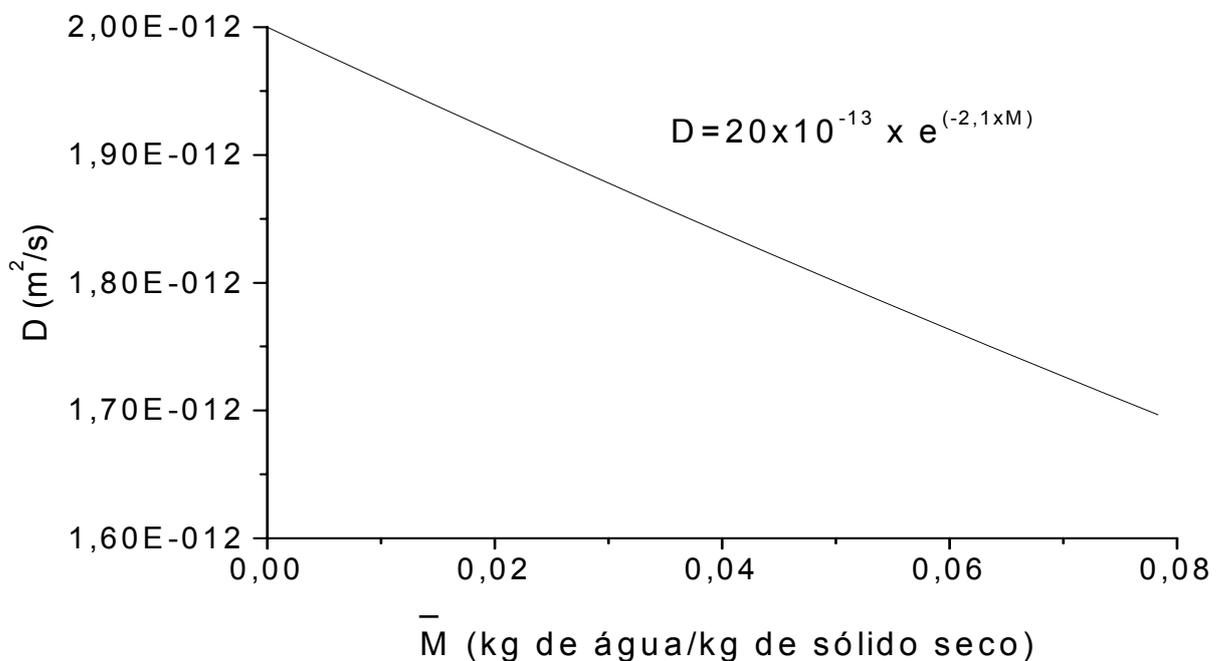


Figura 5.59 - Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do compósito 50% de poliéster insaturado reforçado por 3 camadas de tecido híbrido (22% de juta e 28% de vidro).

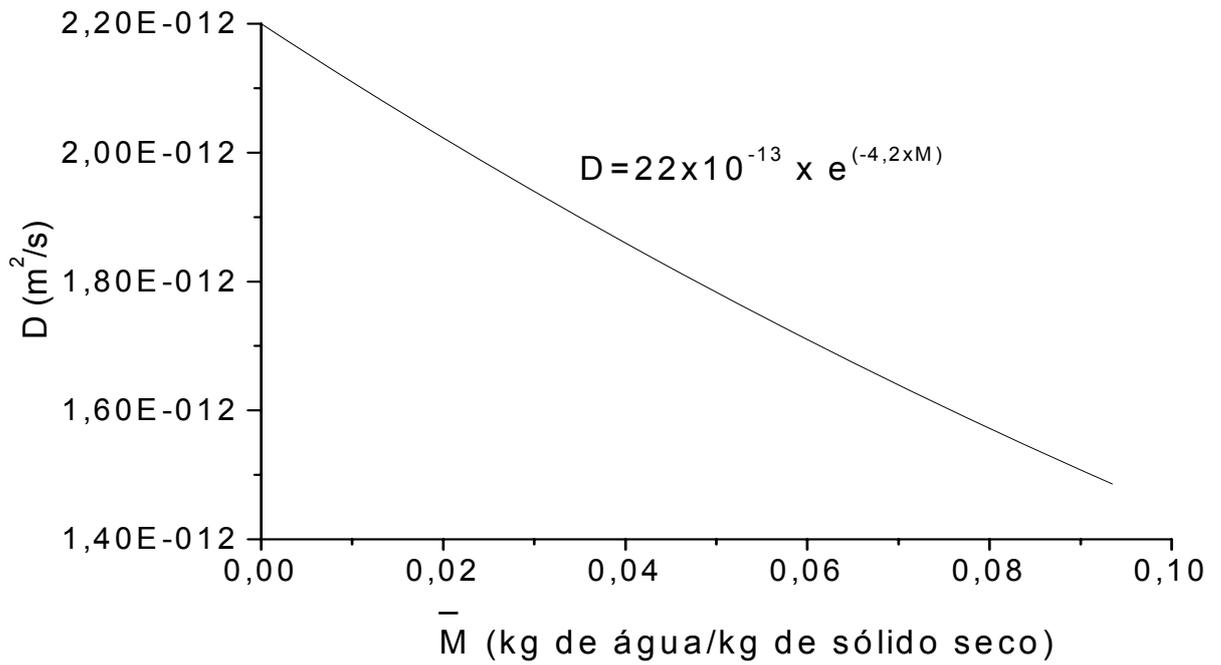


Figura 5.60 - Evolução do coeficiente de difusão em função do teor de umidade médio do compósito com 42% de Poliéster Insaturado) reforçado por 4 camadas de tecido híbrido (26% de Juta e 32% de Vidro).

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

6.1 CONCLUSÕES

Tecidos de juta e juta/vidro foram confeccionados e usados como reforços em poliéster insaturado. As propriedades mecânicas destes compósitos foram testadas em função do teor de fibra, tipo de fibra e orientação do teste. As propriedades de sorção de água deste compósito foram testadas em função do teor e tipo de fibra, e foi apresentada uma modelagem matemática tridimensional transiente para prever a transferência de massa durante a absorção de água. Os resultados encontrados mostraram que:

- houve um aumento nas propriedades mecânicas de todos os compósitos com o aumento do teor de fibras;
- as propriedades mecânicas em tração e em impacto dos compósitos reforçados com tecidos híbridos juta/vidro aumentaram com o teor total e relativo de ambas as fibras empregadas;
- propriedades mais elevadas foram obtidas para os compósitos reforçados com tecidos híbridos juta/vidro testados na direção do vidro onde foram obtidos aumentos relativos à matriz de até 5,9; 3,6, 3,7 e 15,8 vezes, na resistência à tração, módulo elástico, módulo de flexão e resistência ao impacto, respectivamente;
- a substituição de parte das fibras naturais celulósicas por fibra de vidro na carga de compósitos poliéster/juta diminui a capacidade de sorção de água do material.

- absorção de água aumentou com o teor de fibras de juta nos compósitos;
- a difusão de água no interior do sólido é rápida nas primeiras 50 h de processo, reduzindo sua velocidade para tempos posteriores;
- o teor de água no equilíbrio é muito pouco afetado pela quantidade de fibra de vidro presente dependendo, em forma linear, da percentagem de fibras de juta;
- é estatisticamente mais adequado realizar o ajuste de parâmetros a partir de uma distribuição uniforme de pontos ao longo do processo, desta forma, a proposta de ajustar os dados experimentais a uma equação exponencial com 3 termos e 6 parâmetros (Equação 4.22) foi satisfatória;
- a modelagem matemática utilizada para a obtenção da solução numérica de sorção de água em compósitos de poliéster insaturado reforçados por um tecido de juta e um tecido híbrido juta/vidro com dimensões de 20,00x20,00 mm² e espessura dependendo do teor de fibra usado foi adequada;
- o modelo de volumes finitos mostrou-se eficiente para discretizar a equação de difusão no sistema de coordenadas cartesianas para um sólido paralelepípedo, possibilitando a análise de fenômenos difusivos transientes nestes sólidos;
- o coeficiente de difusão mostrou-se dependente do teor de umidade dos compósitos estudados
- sob o ponto de vista da transferência de massa, os gradientes de umidade são maiores nos planos superficiais e nos vértices do sólido, que está em contato direto com a água. Sendo assim, tais regiões são mais sensíveis à tensão mecânica, que pode causar trincas e delaminações, e conseqüentemente diminuir a qualidade do produto.

- a modelagem matemática utilizada para obtenção das soluções analítica e numérica para prever o processo transiente de umidificação deste estudo, pode ser usada também para prever processos transientes de secagem, aquecimento e/ou resfriamento, em sólidos com geometria de paralelepípedo.

6.2 Sugestões para futuros trabalhos

- Aplicar os modelos apresentados neste trabalho a umidificação de outros sistemas;
- Estudar a difusão de água nos compósitos com fibras vegetais levando em consideração o inchamento 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.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

APICELLA, A.; MIGLARESI, C.; NICODEMA, L.; NICOLAIS, L.; IACCARINO, L.; ROCCOTELLI, S. Water sorption and mechanical properties of a glass- reinforced polyester resin, **Composites**, Vol.13, pp. 406-410, 1982.

ASTM- Anual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1988.

BAO, L-R.; YEE, A. F. Moisture diffusion and hygrothermal aging in bismaleimide matrix carbon fiber composites-part I: Uni-weave composites, **Composites Science and Technology**, Vol. 62, pp. 2099-2110, 2002.

BLASS, A., **Processamento de Polímeros**, 2^a ed., Editora da UFSC, 1988.

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

BLEDZKI, A. K.; REIHMANE, S.; GASSAN, J. Properties and modification methods for vegetable fibers for natural fiber composites, **Journal Applied Polymer Science**, **59**: 1329-1336, 1996.

BRYDSON, L. A., **Plastics Materials**, Butterworth Scientific, 4^a Edição London, 1982.

CAMINO, G.; LUDA, M.P.; POLISHCHUK, A. YA.; REVELLINO, M.; BLANCON, R.; MERLE, G.; MARTINEZ-VEGA, J.J. Kinetic aspects of water sorption in poliéster resin/glass-fibre composites, **Composites Science and Technology**, v. 57, p. 1469-1482, 1997.

CARVALHO, W.; BRETAS, R. Correlação morfológica/propriedades dinâmicas e mecânicas de compósitos de termoplásticos com fibras de carbono. In. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DE MATERIAIS, 1988, Campinas. **ANAIS...** São Paulo 1988. p. 457-459.

CARVALHO, L .H. Chemical modification of fibers for plastics reinforcement in composites, **First International Lignocellulosics Plastics Composites**, 1996, São Paulo, p.197-222, 1996.

CARVALHO, L. H. Envelhecimento de compósitos poliéster/juta pultrusados, Projeto de Iniciação Científica, UFPB/ CCT/ DEMa, 1998.

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

CARVALHO, L. H; CAVALCANTI, W. S; NÓBREGA, M. M. S. Tensile properties of hybrid vegetable/glass fiber fabric reinforced unsaturated polyester composites. In. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NATURAL POLYMERS AND COMPOSITES IV, 2002, Águas de São Pedro. **Anais...** São Paulo, 2002. p. 515-518.

CAVALCANTI, W. S.; ALSINA, O. L. S.; CARVALHO, L. H. Influência de modificações do reforço na cinética de sorção de água em compósitos poliéster/juta. In. CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS. 6. 2001, Gramado. **Anais...**Rio Grande do Sul, 2001. p.628-631.

CLARK, R. A.; ANSELL, M. P. Jute and glass fibre hybrid laminates, **Journal Materials Science**, v.21: p.269 – 276, 1986.

CHAWLA, K. K.; BOSTOS, A. C. The mechanical properties of jute fibre and polyester/jute composite, In Proceedings of Third International Conference on Mechanical Behavior of Materials, Pergamon Press. Cambridge, v. 3, 1979, p. 191.

CHATEAUMINOIS, A., VICENT, L., CHABERT, B.E., SOULIER, J.P. Study of the interfacial degradation of a glass-epoxy composite during hygrothermal ageing using water diffusion measurements and dynamic mechanical thermal analysis **Polymer**, v. 35, no. 22, p. 4766-4774, 1994.

CHOI, H. S.; AHN, K. J.; NAN, J.-D.; CHUN, H. J. Hygroscopic aspects of epoxy/carbon fiber composite laminates in aircraft environments, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.32, p.709-720, 2001.

CHUNG, F. D., Unified theory and guidelines on adhesion, **Journal of Applied Polymer Science** p. 1319-1331, 1991.

COMPANHIA TEXTIL DE CASTANHAL. Disponível em <<http://www.castanhal.com.br>> Acesso em: 06 abril 2004.

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

DASH, B. N.; RANA, A. K.; MISHRA, H. K.; NAVAK, S. K.; MISHRA, S. C.; TRIPATHY, S. S. Novel, low-cost jute-polyester composites. part 1: Processing mechanical properties, and SEM analysis, **Polymer Composites**, v.20, p.62-71, 1999.

d'ALMEIDA, J. R. M., Propriedades Mecânicas de Fibras de Juta, **Ciência e Cultura**, 39, p.1025-1032, 1987.

ELLIS, B. e.; FOUND, M.S. The effects of water absorption on a polyester/chopped strand mat laminate **Composites**, v. 14, n. 3. p. 237-243, 1983

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**, Houghton Mifflin Company, Boston, 1981.

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, p. 369-374, 2002.

GHOSH, P.; SAMANTA, A. K.; DEV, D. Simultaneous free radical polymerization and acidic polycondensation of acrylamide formaldehyde de resin in jute fabric, **Journal Applied Polymer Science**, v. 64, p. 2473-2489, 1997.

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, p. 277-248, 1999.

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

HAN, K.S.; KOUTSKY, J. Effect of water on the Interlaminar fracture behaviour of glass fibre-reinforced polyester composites”, **Composites**, v.14, p. 67-70, 1983.

HULL, D. **An Introduction to Composite Materials**, Cambridge University Press, Cambridge, 1981.

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

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

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

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

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

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional.** Rio de Janeiro: 1995, 424p.

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

MISHRA, S.; MOHANTY, A. K.; DRZAL, L.T.; MISRA, M.; PARIJA, S.; NAYAK, S. K.; TRIPANTHY, S. S. Studies on machanical performance of biofibre/glass reinforced polyester hybrid composites, **Composites Science and Technology**, v.63, p. 1377-1385, 2003.

MINKOWYCZ, W. J.; SPARROW, E. M.; SCHNEIDER, G. E.; PLETCHER, R. H. Handbook of numerical heat transfer. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1988, 1024p.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M., Studies on jute composites- A Literature Review, **Polym. Plast. Technol. Eng.**, v. 34, n. 5, p.729-792, 1995.

MOHANTY, A. K.; WIBOWO, A.; MISRA, M.; DRZAL, L.T. Effect of process engineering on the performance of natural fiber reinforced cellulose acetate

biocomposites, **Composites Part A- Applied Science and Manufacturing**, v. . 35, p. 363-370, 2004.

MORASSI, O J. Fibras naturais, aspectos gerais e aplicação na industria automobilística, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS DOS MATERIAIS. 11. 1995 Águas de São Pedro. **ANAIS...**São Paulo, SP, 1994.

NASCIMENTO, J. J. S.; LIMA, A. G. B. de.; BELO, F. A. Solução Numérica para o Problema de Difusão Transiente em sólidos paralelepípedos. In: 14º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais, 14., (CBECIMAT) 2000, CD-ROM, São Pedro, São Paulo, Brasil, 2000.

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.

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

NÓBREGA, M. M. S.; CARVALHO, L. H. Propriedades mecanicas de compósitos de matriz poliéster reforçados por tecidos híbridos In: Simpósio Latino Americano de Polímero (SLAP 2000), 7., Havana, Cuba, 2000, v.1, p.38.

PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow.** New York, Hemisphere Publish. Coop, 197p, 1980.

PAVAN, R. M. V.; SARAVANAN, V.; DINESH, A. R., RAO, Y. J.; SRIHARI, S.; REVATHI, A. Hygrothermal effects on painted and unpainted glass/epoxy composites- Part A: Moisture absorption characteristics”, **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 20, n.12, p. 1036-1046, 2001

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, 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, p. 233-243, 2004.

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.

RESANA S/A Divisão de resinas para compostos reforçados. RESAPOL 10-225. Boletim Técnico –São Paulo, 1997.

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

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

SEMSARZADEH, M. A.; LOTFALI, A. R.; MIRZADEH, H. Jute reinforced polyester structures, **Polymer Composite**, v. 5, p. 141-142, 1984.

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

SEMSARZADEH, M. A. Fiber matrix interactions in jute reinforced polyester resin, **Polymer Composite**, v.7, n.2, p.23-25, 1986.

SHAH, A. N.; LAKKAD, S. C. Mechanical properties of jute-reinforced plastics, **Fibre Science and Technology**, v.15, p.41-46, 1981.

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

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

SRIDHAR, M. K.; BASAVARAPPA, G.; KASTURI, S. G ; ASUBRAMANIAN, N. Mechanical properties of jute-poliéster composites, **Indian Journal of Technology**, v.22, p.213 – 215, 1984.

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

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

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

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**, Vol. 33, pp. 43-52, 2002.

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

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

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

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

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

ZANNI-DEFFARGES, M. P.; SHANAHAN, M. E. R. Diffusion of water an epoxy adhesive: comparison between bulk behavior and adhesive joints, **Int. J. Adhesion and Adhesives**, v. 15, N. 3, p. 137-142, 1995.

ANEXO A

PROPRIEDADES EM TRAÇÃO

Tabela A1 - Propriedades Mecânicas de Compósitos Poliéster/Tecido Híbrido Juta-Vidro

Tecido	Número de Camada	Teor de Fibras (%)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Alongamento na Ruptura (%)	Módulo de Flexão (MPa)	Resistência ao Impacto (J/m)
Matriz	0	0	39,7 ± 5,5	1,44 ± 0,17	3,9 ± 0,9	2,55 ± 0,34	75,0 ± 4,4
Juta/ Vidro	1	14	26,2 ± 0,2	2,73 ± 0,06	1,88 ± 0,31	3,54 ± 0,28	110,2 ± 23,4
	2	26	44,3 ± 3,4	3,15 ± 0,22	2,47 ± 0,49	4,85 ± 0,95	184,7 ± 26,9
	3	40	51,6 ± 1,8	3,19 ± 0,42	3,52 ± 0,21	5,16 ± 0,62	428,7 ± 33,6
	4	50	56,2 ± 1,9	3,75 ± 0,34	3,45 ± 0,25	7,45 ± 0,74	447,3 ± 35,0

Tabela A2 - Propriedades Mecânicas de Compósitos Poliéster/Tecido Híbrido Juta-Vidro

Tecido	Número de Camada	Teor de Fibras (%)	Direção do Teste	(%) de Fibra na Direção do Teste	Resistência à Tração (Mpa)	Módulo de Young (Gpa)	Alongamento na Ruptura (%)	Módulo de Flexão (Mpa)	Resistência ao Impacto (J/m)
Matriz	0	0	-	--	39,7 ± 5,5	1,44 ± 0,17	3,9 ± 0,9	2,55 ± 0,34	75,0 ± 4,4
Juta/ Vidro	1	20	Juta	9	16,8 ± 2,5	2,46 ± 0,25	1,6 ± 0,2	2,55 ± 0,34	100,0 ± 14,6
	1	20	Vidro	11	89,8 ± 3,8	3,22 ± 0,27	5,1 ± 0,4	3,29 ± 0,33	720,1 ± 83,7
	2	38	Juta	17	37,5 ± 1,9	3,24 ± 0,10	3,5 ± 0,8	2,61 ± 0,18	162,2 ± 36,0
	2	38	Vidro	21	160,4 ± 11,8	3,97 ± 0,26	5,6 ± 0,4	4,53 ± 0,38	1197,7 ± 155,6
	3	50	Juta	22	43,4 ± 1,5	3,60 ± 0,22	3,3 ± 0,6	5,09 ± 0,42	305,3 ± 30,2
	3	50	Vidro	28	177,2 ± 14,6	5,16 ± 0,22	5,8 ± 0,5	5,67 ± 0,20	> 2000
	4	58	Juta	26	53,1 ± 4,6	3,88 ± 0,29	3,9 ± 0,8	8,52 ± 0,86	379,7 ± 61,2
	4	58	Vidro	32	235,7 ± 8,9	5,23 ± 0,36	8,0 ± 0,5	7,07 ± 0,53	> 2000

ANEXO B

VOLUME CRÍTICO

Memória de cálculo do volume crítico (V_c).

A fração de volume crítico é dada pela seguinte equação:

$$V_{\text{crit}} = \frac{\sigma_m - \sigma'_m}{\sigma_f + \sigma'_m} \dots\dots\dots(B1)$$

Cálculo do volume crítico.

dados:

$$\sigma_m = 39,7 \text{ MPa} \dots\dots\dots \delta_m = 3,9 \%$$

$$\sigma_{fj} = 116,07 \text{ MPa} \qquad \delta_{fj} = 1,71 \%$$

$$\sigma_{fv} = 2000 \text{ MPa} \qquad \delta_{fv} = 2,5 \%$$

Ler no gráfico, tensão versus deformação da matriz poliéster, quanto é a tensão na matriz quando a fibra de juta rompe. (σ'_m). Isto é, em 1,7% de deformação da fibra de juta corresponde no gráfico da matriz uma tensão (σ'_m) de 15 MPa.

Substituindo na (Equação B1) os dados da tensão da matriz, tensão da fibra de juta e o valor da tensão na matriz quando a fibra se rompe (σ'_m), encontraremos o valor do volume crítico de fibra de juta.

$$V_{\text{cr}} = \frac{39,7 - 15}{116,07 - 15} = \frac{24,7}{101,07} = 0,244 = 24,5\%$$

Para o cálculo de volume crítico de fibra de vidro o procedimento é o mesmo, só que agora o valor de (σ'_m) pelo gráfico da matriz é 20,7Mpa para 2,5% de deformação da fibra de vidro.

$$V_{\text{cr}} = \frac{39,7 - 20,7}{2000 - 20,7} = \frac{19}{1979,3} = 0,009 = 0,9\%$$

Observação:

Para comparar os teores de fibra encontrados nos compósitos estudados (em massa) com o volume crítico, foi necessário fazer uma transformação de fração mássica para fração volumétrica através da seguinte equação:

$$V_1 = \frac{\frac{W_1}{\rho_1}}{\frac{W_1}{\rho_1} + \frac{W_2}{\rho_2} + \frac{W_3}{\rho_3}}$$

onde:

V_1 é o volume do material 1 (fibra de juta)

W_1 é o teor de fibra de juta (em massa)

ρ_1 é a densidade da fibra de juta

W_2 é o teor de fibra de vidro (em massa)

ρ_2 é a densidade da fibra de vidro

W_3 é o teor do poliéster insaturado (em massa)

ρ_3 é a densidade do poliéster insaturado

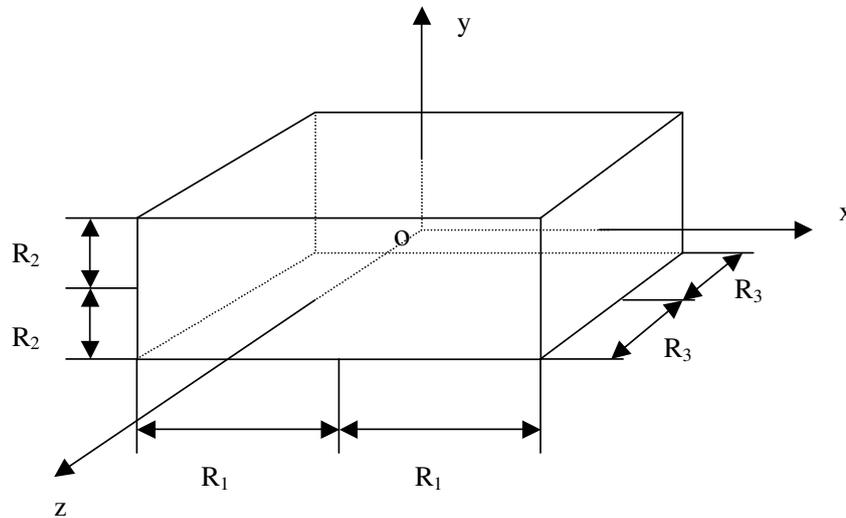
Tabela B1 – Relação entre fração mássica e fração volumétrica

Material	Fração Mássica (%)		Fração Volumétrica (%)	
Juta		14		11,5
		26		22
		40		35
		50		44,5
Juta/Vidro	20	9	14	8
		11		6
	38	17	28	16
		21		12
	50	22	40	22
		28		18
	58	26	41	26,5
		32		14,5

ANEXO C

RELAÇÃO ÁREA/VOLUME

Cálculo da relação área/volume dos sólidos estudados



Exemplo:

Compósito com 2 camadas de juta com dimensões $20,0 \times 10^{-3} \times 2,3 \times 10^{-3} \times 20,0 \times 10^{-3}$

Para o cálculo da área temos:

$$S = [R_1 \times R_2 + R_1 \times R_3 + R_2 \times R_3]$$

$$S = [20,0 \times 10^{-3} \times 2,3 \times 10^{-3} + 20,0 \times 10^{-3} \times 20,0 \times 10^{-3} + 2,3 \times 10^{-3} \times 20,0 \times 10^{-3}]$$

$$S = [4,6 \times 10^{-5} + 4,0 \times 10^{-4} + 4,6 \times 10^{-5}]$$

$$S = 4,92 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Para o cálculo do volume temos:

$$V = R_1 \times R_2 \times R_3$$

$$V = 20,0 \times 10^{-3} \times 2,3 \times 10^{-3} \times 20,0 \times 10^{-3}$$

$$V = 9,20 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

Relação área/volume

$$S/V = 4,92 \times 10^{-4} \text{ m}^2 / 9,20 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

$$S/V = 534,8 \text{ m}^2/\text{m}^3$$