

Universidade Federal de Santa Catarina
Centro Tecnológico
Departamento de Engenharia Química e
Engenharia de Alimentos
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Química

Jackson Roberto Eleotério

Modelagem e simulação do processo de secagem
de madeiras serradas de espécies tropicais
brasileiras.

Florianópolis (SC)
2009

Jackson Roberto Eleotério

Modelagem e simulação do processo de secagem de
madeiras serradas de espécies tropicais
brasileiras.

Tese de doutorado apresentada
ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Química como
requisito para obtenção do
Título de Doutor em Engenharia
Química.

Orientadora:

Prof. Dra. Selene M. A. Guelli
Ulson de Souza

Co-orientadores:

Prof. Dr. Antônio Augusto
Ulson de Souza

Prof. Dr. José Alexandre
Borges Valle

Florianópolis (SC)
2009

Modelagem e simulação do processo de secagem de
madeiras serradas de espécies tropicais
brasileiras.

Por

Jackson Roberto Eleotério

Tese julgada para obtenção do título de Doutor
em Engenharia Química, área de concentração de
Fenômenos de Transporte e Meios Porosos,
aprovada na sua forma final pelo Programa de
Pós-graduação em Engenharia Química da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Banca Examinadora

Prof^a. Dr^a. Selene M. A. Guelli Ulson de Souza
Orientadora

Prof. Dr. Antônio Augusto Ulson de Souza
Co-orientador

Prof. Dr. José Alexandre Borges Valle
Co-orientador - FURB

Prof. Dr. Ayres Ferreira Morgado
CPGENQ

Prof^a. Dr^a. Mara Gabriela Novy Quadri
CPGENQ

Prof. Dr. Ivaldo Pontes Jankowsky
ESALQ/USP - membro externo

Prof. Dr. Adriano da Silva
UNOCHAPECO - membro externo

Agradecimentos

À Professora Dra. Selene Maria de Arruda Guelli Ulson de Souza, por me aceitar como seu orientando, pela dedicação na orientação deste trabalho e por ser uma referência como docente e pesquisadora.

Ao Professor Dr. Antônio Augusto Ulson de Souza, pela suas inúmeras contribuições como professor e co-orientador em todas as fases do desenvolvimento desta tese.

Ao Professor Dr. José Alexandre Borges Valle, pelo apoio com sugestões, equipamentos, revisões que foram fundamentais para o resultado final deste trabalho.

Aos Professores do Departamento de Engenharia Química: Dr. Sávio Leandro Bertoli, Dr. Laércio Ender, Dr. Edelberto Luiz Reinehr e Dra. Lorena Benathar Balloô Tavares, pela ajuda em diversos momentos.

Aos Professores Dr. Ivaldo Pontes Jankowsky, Dra. Mara Gabriela Novy Quadri e Dr. Ayres Ferreira Morgado, pelas sugestões apresentadas durante o Exame de Qualificação.

À Sra. Regiane Perini Bertoli pela transcrição do resumo para o idioma inglês.

Aos professores do Departamento de Engenharia Florestal da FURB, pelo apoio à solicitação de afastamento parcial.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina, por ter me aceitado como aluno, pela excelência do quadro docente e pela organização do curso.

À Universidade Regional de Blumenau, pela concessão da bolsa de afastamento parcial e pelo auxílio, especialmente através da Divisão de Administração do Campus - Setores de Marcenaria, Transporte e Ferraria.

À minha ex-aluna, Engenheira Florestal M. Sc. Maureen Voigtlaender, pela ajuda na obtenção

de diversos trabalhos científicos disponíveis na ESALQ/USP.

Aos alunos de graduação em Engenharia Florestal que contribuíram em alguma parte deste trabalho, em especial Sheila Birkner Badia e Rafael Valduga.

À Vitória Régia Exportadora, na pessoa dos Engenheiros Sandro e Martin Heisch, pela doação da madeira objeto deste estudo.

À Móveis Roosmark, na pessoa do Sr. Dieter Schwertl, pela doação da maravalha que foi utilizada neste e em diversos outros trabalhos.

E por fim, mas não menos importante, o agradecimento à todos os integrantes da minha família, pelo apoio e incentivo. Em especial à Eliane, minha esposa, pela ajuda durante vários finais de semana e feriados de trabalho no laboratório e por me substituir em casa durante as muitas ausências. Às minhas filhas Luísa e Elisa, pela compreensão, apoio e alegria quando passávamos os finais de semana no "seca-madeira".

Muito Obrigado.

RESUMO

A modelagem e a simulação da secagem de madeira podem auxiliar na definição das condições adequadas de secagem para cada espécie, definidas pelo programa de secagem. Apesar de existirem outros métodos de secagem, a secagem convencional ainda é a mais utilizada, especialmente para madeiras tropicais. Entre as espécies para as quais há carência de informações relativas à secagem estão a muirapiranga (*Brosimum rubescens* e *B. paraensis*), a timborana ou fava-orelha-de-negro (*Enterolobium schomburgkii*) e a andiroba (*Carapa guianensis*). Para estas espécies foram determinados parâmetros necessários à modelagem do processo de secagem, como a difusividade efetiva e isotermas de sorção. As isotermas de sorção foram determinadas experimentalmente em câmaras com umidade relativa do ar ajustada com soluções salinas supersaturadas, nas temperaturas de 47, 60 e 85 °C. Os modelos de Hailwood e Horrobin (HH) e Gugenhein, Andersen e de Bôer (GAB) foram ajustados com os dados experimentais e utilizados para definir a umidade de equilíbrio nas condições de temperatura e umidade relativa determinadas nos programas de secagem. Cerca de cinquenta peças por espécie foram submetidas a secagem nas temperaturas de 50 e 70 °C e umidades relativas de 20 e 60%. As curvas de secagem obtidas através das pesagens diárias permitiram a determinação da difusividade efetiva. Analisando o conjunto das três espécies, a difusividade apresentou alta correlação negativa com a massa específica básica da madeira. Os coeficientes convectivos de transferência de massa foram determinados experimentalmente, mas os valores obtidos foram considerados inconsistentes pela dificuldade de determinar o teor de umidade superficial da madeira e pela ausência de uma

fase de secagem com taxa constante. Nos modelos foram utilizadas propriedades térmicas, coeficientes de transferência de massa e de calor obtidos através de relações empíricas. A validação da difusividade efetiva foi realizada através da aplicação em um modelo difusional, unidimensional, isotérmico, com coeficiente de transferência de massa infinito, discretizado pelo método dos volumes finitos. Foi possível reproduzir curvas de secagem e os gradientes de umidade em diferentes momentos durante a secagem. Em seguida foram simulados programas de secagem recomendados para cada uma das três espécies utilizando um modelo composto por uma equação da conservação da energia e uma equação da conservação da espécie química (balanço de massa para a água), sendo a condução de calor e a difusão de umidade os componentes principais destas equações.

Palavras-chave: madeiras tropicais, secagem convencional, difusividade efetiva, isoterma de sorção, modelos matemáticos, simulação numérica.

ABSTRACT

Wood drying modeling and simulation can help in the definition of appropriate drying conditions for each species, defined by the drying schedule. Despite the existence of other drying methods, the conventional kiln drying is still the most used, especially for tropical lumber. Among the species with lack of information with respect to their drying there is muirapiranga (*Brosimum rubescens* e *B. paraensis*), timborana or fava-orelha-de-negro (*Enterolobium schomburgkii*) and andiroba (*Carapa guianensis*). For these species, parameters necessary for the drying process modeling, such as the effective diffusivity and sorption isotherms, were determined. The sorption isotherms have experimentally been determined in chambers with relative atmospheric humidity, adjusted with supersaturated salt solutions, at temperatures of 47, 60, and 85 °C. The Hailwood and Horrobian (HH) and Gugenheim, Andersen and de Bôer (GAB) models were adjusted to the experimental data and used to define the equilibrium moisture content under the temperature and relative humidity conditions determined in the kiln drying schedules. Approximately 50 samples of each species were submitted to drying under temperatures of 50 and 70°C and relative humidity of 20 and 60 %. The drying curves obtained by weighed daily allowed the determination of the effective diffusivity. Analyzing the three species, the diffusivity has presented a high negative correlation with the basic density of the wood. The convective mass transfer coefficients were experimentally determined, but the values obtained were considered inconsistent due to the difficulty in determining the superficial wood humidity contents and to the absence of a constant-drying-rate period. In the models, thermal

properties, mass and heat transfer coefficients, obtained through empirical relations, were used. The validation of the effective diffusivity was performed through the application in a diffusional, one-dimensional, and isothermal model, with infinite mass transfer coefficient, and discretised by the finite volume method. It was possible to reproduce drying curves and the moisture gradients in different times during the drying. Following, drying schedules recommended for each of three species were simulated, using a model compounded by an energy conservation equation and a chemical species conservation equation, where heat conduction and humidity diffusion are the main components in these equations.

Keywords: Tropical woods, conventional drying, effective diffusivity, sorption isotherms, mathematical models, numerical simulation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1: Representação tridimensional da madeira de folhosa.	40
FIGURA 4.1: Localização das amostras para determinação do gradiente inicial de umidade.	70
FIGURA 4.2: Visão através da janela de inspeção, das amostras submetidas à secagem.	71
FIGURA 4.3: Unidade piloto de secagem de madeira serrada.	72
FIGURA 4.4: Lâminas obtidas para determinação do gradiente de umidade durante a secagem.	73
FIGURA 4.5: Volumes de controle com destaque para os volumes fictícios.	84
FIGURA 4.6: Fluxograma de simulação dos programas de secagem.	91
FIGURA 5.1: Teor de umidade inicial e máximo.	94
FIGURA 5.2: Concentração inicial de umidade.	95
FIGURA 5.3: Isotermas de sorção para muirapiranga, nas temperaturas de 47, 65 e 80 °C.	106
FIGURA 5.4: Isoterma de sorção para timborana, nas temperaturas de 47, 65 e 80 °C.	106
FIGURA 5.5: Isoterma de sorção para andiroba, nas temperaturas de 47, 65 e 80 °C.	107
FIGURA 5.6: Adsorção em mono e multicamadas para muirapiranga segundo a teoria de Hailwood e Horrobin e GAB.	108
FIGURA 5.7: Adsorção em mono e multicamadas para timborana segundo a teoria de Hailwood e Horrobin e GAB.	109
FIGURA 5.8: Adsorção em mono e multicamadas para andiroba segundo a teoria de Hailwood e Horrobin e GAB.	109
FIGURA 5.9: Relação entre o inverso da temperatura e o logaritmo neperiano da umidade relativa do ar para umidades de equilíbrio constantes. Os pontos em vermelho são as condições aplicadas à secagem experimental.	110
FIGURA 5.10: Energia de adsorção em função do teor de umidade de equilíbrio da madeira.	111

FIGURA 5.11: Determinação da difusividade efetiva através da linearização da solução analítica e da minimização da soma dos quadrados dos desvios.	113
FIGURA 5.15: Teor de Umidade das lâminas mais externas após diferentes tempos de secagem a 50 °C e 60% de umidade relativa do ar – Carga 1.	122
FIGURA 5.16: Teor de Umidade das lâminas mais externas após diferentes tempos de secagem a 50 °C e 20% de umidade relativa do ar – Carga 2.	123
FIGURA 5.17: Teor de Umidade das lâminas mais externas após diferentes tempos de secagem a 70 °C e 60% de umidade relativa do ar – Carga 3.	123
FIGURA 5.18: Teor de Umidade das lâminas mais externas após diferentes tempos de secagem a 70 °C e 60% de umidade relativa do ar – Carga 4.	124
FIGURA 5.19: Teor de Umidade das lâminas mais externas após diferentes tempos de secagem a 70 °C e 20% de umidade relativa do ar – Carga 5.	124
FIGURA 6.1: Concentração de umidade, potencial de secagem e temperatura dos programas de secagem simulados para muirapiranga.	131
FIGURA 6.2: Perfis de temperatura e concentração de umidade após 1200 s do início da secagem.	132
FIGURA 6.3: Perfis de temperatura e concentração de umidade após 600 s da primeira mudança das condições de secagem.	132
FIGURA 6.4: Perfis de temperatura e concentração de umidade após 600 s da segunda mudança das condições de secagem.	133
FIGURA 6.5: Perfis de temperatura e concentração de umidade ao final do processo de secagem.	133
FIGURA 6.6: Perfis de temperatura e concentração de umidade após 1200 s do início da secagem.	135
FIGURA 6.7: Perfis de temperatura e concentração de umidade após 600 s da primeira mudança das condições de secagem.	135

FIGURA 6.8: Perfis de temperatura e concentração de umidade após 600 s da segunda mudança das condições de secagem.	136
FIGURA 6.9: Perfis de temperatura e concentração de umidade após 600 s da terceira mudança das condições de secagem.	136
FIGURA 6.10: Perfis de temperatura e concentração de umidade após 600 s da quarta mudança das condições de secagem.	137
FIGURA 6.11: Perfis de temperatura e concentração de umidade ao final do processo de secagem.	137
FIGURA 6.12: Concentração de umidade, potencial de secagem e temperatura dos programas de secagem simulados para timborana.	139
FIGURA 6.13: Perfis de temperatura e concentração de umidade após 1200 s do início da secagem.	140
FIGURA 6.14: Perfis de temperatura e concentração de umidade após 600 s a primeira mudança das condições de secagem.	141
FIGURA 6.15: Perfis de temperatura e concentração de umidade ao final do processo de secagem.	141
FIGURA 6.16: Perfis de temperatura e concentração de umidade após 1200 s do início da secagem.	142
FIGURA 6.17: Perfis de temperatura e concentração de umidade 600 s após a primeira mudança das condições de secagem.	143
FIGURA 6.18: Perfis de temperatura e concentração de umidade 600 s após a segunda mudança das condições de secagem.	143
FIGURA 6.19: Perfis de temperatura e concentração de umidade 600 s após a terceira mudança das condições de secagem.	144
FIGURA 6.20: Perfis de temperatura e concentração de umidade 600 s após a quarta mudança das condições de secagem.	144

FIGURA 6.21: Perfis de temperatura e concentração de umidade ao final do processo de secagem.....	145
FIGURA 6.22: Concentração de umidade, potencial de secagem e temperatura dos programas de secagem simulados para andiroba.....	147
FIGURA 6.23: Perfis de temperatura e concentração de umidade após 1200 s do início da secagem.....	148
FIGURA 6.24: Perfis de temperatura e concentração de umidade 600 s após a primeira mudança das condições de secagem.....	148
FIGURA 6.25: Perfis de temperatura e concentração de umidade ao final do processo de secagem.....	149
FIGURA 6.26: Perfis de temperatura e concentração de umidade após 1200 s do início da secagem.....	150
FIGURA 6.27: Perfis de temperatura e concentração de umidade 600 s após a primeira mudança das condições de secagem.....	150
FIGURA 6.28: Perfis de temperatura e concentração de umidade 600 s após a segunda mudança das condições de secagem.....	151
FIGURA 6.29: Perfis de temperatura e concentração de umidade 600 s após a terceira mudança das condições de secagem.....	151
FIGURA 6.30: Perfis de temperatura e concentração de umidade 600 s após a quarta mudança das condições de secagem.....	152
FIGURA 6.31: Perfis de temperatura e concentração de umidade 600 s após a quinta mudança das condições de secagem.....	152
FIGURA 6.32: Perfis de temperatura e concentração de umidade 600 s após a sexta mudança das condições de secagem.....	153
FIGURA 6.33: Perfis de temperatura e concentração de umidade 600 s após a sétima mudança das condições de secagem.....	153

FIGURA 6.34: Perfis de temperatura e concentração de umidade ao final do processo de secagem.....	154
FIGURA 6.35: Concentração de umidade em função do tempo de secagem para timborana para diferentes espessuras da peça.	155
FIGURA 6.36: Concentração de umidade em função do tempo de secagem para timborana para diferentes difusividades efetivas.....	156
FIGURA 6.37: Concentração de umidade em função do tempo de secagem para timborana para diferentes concentrações iniciais de umidade.	157

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1: Difusividade efetiva (convertida para unidade do SI).	49
TABELA 4.1: Umidade relativa do ar (%) obtida em diferentes temperaturas para soluções salinas saturadas.	75
TABELA 4.2: Termos correspondentes na equação generalizada.	81
TABELA 4.3: Termos fontes para as condições de contorno quando a variável de interesse for a temperatura e a concentração de umidade.	86
TABELA 4.4: Programas umidade-temperatura sendo UM (teor de umidade base seca da madeira (%)), TBS (temperatura de bulbo seco (oC)), UR (umidade relativa do ar (%)) e UEq (umidade de equilíbrio).	88
TABELA 4.5: Programas umidade-temperatura sendo UM (teor de umidade base seca da madeira (%)), TBS (temperatura de bulbo seco (oC)), UR (umidade relativa do ar (%)) e UEq (umidade de equilíbrio).	89
TABELA 4.6: Valores utilizados para simular as variações nas propriedades da madeira com impacto no tempo de secagem.	92
TABELA 5.1: Umidade de equilíbrio (% - base seca) obtida experimentalmente após exposição à diferentes soluções saturadas. Valores médios seguidos de desvio-padrão entre parênteses. . .	97
TABELA 5.2: Coeficientes das isotermas de sorção para Muirapiranga, ajustadas pelos modelos de Hailwood e Horrobian e Gugenhein, Andersen e de Bôer (GAB) com o respectivo erro médio (E%) e o coeficiente de determinação (R^2).	100
TABELA 5.3: Coeficientes das isotermas de sorção para Timborana, ajustadas pelos modelos de Hailwood e Horrobian e Gugenhein, Andersen e de Bôer (GAB) com o respectivo erro médio (E%) e o coeficiente de determinação (R^2).	101
TABELA 5.4: Coeficientes das isotermas de sorção para Andiroba, ajustadas pelos modelos de	

Hailwood e Horrobian e Gugenhein, Andersen e de Bôer (GAB) com o respectivo erro médio (E%) e o coeficiente de determinação (R^2).	103
TABELA 5.5: Ponto de saturação das fibras obtido através da extrapolação das isotermas de sorção, nas temperaturas de 47, 65 e 80 °C.	107
TABELA 5.6: Coeficientes do modelo de regressão polinomial ajustado para a energia de adsorção (kJ/kg) em função do teor de umidade de equilíbrio (% - base seca).	111
TABELA 5.7: Teor de umidade de equilíbrio (% - base seca), por espécie, em função da temperatura e umidade relativa do ar (UR %).	112
TABELA 5.8: Difusividade efetiva por peça das diferentes espécies, submetidas à secagem em diferentes temperaturas e umidades relativas do ar (UR - %).	115
TABELA 5.9: Número de Reynolds (Re), Schmidt (Sc), Prandtl (Pr), Nusselt (Nu) e coeficiente convectivo de transferência de calor (hc [W/(m ² K)]), Número de Sherwood (Sh) e coeficiente convectivo de transferência de massa (hm [m/s]).	120
TABELA 5.10: Coeficientes convectivos experimentais de transferência de massa.	126
TABELA 6.1: Tempo e taxas médias de secagem para programas de secagem sugeridos por CIRAD e por FPL para muirapiranga, sendo UM = umidade da madeira (%), C = concentração (kg/m ³), t = tempo de secagem (s) e Tx = taxa de secagem (kg/m ³ s).	130
TABELA 6.2: Tempo e taxas médias de secagem para programas de secagem sugeridos por CIRAD e por FPL para timborana, sendo UM = umidade da madeira (%), C = concentração (kg/m ³), t = tempo de secagem (s) e Tx = taxa de secagem (kg/m ³ s).	138
TABELA 6.3: Tempo e taxas médias de secagem para programas de secagem sugeridos por CIRAD e por FPL para andiroba, sendo UM = umidade da madeira	

(%), C = concentração (kg/m^3), t = tempo de secagem (s) e T_x = taxa de secagem ($\text{kg}/\text{m}^3 \text{ s}$) 146

NOMENCLATURA

A =	área transversal ao fluxo de vapor de água (m^2)
a =	lado do retângulo formado pelo duto hidráulico (m)
A_C =	fator de ajuste para o calor específico da madeira úmida.
alt =	altitude (m)
b =	lado do retângulo formado pelo duto hidráulico, distância entre tabiques (m)
Bi_h =	número de Biot de calor
Bi_m =	número de Biot de massa
C =	concentração de umidade (kg/m^3)
C_g =	constante de Guggenheim
\bar{C} =	concentração média de umidade (kg/m^3)
C_0 =	concentração inicial de umidade (kg/m^3)
C_e =	concentração de umidade em equilíbrio (kg/m^3)
c_m =	umidade específica (% $kg_{\text{água}}/kg_{\text{sólido seco}}$)
c_p =	calor específico $cal/(g \text{ } ^\circ C)$
c_{p0} =	calor específico da madeira anidra ($cal/(g \text{ } ^\circ C)$)
c_{pU} =	calor específico da madeira úmida ($cal/(g \text{ } ^\circ C)$)
c_{pw} =	calor específico da água $cal/(g \text{ } ^\circ C)$
C_s =	concentração de umidade superficial (kg/m^3)
D =	difusividade efetiva (m^2/s)
D_0 =	fator de Arrhenius (m^2/s)
D_H =	diâmetro hidráulico (m)
E =	variação adimensional de concentração
E_a =	energia de ativação da difusão ($kJ/kgmol$)
G =	massa específica (relação entre a massa anidra e o volume aparente no teor de umidade considerado)
h =	entalpia (kJ/kg)
h_h =	coeficiente convectivo de transferência de calor ($W/(m^2 \text{ } K)$)

h_m	=	coeficiente convectivo de transferência de massa (m/s)
K	=	permeabilidade
k_{ar}	=	condutividade térmica do ar (W/m K)
k_{hL}	=	condutividade efetiva paralela às fibras (W/(m K))
k_{hT}	=	condutividade efetiva perpendicular às fibras (W/(m K))
L	=	comprimento na direção do fluxo (m)
\dot{m}	=	fluxo de massa (kg/(m ² s))
M_a	=	massa molecular do ar (kg/kgmol)
M_v	=	massa molecular da água (kg/kgmol)
Nu	=	número de Nusselt
p	=	pressão parcial de vapor (Pa)
P_{atm}	=	pressão atmosférica (Pa)
Pr	=	número de Prandtl
p_s	=	pressão de vapor na saturação (Pa)
$p_s(TBU)$	=	pressão de vapor na saturação em função da temperatura de bulbo úmido (Pa)
q	=	fluxo de calor
r	=	calor latente de vaporização (J/kg)
R	=	constante dos gases ideais (kJ/(kgmol K))
Re	=	número de Reynolds
Sc	=	número de Schmidt
Sh	=	número de Sherwood
s_m	=	termo fonte de massa
s_q	=	termo fonte de energia
T	=	temperatura (K)
t	=	tempo (s)
TBS	=	temperatura de bulbo seco (°C)
TBU	=	temperatura de bulbo úmido (°C)
T_w	=	temperatura de bulbo úmido (K)
v	=	velocidade do ar (m/s)
w	=	massa de água na forma de vapor transferida pela madeira no tempo t (kg)
W	=	umidade absoluta (kg de vapor de água/kg de ar seco)
x	=	eixo considerado (m)
X	=	teor de umidade em base seca (kg/kg)

x	=	teor de umidade em base úmida (kg/kg)
X_{∞}	=	teor de umidade de equilíbrio
X_0	=	teor de umidade inicial
$X_{m\acute{a}x}$	=	máximo teor de umidade
Δc	=	diferença de concentração (kg/m ³)
α	=	difusividade térmica (m ² /s)
δ	=	coeficiente do gradiente de temperatura
ε	=	razão entre a difusividade mássica de vapor e a difusividade mássica total de umidade;
γ	=	constante relacionada ao psicrômetro (K ⁻¹)
η	=	viscosidade cinemática da mistura de ar e vapor de água (m ² /s).
ϕ	=	umidade relativa (Pa/Pa)
μ	=	viscosidade da mistura (kg/(m s))
ρ	=	massa específica (kg/m ³)
ρ_0	=	massa específica inicial (kg/m ³)
ρ_{ar}	=	massa específica mistura de ar e vapor de água (kg/m ³)
$\rho_{b\acute{a}s}$	=	massa específica básica da madeira (kg/m ³)
ρ_{sd}	=	massa específica anidra da madeira (kg/m ³)
ρ_w	=	massa específica da água (kg/m ³)
ρ_c	=	massa específica da parede celular (kg/m ³)

Subscritos

b	=	água higroscópica ou ligada;
l	=	água livre ou capilar;
v	=	vapor de água.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	24
2	OBJETIVOS	27
2.1	OBJETIVO GERAL	27
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
3.1	O AR COMO MEIO SECANTE	30
3.1.1	Pressão de vapor na saturação	30
3.1.2	Pressão atmosférica	30
3.1.3	Umidade relativa	30
3.1.4	Massa específica	31
3.1.5	Umidade absoluta	32
3.1.6	Difusividade mássica do vapor através do ar	32
3.1.7	Viscosidade, calor específico, condutividade e difusividade térmica do ar úmido	33
3.1.8	Número de Reynolds, Schmidt e Prandtl	34
3.1.9	Coefficientes convectivos de transferência e números de Biot de calor e de massa	35
3.2	PROPRIEDADES DA MADEIRA RELACIONADAS À SECAGEM	38
3.2.1	Características anatômicas	38
3.2.2	Massa Específica	41
3.2.3	Massa específica da parede celular e porosidade	42
3.2.4	Teor de umidade	43
3.2.5	Formas da água na madeira	44
3.2.6	Difusividade efetiva	45
3.2.7	Isotermas de sorção	50
3.2.8	Calor específico	53
3.2.9	Condutividade térmica da madeira	54
3.3	PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA DURANTE A SECAGEM	57
3.3.1	Difusão de umidade	58
3.3.2	Difusão térmica e termodifusão	60

3.4	MODELOS MATEMÁTICOS APLICADOS À SECAGEM DE MADEIRA	62
3.5	MÉTODOS NUMÉRICOS PARA SOLUÇÃO DE EQUAÇÕES DIFERENCIAIS.....	66
4	MATERIAIS E MÉTODOS	68
4.1	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	68
4.1.1	Madeiras selecionadas	68
4.1.2	Propriedades físicas	69
4.1.3	Preparação do material e condições de secagem.....	70
4.1.4	Determinação da difusividade mássica efetiva.....	74
4.1.5	Determinação dos coeficientes convectivos de transferência de calor e massa	74
4.1.6	Determinação de isotermas de sorção. ...	75
4.2	METODOLOGIA NUMÉRICA	77
4.2.1	Modelo Matemático.....	77
4.2.2	Discretização das equações de conservação de energia e da espécie química.....	79
4.2.3	Discretização das condições de contorno.	84
4.3	APLICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO NA SIMULAÇÃO DA SECAGEM	87
4.4	EFEITO DE VARIÁVEIS DA MADEIRA QUE INTERFEREM NO TEMPO DE SECAGEM.....	92
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	93
5.1	PROPRIEDADES E CONDIÇÕES INICIAIS DA MADEIRA	93
5.1.1	Massa específica básica.....	93
5.1.2	Teores e concentrações iniciais e máximas de umidade	93
5.1.3	Isotermas e calor de sorção	96
5.1.4	Coefficiente de difusividade efetiva ...	112
5.2	PARÂMETROS DE SECAGEM RELACIONADOS AO AMBIENTE	120
5.2.1	Coefficientes convectivos de transferência de calor e massa	120

6	RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MODELO ...	130
6.1	SIMULAÇÃO DE PROGRAMAS DE SECAGEM ...	130
6.1.1	Simulação de programas de secagem para muirapiranga	130
6.1.2	Simulação de programas de secagem para timborana	138
6.1.3	Simulação de programas de secagem para andiroba	145
6.2	SIMULAÇÃO DO EFEITO DA VARIABILIDADE NAS PROPRIEDADES DA MADEIRA	154
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	158

1 INTRODUÇÃO

Secagem é uma das mais comuns operações unitárias na industrialização de produtos de origem vegetal, como madeira e alimentos. Trata-se de uma fase da industrialização responsável por uma parcela considerável do consumo de energia e tempo.

No Brasil, em 2007, foram produzidos 14,8 milhões de metros cúbicos de produtos de madeira tropical (ABIMCI, 2007). Se considerar que 10% do que foi comercializado no mercado interno e 100% do que foi exportado foi submetido ao processo de secagem artificial, chega-se ao volume de 1,6 milhões de metros cúbicos. Partindo da hipótese de que o teor de umidade inicial e final é, respectivamente, de 0,6 e 0,15 kg de água por kg de sólido seco e que a massa específica básica é de 650 kg/m^3 , pode-se estimar que a secagem desse material significa a retirada de $4,7 \cdot 10^8$ kg de água. Para um rendimento térmico do processo de 40%, isso representa um consumo de energia em torno de $2,6 \cdot 10^{15} \text{ J}$ ou 431.379 barris de petróleo.

Especificamente, no caso da madeira, que é um material higroscópico sujeito à contração, os gradientes de umidade que se desenvolvem durante a secagem geram tensões, que podem resultar em defeitos. Deve haver equilíbrio entre o gradiente necessário para que ocorra a difusão em velocidade aceitável, com o controle da intensidade das tensões de secagem.

A secagem de madeira envolve períodos que variam de dias até meses, o que inviabiliza a experimentação maciça. O ajuste das variáveis do processo como temperatura, velocidade e umidade relativa do ar, intervalo entre reversão do sentido da ventilação, espessura de tabiques, entre outras, seria imenso se fosse realizado para cada espécie, espessura da madeira e uso final.

A dificuldade em obter experimentalmente condições ótimas de processo justifica a necessidade de modelos matemáticos que permitam a simulação e o ajuste de condições antes da aplicação em condições experimentais. Os modelos matemáticos são idealizações da realidade e sua eficácia na representação de qualquer processo depende da coerência entre o modelo e o fenômeno real e da qualidade dos coeficientes utilizados.

A madeira apresenta algumas características que dificultam a modelagem da secagem, entre elas a relação entre as propriedades térmicas e o teor de umidade, entre a difusividade mássica e a temperatura e o teor de umidade, o que gera um acoplamento de variáveis. Outras dificuldades são a anisotropia, a higroscopicidade, a estrutura poro-capilar e a contração que acompanha a dessorção de água higroscópica, além da natural variação encontrada nestas propriedades.

A modelagem e a simulação da secagem de madeira podem auxiliar na definição das condições adequadas de secagem para cada espécie, definidas pelo programa de secagem. Na atualidade as maiores experiências ainda estão concentradas na Europa, Canadá, Nova Zelândia e Austrália, além de serem basicamente relacionadas com coníferas. A carência de pesquisas com espécies brasileiras fica clara após uma revisão de literatura. Os trabalhos desenvolvidos no Brasil restringem-se à experimentação em condições limitadas, seguidas de ajustes de modelos empíricos. A carência de informação é ainda maior quando se refere às madeiras tropicais, apesar da floresta nativa representar 99% da cobertura florestal brasileira (ABIMCI, 2007).

As metodologias atuais para determinação dos programas de secagem para madeiras tropicais não permitem prever o tempo de secagem e os perfis

de temperatura, umidade e tensão ao longo do tempo, dificultando a sua aplicação.

Dessa forma, a abordagem da secagem de madeiras tropicais com base fenomenológica tem como meta o desenvolvimento tecnológico do processo, resultando na elevação do padrão de qualidade dos produtos derivados de madeira.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Modelar e simular o processo de secagem de madeira serrada de espécies tropicais brasileiras, utilizando parâmetros determinados experimentalmente no laboratório.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar experimentalmente parâmetros relacionados à secagem de madeiras tropicais, como as difusividades efetivas, concentrações de equilíbrio, coeficientes convectivos de transferência de calor e de massa.
- Propor um modelo capaz de predizer o perfil de temperatura interna ao longo do processo de secagem da madeira;
- Propor um modelo capaz de predizer o perfil de umidade interna ao longo do processo de secagem da madeira;
- Avaliar a aplicabilidade do método dos volumes finitos na solução de um modelo de transferência de calor e massa durante a secagem de madeira;
- Ampliar o conhecimento sobre as madeiras tropicais brasileiras, especialmente suas propriedades físicas relacionadas à secagem.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A madeira, como material de origem vegetal, prescinde de um processo de remoção da umidade que garanta sua estabilidade, tanto do ponto de vista dimensional como relacionado à deterioração.

O termo madeira engloba materiais obtidos do tronco de árvores de diversas espécies, com propriedades bastante distintas, que requerem a adequação do processo às suas particularidades.

As propriedades da madeira que afetam o processo de secagem são as propriedades térmicas, difusividade mássica e permeabilidade, além das propriedades mecânicas, relacionadas às tensões de secagem. Como derivado de um organismo vivo, o material madeira está sujeito a variações dentro e entre indivíduos da mesma espécie e entre espécies diferentes.

Como no caso da maioria das matérias-primas, o custo da madeira tem crescido a uma taxa superior ao valor de venda dos produtos industrializados, gerando uma forte competição internacional que justifica qualquer esforço no sentido de racionalizar o seu uso e da energia despendida no processo.

Diversos métodos de secagem estão disponíveis comercialmente, tais como a secagem ao ar, secagem solar, pré-secagem com ventilação forçada, secagem convencional (com temperatura entre 40 e 90 °C), secagem à alta temperatura (temperatura acima de 100 °C), secagem à vácuo e secagem por alta frequência (DENIG *et al.*, 2000; JANKOWSKY, 1995; WENGERT; DENIG, 1995; SIMPSON, 1983a; SIMPSON, 1983b). Em alguns casos pode haver conjugação de diferentes métodos na secagem de determinada espécie, por exemplo, secagem ao ar seguida de secagem convencional (SANTOS, 2002) e secagem à vácuo com aquecimento por alta-freqüência (BUCKI; PERRÉ, 2003).

A grande maioria do volume serrado de madeira é submetida aos processos convectivos de secagem, nos quais ar seco e quente transfere calor para a madeira e recebe umidade. Especialmente para a secagem de folhosas, a chamada secagem convencional, com temperaturas entre 40 e 90 °C, é a mais utilizada no mundo (JANKOWSKY, 1995).

A variação de temperatura de bulbo seco e bulbo úmido, em função da umidade da madeira ou do tempo, é chamada de programa de secagem. A natural redução da taxa de secagem é acompanhada pela elevação da temperatura e redução da umidade relativa do ar. Nestes programas de secagem busca-se o equilíbrio entre produtividade do sistema e qualidade da madeira ao final do processo de secagem.

Programas de secagem podem ser definidos em função da massa específica (SIMPSON; VERRILL, 1997) ou são apresentados para cada espécie, na forma de tabelas, como em Mendes *et al.* (1998) e Boone *et al.* (1988). Estas fontes apresentam programas de secagem aplicados experimentalmente ou industrialmente, mas a predição das condições da madeira ao longo do processo não é factível com as informações fornecidas.

Dentre as metodologias para definição de programas de secagem para madeiras desconhecidas, cabe destacar a secagem drástica, utilizada por Andrade (2000) e por Santos (2002).

O embasamento da secagem em fenômenos físicos é recente no Brasil, com destaque para Rozas (2007) e Fernandes (2006), este último limitado à fase de aquecimento. Jankowsky e Luiz (2006), em uma ampla revisão sobre as pesquisas relacionadas à secagem de madeira no Brasil, publicadas entre 1984 e 2004, relatam que os aspectos aplicados como definição dos programas de secagem, avaliação da qualidade e relações entre propriedades elétricas e teor de umidade

são os mais abordados. A carência de pesquisas com madeiras tropicais também fica evidente.

3.1 O AR COMO MEIO SECANTE

A maioria absoluta do volume de madeira submetido à secagem faz uso do ar como meio secante. O estudo das principais propriedades do ar e sua mistura com vapor de água justifica-se pela relação entre estas propriedades, os coeficientes de transferência de calor e massa e os teores de umidade de equilíbrio.

3.1.1 Pressão de vapor na saturação

A capacidade do ar em armazenar umidade na forma de vapor de água está relacionada exponencialmente com a temperatura. Diversas equações foram ajustadas para esta relação, entre elas a equação semi-empírica de Kirchoff (equação 3.1), apresentada por Frandsen (2005).

$$p_s = e^{\left(53,421 - \frac{6516,3}{T} - 4,125 \cdot \ln(T)\right)} \quad (5.1)$$

sendo p_s = pressão de vapor na saturação (Pa);
 T = temperatura (K).

3.1.2 Pressão atmosférica

A pressão atmosférica até uma altitude de 1.524 m pode ser estimada de acordo com a equação 3.2 apresentada por Olander (1994).

$$P_{atm} = 101864,25 \cdot e^{-1,24087 \cdot 10^{-4} \cdot alt} \quad (5.2)$$

sendo P_{atm} = pressão atmosférica (Pa);
 alt = altitude (m).

3.1.3 Umidade relativa

A umidade relativa (ϕ) de uma mistura gás-vapor é a medida da sua saturação parcial e é definida pela relação entre a pressão parcial de vapor (p) e a pressão de vapor na saturação (p_s) na mesma temperatura. Assim ϕ é dada pela equação 3.3.

$$\phi = \frac{p}{p_s} \quad (5.3)$$

A maneira mais prática de determinar a umidade relativa é através de um psicrômetro. Este equipamento consiste em um par de termômetros, sendo que o bulbo de um deles é mantido permanentemente umedecido pelo contato com um tecido conectado a um reservatório de água. A ventilação de ar não-saturado de umidade sobre este tecido resulta em evaporação. A evaporação, por sua vez, consome calor latente, que resulta na redução da temperatura lida pelo termômetro. Aplicando a leitura do termômetro de bulbo seco e a do termômetro de bulbo úmido na equação 3.4, apresentada por Lier *et al.* (2007), obtêm-se a pressão parcial de vapor, que pode ser utilizada na equação da umidade relativa.

$$p = p_s(TBU) - \gamma p_{atm}(T - T_w) \quad (5.4)$$

onde γ = constante relacionada ao psicrômetro (K^{-1});

$p_s(TBU)$ = pressão de vapor na saturação em função da temperatura de bulbo úmido (Pa);

T = temperatura de bulbo seco (K);

T_w = temperatura de bulbo úmido (K).

Resultado similar é obtido a partir da equação empírica 3.5, apresentada por Carrier (1911) apud Siau (1984).

$$p = p_s(TBU) - \frac{(p_{atm} - p_s(TBU))(TBS - TBU)}{1546 - 1,44TBU} \quad (5.5)$$

sendo TBS = temperatura de bulbo seco ($^{\circ}C$)

TBU = temperatura de bulbo úmido ($^{\circ}C$)

3.1.4 Massa específica

A massa específica do ar úmido pode ser obtida assumindo que a mistura de ar seco e vapor de água se comporta como um gás ideal (equação 3.6).

$$\rho_{ar.úmido} = \left(\frac{M_{ar} \cdot (p_{atm} - p) + M_v \cdot (p)}{R \cdot T} \right) \quad (5.6)$$

Sendo $\rho_{\text{ar úmido}}$ = massa específica do ar úmido (kg/m^3);

R = constante dos gases ideais ($\text{kJ}/(\text{kgmol K})$);

M_a = massa molecular do ar (kg/kgmol);

M_v = massa molecular da água (kg/kgmol);

T = temperatura (K).

3.1.5 Umidade absoluta

A umidade absoluta é definida como a relação entre a massa de água na forma de vapor e a massa de ar absolutamente seco. A equação 3.7 considera que tanto o ar como o vapor de água se comportam como gases ideais.

$$W = 0,622 \frac{P}{P_{\text{atm}} - p} \quad (5.7)$$

onde W = umidade absoluta (kg de vapor de água/kg de ar seco).

3.1.6 Difusividade mássica do vapor através do ar

A difusividade mássica do vapor de água através do ar pode ser calculada utilizando uma equação semi-empírica (equação 3.8) proposta por Dushmann (1962) apud Frandsen (2005).

$$D_v = 2,2 \cdot 10^{-5} \left(\frac{P_{\text{atm}}}{p + P_{\text{atm}}} \right) \left(\frac{T}{273,15} \right)^{1,75} \quad (5.8)$$

sendo D_v = difusividade do vapor de água no ar (m^2/s);

P_{atm} = pressão atmosférica (Pa);

p = pressão parcial de vapor (Pa);

T = temperatura (K).

Pode-se aplicar a teoria de Chapman-Enskog para determinar esta propriedade. Utilizando, para o ar, os dados apresentados por Bird *et al.* (2004), de $M_{\text{ar}} = 28,97 \text{ g/gmol}$, $\sigma_{\text{ar}} = 3,617 \text{ \AA}$ e $\epsilon_{\text{ar}}/\kappa = 97,0 \text{ K}$. Já para a água os valores de $M_v = 18 \text{ g/gmol}$, $\sigma_{\text{água}} = 2,649 \text{ \AA}$ e $\epsilon_{\text{água}}/\kappa = 356 \text{ K}$ são obtidos em Welty *et al.* (2001).

Os parâmetros da mistura são estimados pelas equações 3.9 e 3.10.

$$\sigma_{\text{ar-água}} = \frac{1}{2} (\sigma_{\text{ar}} + \sigma_{\text{água}}) \quad (5.9)$$

$$\varepsilon_{\text{ar-água}} / \kappa = \sqrt{\varepsilon_{\text{ar}} / \kappa \cdot \varepsilon_{\text{água}} / \kappa} \quad (5.10)$$

A temperatura adimensional é calculada com a equação 3.11, utilizando-se os resultados das equações 3.9 e 3.10.

$$\frac{T}{(\varepsilon_{\text{ar-água}} / \kappa)} = \kappa T / \varepsilon_{\text{ar-água}} \quad (5.11)$$

A partir da temperatura adimensional, determina-se, pela equação 3.12 apresentada por Bird *et al.* (2004), a integral de colisão para a difusão de massa.

$$\begin{aligned} \Omega_{D,\text{ar-água}} = & \frac{1,06036}{\left(\frac{\kappa T}{\varepsilon_{AB}}\right)^{0,15610}} + \frac{0,19300}{e^{\left(0,47635 * \frac{\kappa T}{\varepsilon_{AB}}\right)}} + \\ & + \frac{1,03587}{e^{\left(1,52996 * \frac{\kappa T}{\varepsilon_{AB}}\right)}} + \frac{1,76474}{e^{\left(3,89411 * \frac{\kappa T}{\varepsilon_{AB}}\right)}} \end{aligned} \quad (5.12)$$

Por fim, a difusividade mássica do vapor de água no ar é determinada pela equação 3.13.

$$D_v = 0,0018583 \sqrt{T^3 \left(\frac{1}{M_{\text{ar}}} + \frac{1}{M_{\text{água}}} \right)} \frac{1}{\frac{P_{\text{atm}}}{101325} \sigma_{AB}^2 \Omega_{D,AB}} \quad (5.13)$$

3.1.7 Viscosidade, calor específico, condutividade e difusividade térmica do ar úmido

Frandsen (2005) apresenta a equação empírica 3.14 para estimar a viscosidade em função da temperatura absoluta.

$$\mu = 1,718 \cdot 10^{-5} + 0,0049 \cdot 10^{-5} \cdot (T - 273,15) \quad (5.14)$$

onde μ = viscosidade da mistura (kg/m s).

Olander (1994) apresenta a equação 3.15 para estimar a viscosidade de uma mistura de ar seco

e vapor de água. Os resultados obtidos são similares aos obtidos com a equação 3.14.

$$\mu = \left[(1 - w) \left(\frac{14,88 \cdot T^{1/2}}{1 + \frac{122,1 \cdot 10^{-5}}{T}} \right) + w \left(\frac{15,01 \cdot T^{1/2}}{1 + \frac{446,8}{T}} \right) \right] \cdot 10^{-7} \quad (5.15)$$

A viscosidade pode ser apresentada como viscosidade cinemática (equação 3.16).

$$\eta = \frac{\mu}{\rho_{\text{ar}} \cdot \text{úmido}} \quad (5.16)$$

sendo η = viscosidade cinemática da mistura de ar e vapor de água (m^2/s).

O calor específico é obtido a partir da soma do calor específico do ar seco com o calor específico do vapor de água, ponderado pela umidade absoluta (equação 3.17).

$$C_{P(\text{ar} \cdot \text{úmido})} = C_{P(\text{ar})} + C_{P(\text{vapor})} \cdot W \quad (5.17)$$

onde c_p = calor específico do ar úmido ($\text{J}/(\text{kg K})$);

$c_{p(\text{ar})}$ = calor específico do ar seco ($1000 \text{ J}/(\text{kg K})$);

$c_{p(\text{vapor})}$ = calor específico do vapor de água ($1851,6 \text{ J}/(\text{kg K})$).

Para estimar a condutividade térmica do ar, Frandsen (2005) apresenta a equação 3.18.

$$k_{\text{ar}} = 1,5207 \cdot 10^{-11} \cdot T^3 - 4,8574 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 + 1,0184 \cdot 10^{-4} \cdot T - 3,9333 \cdot 10^{-4} \quad (5.18)$$

sendo k_{ar} = condutividade térmica do ar ($\text{W}/\text{m K}$)

A difusividade térmica do ar úmido (equação 3.19) expressa a relação entre a energia que é conduzida e a que é armazenada na forma de aquecimento.

$$\alpha = \frac{k_{\text{ar}}}{\rho_{\text{ar}} \cdot \text{úmido} \cdot C_{P(\text{ar} \cdot \text{úmido})}} \quad (5.19)$$

3.1.8 Número de Reynolds, Schmidt e Prandtl

O número de Reynolds relaciona a força inercial do fluido com a força viscosa e permite

determinar se o fluxo pode ser considerado laminar ou turbulento.

Para o escoamento dentro de dutos retangulares, como pode ser considerada a geometria do vão no qual o ar atravessa uma pilha de madeira durante a secagem, o número de Reynolds pode ser determinado pela equação 3.20 (CREMASCO, 2002).

$$Re = \frac{D_H \cdot v \cdot \rho_{\text{ar-úmido}}}{\mu} = \frac{D_H \cdot v}{\eta} \quad (5.20)$$

onde D_H = diâmetro hidráulico (m).

v = velocidade do ar (m/s)

O diâmetro hidráulico é calculado (equação 3.21) considerando a seção transversal retangular do duto no qual o ar passa, formado pelos tabiques nas paredes laterais e pelas peças de madeira nas paredes superior e inferior.

$$D_H = \frac{2 \cdot a \cdot b}{(a + b)} \quad (5.21)$$

sendo a = lado do retângulo, correspondente à espessura do tabique (m);

b = lado do retângulo, correspondente à distância entre tabiques (m);

O número de Schmidt relaciona a viscosidade cinemática do fluido com a difusividade mássica, através da equação 3.22.

$$Sc = \frac{\mu}{\rho_{\text{ar-úmido}} D_v} = \frac{\eta}{D_v} \quad (5.22)$$

O número de Prandtl (equação 3.23) é a razão entre a viscosidade cinemática do fluido e a difusividade térmica.

$$Pr = \frac{\eta}{\alpha} \quad (5.23)$$

3.1.9 Coeficientes convectivos de transferência e números de Biot de calor e de massa

Os principais fatores que afetam os coeficientes de transferência de calor e massa

são as propriedades do fluxo térmico e de massa do ar e a geometria do sistema.

Segundo Keey *et al.* (2000), a evaporação superficial de umidade é determinada pela transferência convectiva de calor entre o ar e as superfícies expostas da madeira, sendo proporcional à diferença entre a temperatura superficial e a do ar e de um coeficiente que varia com a geometria da superfície e com a velocidade do ar. Essa relação é especialmente válida para a fase de secagem com taxa constante que ocorrem em madeiras muito permeáveis. Na secagem de folhosas com elevada massa específica, essa relação pode não corresponder à realidade.

O coeficiente convectivo de transferência de calor pode ser calculado a partir do número de Nusselt (equação 3.24).

$$Nu = \frac{h_h D_h}{k_{ar}} \quad (5.24)$$

onde Nu = número de Nusselt;

h_h = coeficiente convectivo de transferência de calor (W/(m² K)).

Para fluxo turbulento em dutos, quando $Re > 2300$, $Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,33}$. Essa relação foi confirmada experimentalmente para número de Prandtl entre 0,7 e 160 e quando o comprimento do duto for maior que dez vezes o diâmetro hidráulico (INCROPERA *et al.*, 2008).

O coeficiente convectivo de transferência de massa (h_m) pode ser obtido através da equação 3.25, que faz uso do número de Sherwood (Sh), considerando um fluxo de ar interno a um duto com seção transversal retangular (INCROPERA *et al.*, 2008).

$$Sh = \frac{h_m D_h}{D_v} \quad (5.25)$$

onde Sh = número de Sherwood

h_m = coeficiente convectivo de transferência de massa (m/s).

Para fluxo turbulento ($Re > 2300$),
 $Sh = 0,023 Re^{0,8} Sc^{0,33}$.

Cai (2005) determinou o coeficiente de transferência de massa como uma função do coeficiente de transferência de calor, utilizando a analogia de Chilton-Colburn, apresentada na equação 3.26.

$$h_m = \frac{h_h}{\rho_{\text{ar-úmido}} C_{P(\text{ar-úmido})}} \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (5.26)$$

Nabhani *et al.* (2003) compararam os valores dos coeficientes convectivos de transferência de calor e massa, obtidos a partir dos números adimensionais e relações empíricas apresentados nas equações 3.24, 3.25 e 3.26. Os resultados foram coerentes com os experimentais para temperaturas de 30 e 60 °C. Para temperaturas de 90 °C, os valores calculados foram menores que os experimentais, o que os autores atribuem às alterações nas características superficiais da madeira.

Stanish *et al.* (1986) adotaram coeficientes convectivos de transferência de calor com valores de 87, 58 e 29 W/(m² K), para velocidades do ar de 13, 7 e 2 m/s, respectivamente.

Martinović *et al.* (2001) utilizaram valores constantes para os coeficientes convectivos de transferência de calor e modificado de massa, de 40 W/m² K e 1,8*10⁻⁶ kg/(m² s %), para velocidade do ar de 2 m/s. Perré e Degiovanni (1990) utilizaram os valores de 14 W/(m² °C) e 0,014 m/s, em ambiente com temperatura de 50 °C.

Rozas (2007) calculou coeficientes de transferência de calor e de massa a partir de diversas relações empíricas. As equações 3.24 e 3.25 foram as que resultaram em valores mais próximos dos obtidos experimentalmente. Os erros entre os valores experimentais e calculados foram crescentes nas temperaturas de 40, 60 e 80

°C. O coeficiente convectivo de transferência de massa experimental foi menor que o calculado, fato que pode ser explicado pela finalização da fase com taxa de secagem constante, muitas vezes não detectada na secagem de madeira serrada.

A relação entre as resistências interna e externa à transferência de calor é chamada de número de Biot de calor (Bi_h), apresentada na equação 3.27. Para massa a relação entre o coeficiente convectivo e a difusividade mássica é o número de Biot mássico (Bi_m), apresentado na equação 3.28.

$$Bi_h = \frac{h_h L}{k_h} \quad (5.27)$$

$$Bi_m = \frac{h_m L}{D} \quad (5.28)$$

onde L = comprimento na direção do fluxo (m);

k_h = condutividade efetiva (W/(m K));

D = difusividade efetiva (m^2/s).

Quando o $Bi_M \rightarrow \infty$ a transferência externa à convecção é desprezível em relação ao fenômeno difusivo no interior do sólido. Essa abordagem pode ser considerada quando o $Bi_M > 50$. Na situação em que $Bi_M \rightarrow 0$, o processo de transferência de massa é comandado pela resistência externa ao meio onde há o fenômeno difusivo (CREMASCO, 2002)

3.2 PROPRIEDADES DA MADEIRA RELACIONADAS À SECAGEM

3.2.1 Características anatômicas

A madeira é o resultado do crescimento secundário ou em diâmetro do tronco e galhos de espécies vegetais do grupo das coníferas, como pinheiros e ciprestes, e das folhosas como os ipês, canelas, virola e a grande maioria das espécies brasileiras. É um material naturalmente estrutural e condutor de fluidos.

Quando a árvore está viva, existe um sentido predominante de fluxo, que é o longitudinal, mas

observa-se também fluxo de substâncias no sentido casca-medula, no plano radial. Muitas destas substâncias podem vir a formar o cerne, que é uma região do tronco com propriedades distintas, inclusive quanto à secagem.

A estrutura anatômica é que limita o fluxo de água através da madeira e determina ainda sua susceptibilidade à formação de tensões que podem causar defeitos, limitando dessa forma a taxa de secagem (VERMAAS, 1998).

Madeiras de folhosas apresentam estruturas especializadas para condução de líquidos no sentido longitudinal, que são os vasos e elementos celulares especializados na sustentação da árvore, que são as fibras, além de outros elementos como os raios e o parênquima axial. A proporção destes elementos na madeira explica muito do comportamento durante a secagem. A Figura 3.1 apresenta uma representação tridimensional da madeira de uma folhosa.

Marchiori (1992) apresenta uma ampla revisão sobre a influência das características anatômicas da madeira na sua secagem e destaca a importância dos vasos na circulação de fluidos durante a secagem e das fibras no processo de contração e formação de tensões de secagem. O tecido fibroso das folhosas pode ser considerado um tecido altamente densificado de baixa condutividade (KEYY *et al.*, 2000).

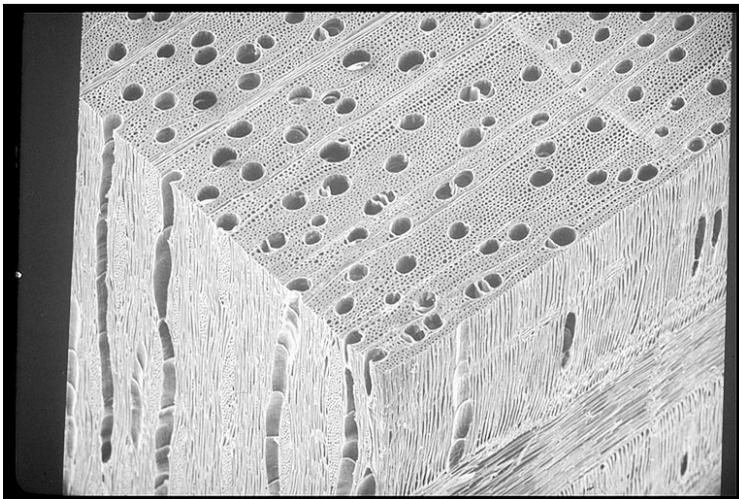


FIGURA 3.1: Representação tridimensional da madeira de folhosa (SOCIETY OF WOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2009).

Segundo Siau (1984), a organização e proporção dos elementos anatômicos influenciam em muito a secagem. Os vasos representam de 20 a 60% do volume de madeira de folhosas e comportam-se como longos tubos abertos, como capilares, caso não haja tiloses.

As fibras por sua vez representam de 20 a 70% do volume da madeira e são menores que os traqueídeos das coníferas, com paredes mais espessas e com menos e menores pontuações, localizadas principalmente no plano radial.

As pontuações entre os elementos anatômicos de folhosas são desprovidas de *torus*. Assim a parede primária cobre a pontuação de maneira uniforme.

Como processo industrial, a secagem deve contornar ou considerar da melhor maneira possível as variações nas propriedades entre peças de madeira. Essas variações são encontradas em peças oriundas de uma mesma árvore, que podem ser retiradas do cerne ou alburno, serradas com a face radial ou

tangencial predominante, formadas por madeira adulta ou juvenil, que contenham lenho de reação, para citar algumas das variáveis relacionadas à anatomia da madeira.

A higroscopicidade e a retratibilidade da madeira podem ser explicadas pelos constituintes químicos que formam as paredes celulares. Marchiori (1992) sugere que o alinhamento das microfibrilas de celulose, predominantemente no sentido longitudinal, e sua característica polar explicam o fenômeno da contração.

A organização dos elementos anatômicos explica a anisotropia observada nos coeficientes de contração.

3.2.2 Massa Específica

A relação entre massa e volume de um material, denominada massa específica, apresenta, no caso da madeira, importância considerável. A massa específica varia entre espécies desde valores em torno de 160 kg/m^3 até acima de 1000 kg/m^3 e dentro de uma mesma espécie o coeficiente de variação médio é de 10% (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999). Em determinadas espécies e sob determinadas condições de crescimento, há variação na massa específica no sentido medula-casca e base-topo de uma mesma árvore. Muñiz (1993) apresenta como estas variações afetam o teor de umidade inicial e as taxas de secagem de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*.

Como a massa e o volume são afetados pelo teor de umidade, é importante considerar em que situação a massa específica é apresentada. Os termos mais comuns são massa específica aparente com 12% de umidade e massa específica básica, que consiste na relação entre massa anidra e volume saturado.

A massa específica apresenta uma relação inversa com a difusividade efetiva (ELEOTÉRIO et al., 2006) e direta com a condutividade térmica

(SULEIMAN *et al.*, 1999). Considerando a massa específica da parede celular constante, as variações de massa específica são relacionadas à variação na espessura da parede celular. Paredes mais espessas resultam em maior resistência à difusão. Por outro lado, o ar presente no lúmen apresenta condutividade térmica menor que a da parede celular; assim madeiras de espécies com parede celular mais espessa terão maior condutividade térmica.

3.2.3 Massa específica da parede celular e porosidade

A massa específica da parede celular tem sido determinada através do deslocamento de vários fluidos. O valor de 1,53 g/cm³ foi obtido pelo deslocamento de água por Stamm e Hansen (1937) apud Siau (1984). Valores diferentes são obtidos com fluidos não-polares, explicados pela dificuldade de ocupar microporos da madeira. A massa específica determinada com água leva em conta o aumento da massa específica da água higroscopicamente ligada à madeira.

A porosidade da madeira pode ser calculada pela equação 3.31 como uma função da massa específica e do teor de umidade da madeira.

$$\varepsilon = 1 - \frac{G}{\rho_c} - \frac{G \cdot 0,01 \cdot X}{\rho_w} \quad (5.29)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{G}{1,5} - \frac{G \cdot 0,01 \cdot X}{1} \quad (5.30)$$

$$\varepsilon = 1 - G(0,667 + 0,01X) \quad (5.31)$$

Sendo X = teor de umidade em base seca (%);

G = massa específica (relação entre a massa anidra e o volume aparente no teor de umidade considerado);

ρ_w = massa específica da água (1 g/cm³).

ρ_c = massa específica da parede celular (1,5 g/cm³ segundo Siau, 1984).

3.2.4 Teor de umidade

A madeira, como um condutor de seiva, está naturalmente saturada de umidade no momento da colheita da árvore. A massa de água pode inclusive ultrapassar a massa seca de madeira.

Na industrialização de madeira sólida, normalmente, utiliza-se o teor de umidade em base seca, expresso pela relação entre a massa de água e a massa anidra de madeira.

Skaar (1972) afirma que existem consideráveis variações no teor de umidade entre tipos de árvores, entre cerne e alborno da mesma árvore, entre toras retiradas de diferentes alturas da mesma árvore e variação anual e entre árvores da mesma espécie.

Segundo Peck (1953) *apud* Skaar (1972), a variação no teor de umidade entre cerne e alborno é mais pronunciada em coníferas, sendo pouco expressiva para folhosas.

O máximo teor de umidade ($X_{\text{máx}}$) pode ser determinado conhecendo a massa específica da parede celular (ρ_c) e a massa específica básica da madeira ($\rho_{\text{bás}}$), esta última representada pela razão entre massa seca e volume saturado.

A umidade máxima pode ser determinada pela equação 3.34.

$$X_{\text{máx}} = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_c}\right) \cdot \left(\frac{\rho_w}{\rho_b}\right) = \left(\frac{\rho_c - \rho_b}{\rho_c}\right) \cdot \left(\frac{\rho_w}{\rho_b}\right) \quad (5.32)$$

$$X_{\text{máx}} = \left(\frac{\rho_c}{\rho_c}\right) \cdot \left(\frac{\rho_w}{\rho_b}\right) - \left(\frac{\rho_b}{\rho_c}\right) \cdot \left(\frac{\rho_w}{\rho_b}\right) \quad (5.33)$$

$$\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_c = 1,5 \text{ g/cm}^3$$

$$X_{\text{máx}} = \left(\frac{1}{\rho_b}\right) - \left(\frac{1}{1,5}\right) \quad (5.34)$$

Existe um pequeno desvio entre os valores reais e os obtidos por esta equação como

resultado da compressão da madeira na faixa de umidade higroscópica.

Geralmente o teor de umidade inicial é menor que o teor de umidade máximo. Simpson e Sagoe (1991) ajustaram uma relação empírica (equação 3.35) entre o teor de umidade máximo e o teor de umidade inicial.

$$X_0 = X_{\text{máx}} \left[1 - e^{(Ap_{\text{bás}} + Bp_{\text{bás}}^2)} \right] \quad (5.35)$$

sendo X_0 = teor de umidade inicial (kg/kg);

A = coeficiente empírico = -4,79;

B = coeficiente empírico = +4,13.

Esta redução é explicada pela água perdida durante o armazenamento das toras, desdobro da madeira e armazenamento das peças serradas antes da secagem.

Uma alternativa é apresentar a umidade na madeira na forma de concentração de umidade em quilogramas por metro cúbico, através da multiplicação do teor de umidade em base seca pela massa específica básica.

3.2.5 Formas da água na madeira

A água livre, capilar ou intersticial está presente na forma líquida nos lumens e espaços vazios na madeira. Dessa forma, a quantidade de água livre que a madeira pode conter é limitada ao espaço vazio ou porosidade. Não havendo pontes de hidrogênio associadas a esta fração aquosa, a água é mantida apenas por forças capilares que são fracas. A remoção da água livre não causa contração nem outras mudanças significativas nas propriedades da madeira.

Água higroscópica ou ligada é aquela que está presente nas camadas das paredes celulares, normalmente ligada por pontes de hidrogênio. Dessa forma sua remoção exige o fornecimento de calor de sorção além do calor latente de vaporização. Como alterações na madeira, decorrentes dessa dessorção, são observados o encolhimento e o aumento da resistência mecânica.

O teor de umidade em que as paredes celulares estão saturadas com água higroscópica e não há água livre, na forma líquida, nos lumens celulares é chamado de ponto de saturação das fibras (PSF). Pode-se assumir que este ponto é alcançado quando há equilíbrio entre a madeira e o ar com 99% de umidade relativa.

Na madeira é utilizado o teor de umidade de 30% como uma aproximação do valor médio do ponto de saturação das fibras.

Água de constituição é a água formada pela destruição de constituintes da madeira, especialmente hemiceluloses, que ocorre com a exposição prolongada à alta temperatura. Em condições normais de secagem, a remoção desta fração de água é desprezível.

3.2.6 Difusividade efetiva

O fator de proporcionalidade que rege o fluxo molecular segundo um gradiente de concentração de umidade, como no caso da secagem, é chamado de difusividade mássica.

Este fator pode ser chamado de difusividade efetiva quando engloba a difusão de água pelas paredes celulares e na forma de vapor através do ar presente nos lumens.

Não há domínio de todos os fatores que determinam a difusividade efetiva em sólidos, resultando na obrigatoriedade de sua determinação experimental (BIRD *et al.*, 2004).

A determinação da difusividade efetiva pode ser realizada de maneira transiente, como o apresentado por Eleotério *et al.* (2006) ou de maneira estacionária como apresentado por Fotsing e Tchagang (2005) e por Perré *et al.* (1996).

Pelos métodos estacionários determina-se a difusividade pela variação de massa que ocorre em tubos de difusão ou vaporímetros, havendo diferença na pressão parcial de vapor entre as faces interna e externa da amostra de madeira.

O inconveniente deste método é a necessidade de uma amostra de pouca espessura para que o regime permanente seja alcançado em um curto espaço de tempo e a dificuldade de impermeabilizar a peça sem alterar a área na qual o fluxo ocorre.

Pelos métodos transientes a difusividade efetiva é determinada conhecendo a massa total ou o gradiente de umidade da amostra ao longo do tempo. Cai (2005) utilizou este último método para estabelecer a difusividade efetiva de *Abies lasiocarpa*, utilizando a equação 3.36.

$$D = \frac{705,88 \cdot E^2 \cdot L^2}{t} \quad (5.36)$$

Sendo D = difusividade efetiva (m^2/s);

L = comprimento na direção do fluxo (m);

t = tempo (s);

E = variação adimensional de concentração.

A mudança adimensional de concentração durante a dessecção é definida pela equação 3.37.

$$E = \frac{\bar{C} - C_e}{C_0 - C_e} \quad (5.37)$$

Onde \bar{C} = concentração média de umidade (kg/m^3);

C_e = concentração de umidade em equilíbrio (kg/m^3);

C_0 = concentração inicial de umidade (kg/m^3).

Dispondo em um gráfico os valores de E^2 versus t , o coeficiente angular (β_0) é $D/(705,88L^2)$, possibilitando a determinação de $D = 705,88L^2 \cdot \beta_0$.

Chen *et al.* (1994) *apud* Theppaya e Prasertsan (2002) utilizaram a equação 3.38, chamada de esquema raiz quadrada, para estimar a difusividade efetiva.

$$D = \frac{\pi \cdot L^2}{4} \left(\frac{d(E)}{d\sqrt{t}} \right)^2 \quad (5.38)$$

Theppaya e Prasertsan (2002) apresentaram ainda um esquema logarítmico (equação 3.39) para determinar a difusividade efetiva.

$$D = \frac{4 \cdot L^2}{\pi^2} \left(\frac{d(\ln E)}{dt} \right) \quad (5.39)$$

Simpson e Liu (1997) determinaram a difusividade efetiva e o coeficiente convectivo de transferência de massa resolvendo a equação da difusão por diferenças finitas e variando a difusividade e o coeficiente convectivo até obter um valor mínimo dos resíduos entre os dados experimentais e os simulados. A difusividade foi considerada variando com a temperatura e com a umidade, quando abaixo do PSF, e o coeficiente convectivo de transferência de massa foi considerado constante durante toda a secagem.

Simpson e Liu (1991) apresentaram um esquema chamado tempo-médio (*half-time technique*) para determinação simultânea da difusividade efetiva (equação 3.40) e do coeficiente convectivo de transferência de massa (equação 3.41), no ponto médio da sorção.

$$D = L^2 \frac{-0,1654}{0,7010 \cdot \frac{dt}{dE} + 2,05 \cdot t} \Big|_{E=0,5} \quad (5.40)$$

$$h_m = \frac{0,7010 \cdot D}{D \cdot t / L - 0,1963 \cdot 1} \Big|_{E=0,5} \quad (5.41)$$

O maior inconveniente destes métodos é assumir que a difusividade não varia com o teor de umidade e, em alguns, que a superfície está permanentemente em equilíbrio com o ambiente.

Liu *et al.* (2001) apresentaram um método inverso de determinação da difusividade efetiva, também utilizado por Cai (2005).

Entre os fatores que afetam a difusividade efetiva estão o teor de umidade da madeira, especialmente na faixa de umidade higroscópica

(SIMPSON; LIU, 1997) e a massa específica. Sehlstedt-Persson (2001) apresentou um gráfico onde fica clara a relação inversa entre massa específica e difusividade efetiva. Não tão clara assim é a relação apresentada pelo mesmo autor entre difusividade efetiva e o teor de extrativos.

A temperatura é um dos fatores mais significativos na alteração da difusividade efetiva. A dependência da difusividade efetiva com a temperatura pode ser descrita como uma equação de Arrhenius (equação 3.42)

$$D = D_0 * e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (5.42)$$

Sendo D_0 = fator de Arrhenius (m^2/s);

E_a = energia de ativação da difusão (kJ/kgmol);

T = temperatura (K);

R = constante dos gases ideais (kJ/(kgmol K)).

Em materiais anisotrópicos, como a madeira, o sentido do fluxo também influencia no valor da difusividade efetiva. Koumoutsakos e Avramidis (2002) determinaram a difusividade para as coníferas *Tsuga heterophylla* e *Thuja plicata* e encontraram diferenças decorrentes dos fatores espécie, plano anatômico, cerne e alburno, umidade e temperatura da madeira.

A Tabela 3.1 apresenta a difusividade efetiva oriunda de algumas fontes bibliográficas, obtidas em diferentes temperaturas, para diferentes espécies, entre outros fatores.

TABELA 3.1: Difusividade efetiva (convertida para unidade do SI), sendo E = estacionário e T = transiente.

Espécie	Método	Temp. (°C)	Plano anatômico	Difusividade Efetiva (m ² /s)	Fonte
<i>Terminalia superba</i>	E	30	Radial	1,30x10 ⁻¹¹	Fotsing e Tchagang (2004)
			Tangencial	1,16x10 ⁻¹¹	
		35	Radial	3,70x10 ⁻¹¹	
			Tangencial	2,65x10 ⁻¹¹	
		40	Radial	5,37x10 ⁻¹¹	
			Tangencial	6,73x10 ⁻¹¹	
<i>Abies lasiocarpa</i> ¹	T	60	Longitudinal ²	8,50x10 ⁻¹⁰	Cai (2005)
			Transversal ²	8,75x10 ⁻¹¹	
			Longitudinal ³	6,69x10 ⁻¹⁰	
			Transversal ³	6,44x10 ⁻¹¹	
<i>Pinus sylvestris</i>	E	60	Tangencial ⁴	3,8x10 ⁻¹⁰	Sehlstedt-Persson (2001)
			Tangencial ⁵	4,9x10 ⁻¹⁰	
			Tangencial ⁴	6,5x10 ⁻¹⁰	
			Tangencial ⁵	6,8x10 ⁻¹⁰	
<i>Hevea brasiliensis</i>	T	61	Transversal ⁶	2,44x10 ⁻¹⁰	Theppaya e Prasertsan (2002)

¹ = média de 5 tábuas com 10 repetições por tábua, ² = condição inicial verde, ³ = condição inicial no Ponto de Saturação das Fibras - PSF, ⁴ = cerne, ⁵ = alborno, ⁶ = Esquema logarítmico, UR = 74,4%.

3.2.7 Isotermas de sorção

A relação entre a umidade de equilíbrio de um material higroscópico e a umidade relativa do ar, em determinada temperatura, é chamada de isoterma de sorção.

Uma isoterma de sorção foi proposta por Hailwood e Horrobin (1946) *apud* Skaar (1972), especificamente para explicar a forma sigmóide das isotermas de vapor de água em polímeros, particularmente polímeros têxteis. Essa isoterma tem sido amplamente aplicada em anos recentes para madeira (SIMPSON, 1980; JANKOWSKY, 1985; ELEOTÉRIO; HASELEIN; GIACOMINI, 1998; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999; LENTH, 1999; BALL; SIMPSON; PANG, 2001; MENDES; ARCE, 2003; VIDAL; CLOUTIER, 2005; PAPADOPOULUS, 2005; BARAÚNA, 2006, entre outros). Nessa abordagem três espécies químicas são consideradas: polímero (madeira anidra no caso), polímero hidratado e água dissolvida. Estas espécies químicas comportam-se como uma solução ideal.

Esta teoria de sorção (equação 3.43) prediz um comportamento parabólico (equação 3.44) para a relação entre ϕ/M e a umidade relativa ϕ . Os coeficientes da parábola são relacionados às constantes da isoterma, como apresentado nas equações 3.45 a 3.47.

$$M = M_h + M_d = \frac{1800}{W} \frac{(K_1 K_2 \phi)}{(1 + K_1 K_2 \phi)} + \frac{1800}{W} \frac{(K_2 \phi)}{(1 - K_2 \phi)} \quad (5.43)$$

$$\frac{\phi}{M} = \frac{W}{1800} \left(\frac{1}{K_2 (K_1 + 1)} \right) + \frac{W}{1800} \left(\frac{K_1 - 1}{K_1 + 1} \right) \phi - \frac{W}{1800} \left(\frac{K_1 K_2}{K_1 + 1} \right) \phi^2 \quad (5.44)$$

onde

$$A = \frac{W}{1800} \left[\frac{1}{K_2(K_1 + 1)} \right] \quad (5.45)$$

$$B = \frac{W}{1800} \left(\frac{K_1 - 1}{K_1 + 1} \right) \quad (5.46)$$

$$C = \left(\frac{W}{1800} \right) \left(\frac{K_1 K_2}{K_1 + 1} \right) \quad (5.47)$$

Outro modelo aplicado à modelagem de isotermas de sorção para madeira é o proposto por Guggenheim-Anderson-deBoer - GAB (equação 3.48), utilizado por Jannot *et al.* (2006).

Da mesma forma que o modelo proposto por Hailwood e Horrobin, o modelo GAB pode ser ajustado através de um polinômio do segundo grau (equação 3.49). Os coeficientes da parábola são relacionados às constantes da isoterma, como apresentado nas equações 3.50 a 3.52.

$$M = \frac{X_m C_g K \phi}{(1 - K\phi)(1 - K\phi + C_g K \phi)} \quad (5.48)$$

$$\frac{\phi}{M} = \frac{1}{C_g \cdot K \cdot X_m} + \frac{(C_g - 2)}{C_g \cdot X_m} \phi + \frac{K \cdot (1 - C_g)}{C_g \cdot X_m} \phi^2 \quad (5.49)$$

sendo:

$$a = \frac{K(1 - C_g)}{C_g \cdot X_m} \quad (5.50)$$

$$b = \frac{(C_g - 2)}{C_g \cdot X_m} \quad (5.51)$$

$$c = \frac{1}{C_g \cdot K \cdot X_m} \quad (5.52)$$

Um dos aspectos que afetam a umidade de equilíbrio é o histórico de secagem a qual a peça foi submetida. A umidade de equilíbrio na primeira dessorção é maior que na adsorção, resultado da perda de parte da higroscopicidade em função da ligação entre hidroxilas dos

constituintes da madeira em detrimento à ligação com a água.

Outro aspecto é histerese, que resulta na adsorção correspondente a, cerca de, 80% do valor obtido na dessorção (WANGAARD; GRANADOS, 1967; CHEN; WANGAARD, 1968).

Segundo Keey *et al.* (2000), a pequena variação entre as espécies no teor de carboidratos justifica afirmar que não há consideráveis variações entre espécies nas isotermas de sorção, já que estes componentes da madeira são os principais responsáveis pela adsorção de água. Isso pode ser verdadeiro para espécies temperadas, mas para espécies tropicais a composição química, especialmente, o teor e o tipo de extrativos, têm papel fundamental na definição da umidade de equilíbrio.

Wangaard e Granados (1967) comprovaram o efeito dos extrativos na redução da umidade de equilíbrio de espécies tropicais, especialmente com umidade relativa do ar acima de 60%. Jankowsky e Galvão (1979) também observaram a redução na higroscopicidade com o aumento do teor de extrativos em *Eucalyptus citriodora*, *Araucaria angustifolia* e *Swietenia macrophylla*. Estes autores também observaram que este efeito é mais pronunciado em altas umidades relativas.

Baraúna (2006) determinou em ambiente externo a umidade de equilíbrio da madeira de três espécies tropicais: *Dinizia excelsa*, *Clarisia racemosa* e *Cariniana micrantha*. Obteve valores inferiores aos estimados utilizando o modelo de um hidrato de Hailwood e Horrobin apresentado por Simpson (1971).

As particularidades de cada espécie madeireira e a importância desse parâmetro no estabelecimento da força motriz da secagem justificam a determinação experimental de isotermas de sorção específicas.

3.2.8 Calor específico

Calor específico é a quantidade de energia necessária para elevar a temperatura de uma unidade de massa de uma substância em um grau de temperatura.

Dunlap (1912) citado por Kollmann e Coté (1968) apresenta a equação 3.53 para estimar o calor específico da madeira anidra em função da temperatura na faixa de 0 a 106 °C.

$$c_{p0} = 0,266 + 0,00116 * (T - 273,15) \quad (5.53)$$

sendo T = temperatura (K);

c_{p0} = calor específico da madeira anidra (cal/(g °C)).

Durante o processo de aquecimento é necessário determinar o calor específico médio na faixa em que se deseja trabalhar (equação 3.54).

$$c_{p0} = \frac{1}{\Delta T} \int_{T_1}^{T_2} (0,266 + 0,00116 * (T - 273,15)) dT \quad (5.54)$$

O calor específico médio varia significativamente com o teor de umidade. Admitindo-se simplesmente um efeito aditivo do calor específico da madeira seca e da água, pode-se determinar o calor específico para madeira úmida de acordo com a equação 3.55.

$$c_{pU} = x \cdot c_{pW} + (1 - x) \cdot c_{p0} \quad (5.55)$$

sendo x = teor de umidade em base úmida;

c_{pU} = calor específico da madeira úmida (cal/(g °C));

c_{pW} = calor específico da água.

Como o teor de umidade em base seca é mais usual, a equação 3.55 pode ser substituída pela equação 3.56.

$$c_{pU} = \frac{X}{100 + X} \cdot c_{pW} + \left(100 - \frac{X}{100 + X}\right) \cdot c_{p0} \quad (5.56a)$$

$$c_{pU} = \frac{X}{100 + X} \cdot c_{pW} + \frac{100 + X}{100 + X} \cdot c_{p0} - \frac{X}{100 + X} \cdot c_{p0} \quad (5.56b)$$

$$c_{PU} = \frac{X \cdot c_{PW} + 100 \cdot c_{P0}}{100 + X} \quad (5.56c)$$

onde X = teor de umidade em base seca (%);

Forest Products Laboratory (1999) apresenta outras correlações empíricas para estimar o calor específico da madeira na faixa de 7°C a 147°C (equação 3.57).

$$c_{P0} = 0,1031 + 0,003867 * T \quad (5.57)$$

onde T = temperatura (K);

c_{P0} = calor específico da madeira anidra (kJ/(kg K)).

Forest Products Laboratory (1999) indica o uso de um fator de ajuste, que considera a energia da ligação água-madeira, quando se deseja estimar o calor específico da madeira com umidade abaixo do Ponto de Saturação das Fibras (PSF). Dessa forma o calor específico da madeira com U% de umidade pode ser definido pela equação 3.58.

$$c_{PU} = \frac{(c_{P0} + 0,01 * X * c_{PW})}{1 + 0,01 * X} + A_c \quad (5.58)$$

sendo X = teor de umidade em base seca(%);

A_c = fator de ajuste.

O fator de ajuste (A_c) pode ser estimado em função da umidade e da temperatura de acordo com a equação 3.59.

$$A_c = X * (b_1 + b_2 * T + b_3 * X) \quad (5.59)$$

sendo b_1 , b_2 e b_3 = coeficientes de ajuste.

Para temperatura em Kelvin, $b_1 = -0,06191$, $b_2 = 2,36 * 10^{-4}$ e $b_3 = -1,33 * 10^{-4}$.

3.2.9 Condutividade térmica da madeira

A condutividade térmica é a medida do inverso da resistência ao fluxo de energia térmica através de uma unidade de espessura do material, sob um gradiente de temperatura, ao longo de uma fração de tempo.

As condutividades térmicas de sólidos têm que ser medidas experimentalmente, já que dependem de muitos fatores que são difíceis de

medir ou de prever. Em sólidos porosos, a condutividade térmica é fortemente dependente da porosidade, do tamanho do poro e do fluido retido nos poros. Sólidos porosos secos são fracos condutores de calor e são, portanto, excelentes para o isolamento térmico (BIRD et al., 2004).

Uma descrição completa do processo de transporte de calor através de materiais porosos é extremamente complicada. Entretanto, para condução de calor em regime permanente, esses materiais podem ser tomados como homogêneos com uma condutividade térmica efetiva (k_h). A temperatura e componentes do fluxo térmico são reinterpretados como as quantidades médias sobre o volume que é grande em relação à escala de heterogeneidade, mas pequeno em relação às dimensões do sistema condutor de calor (BIRD et al., 2004).

Segundo Kollmann e Cotê (1968), a madeira e outros materiais lignocelulósicos são isolantes térmicos devido à falta de elétrons livres, que são os responsáveis por facilitar a transferência de calor, e devido à sua porosidade.

Algumas das variáveis que alteram a condutividade térmica são a direção na qual há o fluxo de energia em relação ao sentido das fibras da madeira, massa específica, tipo e teor de extrativos, defeitos e especialmente o teor de umidade.

Rice e Shepard (2004) determinaram experimentalmente a condutividade térmica para *Pinus strobus* e *Pinus resinosa* e encontraram uma relação positiva entre a condutividade térmica e a massa específica e o teor de umidade.

Forest Products Laboratory (1999) apresenta a equação empírica 3.60 para estimar a condutividade efetiva da madeira quando a massa

específica for maior que $0,3 \text{ g/cm}^3$ e o teor de umidade for menor que 25%.

$$k_{hT} = G (B + C * X) + A \quad (5.60)$$

Onde k_{hT} = condutividade efetiva perpendicular às fibras (W/(m K));

A, B e C = constantes da equação;

Para condutividade em W/(m K), $A = 0,01864$, $B = 0,1941$ e $C = 0,004064$;

MacLean (1941) *apud* Siau (1984) propôs as equações 3.61 e 3.62 para estimar a condutividade efetiva, sendo a primeira para teor de umidade abaixo de 40% e a segunda para umidade maior que 40%.

$$k_{hT} = [0,57 + G(4,80 + 0,090 * X)] \cdot 10^{-4} \quad (5.61)$$

$$k_{hT} = [0,57 + G(4,80 + 0,125 * X)] \cdot 10^{-4} \quad (5.62)$$

Sendo k_{hT} = condutividade efetiva perpendicular às fibras (cal/(cm s °C)).

Na direção paralela às fibras, a condutividade efetiva é de 2,25 a 2,75 vezes maior que na direção perpendicular, podendo ser utilizado o valor médio. Dessa forma a condutividade no sentido paralelo às fibras pode ser determinada a partir da condutividade no sentido perpendicular (equação 3.63).

$$k_{hL} = 2,5 * k_{hT} \quad (5.63)$$

onde k_{hL} = condutividade efetiva paralela às fibras (cal/(cm s °C)).

Perre e Degiovanni (1990) adotaram a condutividade efetiva perpendicular às fibras dependente da temperatura e da umidade através das equações 3.64 e 3.65 para madeira com teor de umidade acima e abaixo de 40%, respectivamente.

$$k_{hT} = \left(\frac{0,65}{100 \cdot X} + 0,0932 \right) (3,55 + 3,65 \cdot T) (0,986 + 2,695 \cdot X) \cdot 10^{-3} \quad (5.64)$$

$$k_{hT} = (0,129 - 0,049 \cdot X) (1000 + (2,05 + 4 \cdot X)(T - 273)) * (0,986 + 2,695 \cdot X) \cdot 10^{-3} \quad (5.65)$$

onde k_{hT} = condutividade efetiva perpendicular às fibras (W/(m K));

X = teor de umidade em base seca(kg/kg);

T = temperatura (K)

3.3 PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA DURANTE A SECAGEM

Dois são os principais processos de transferência que ocorrem durante a secagem de madeira:

- Transferência de energia do ambiente circundante para evaporar a umidade superficial;
- Transferência de umidade interna para a superfície do sólido e sua subsequente evaporação pelo processo anterior.

A taxa de secagem é governada pela proporção em que estes dois processos ocorrem.

O primeiro processo, remoção da água na forma de vapor da superfície do material, depende de condições externas como temperatura, fluxo, turbulência e umidade do ar, área de exposição superficial e pressão.

Excessiva evaporação superficial após a remoção da umidade na forma de água livre resulta em altos gradientes do interior à superfície. Assim é possível causar sobressecação e excessiva contração e, conseqüentemente, alta tensão dentro do material, resultando em rachaduras e/ou empenamentos.

Em materiais mais frágeis e impermeáveis, deve-se controlar a evaporação superficial pelo emprego de alta umidade relativa.

No segundo processo, o movimento de umidade no interior do sólido, é uma função das propriedades de transporte do material, da natureza geométrica do sólido, da temperatura e do seu teor de umidade.

A importância de cada processo de transferência é determinada pelo número de Biot de calor e de massa.

Segundo Simpson (1983a, 1983b), a secagem de madeira inclui três mecanismos de movimento da umidade que ocorrem em várias combinações e proporções, dependendo da espécie, espessura e estágio da secagem. Estes mecanismos são: fluxo mássico de água através da estrutura capilar das células, que ocorre acima do ponto de saturação das fibras; abaixo do ponto de saturação das fibras, ocorre difusão de água através das paredes e das cavidades celulares; e o último mecanismo é a evaporação de água da superfície para o ambiente externo.

O transporte de fluido pela madeira pode ocorrer de duas principais formas: a primeira, como fluxo convectivo através de espaços interconectados da estrutura da madeira e sobre a influência de um gradiente de pressão estática ou capilar; a segunda maneira é através da difusão, que pode ser ainda dividida em difusão do vapor de água através do lúmen celular (difusão intergasosa) e difusão de água higroscópica, através da parede celular (SIAU, 1984).

3.3.1 Difusão de umidade

A difusão é o processo de transferência de massa adequado quando a difusividade efetiva representa o comportamento da secagem, como no caso de folhosas impermeáveis, e quando se deseja um modelo simplificado.

Difusão é o fluxo molecular de massa sob a influência de um gradiente de concentração, de tal forma que uma diferença na pressão estática não é necessária. A primeira Lei de Fick representa a relação entre o fluxo e o gradiente em condições estacionárias. Quando aplicada ao transporte de vapor de água pela madeira, pode ser escrita pela equação 3.66.

$$D = \frac{w/tA}{\Delta c/L} \quad (5.66)$$

Onde D = difusividade efetiva (m^2/s);

w = massa de água na forma de vapor transferida pela madeira no tempo t (kg);

A = área transversal ao fluxo de vapor de água (m^2);

L = comprimento na direção do fluxo (m);

t = tempo (s);

Δc = diferença de concentração (kg/m^3).

Por conveniência, a diferença de concentração pode ser expressa em termos de gradiente de umidade pela equação 3.67.

$$\Delta c = \frac{\Delta M \cdot G \cdot \rho_w}{100} \quad (5.67)$$

Sendo ρ_w = massa específica da água.

Substituindo-se a equação (3.67) na equação (3.66), obtém-se

$$D = \frac{100 \cdot w \cdot L}{t \cdot A \cdot \Delta M \cdot \rho_w \cdot G} \quad (5.68)$$

Como processo transiente, a secagem de madeira ordinariamente é caracterizada pela segunda Lei de Fick, que, na forma tridimensional e tendo a concentração de umidade como força motriz, é apresentada na equação 3.69 (KEYEY *et al.*, 2004).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \bar{\nabla} \cdot D \bar{\nabla} C \quad (5.69)$$

Onde C = concentração de umidade (kg/m^3);

Dependendo do método de secagem, a difusão pode ter uma contribuição diferenciada. Alguns métodos como a secagem a vácuo, secagem por alta frequência e secagem à alta temperatura, reconhecidamente recebem a contribuição de outros fenômenos de transporte além da difusão.

Em condições moderadas de secagem e em madeiras duras, de alta massa específica, a difusão contribui com parcela significativa do fluxo interno de umidade.

Uma das vantagens de considerar a secagem de madeira um processo difusivo é a disponibilidade de soluções analíticas para

modelos puramente difusionais. Um exemplo é a equação 3.70, apresentada por Crank (1979), equação esta usualmente utilizada para a determinação da difusividade efetiva. Para a obtenção desta equação algumas hipóteses são admitidas, como difusividade efetiva constante, concentração inicial uniforme ao longo da dimensão considerada e equilíbrio imediato da concentração na superfície com o ambiente.

$$E = \frac{C_0 - \bar{C}}{C_0 - C_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} e^{-\frac{(2n-1)^2}{(2L)^2} D\pi^2 t} \quad (5.70)$$

sendo E = variação adimensional de concentração;

C_0 = concentração inicial de umidade (kg/m^3).

\bar{C} = concentração média de umidade no tempo t (kg/m^3)

C_e = concentração de umidade em equilíbrio (kg/m^3);

L = metade da espessura na direção da difusão de umidade (m);

3.3.2 Difusão térmica e termodifusão

O gradiente de temperatura contribui com o fluxo de umidade através do efeito Soret e o gradiente de concentração contribui na transferência de calor através do efeito Dufour (TIME, 1998).

O fluxo do soluto A para a situação em que há transporte de calor em nível molecular é, portanto, causado pelo gradiente de concentração do soluto A, assim como pelo gradiente de temperatura da mistura, sendo este fruto do gradiente de concentração de A. O fluxo deste soluto decorrente do gradiente de temperatura, nesta circunstância, é conhecido como efeito Soret e o fluxo do soluto A, $K_{12} \vec{\nabla} T$, é denominado *difusão térmica*. (CREMASCO, 2002, p.579).

A determinação do coeficiente relacionado ao efeito Soret exige um delicado aparato experimental e foi demonstrada em condições estacionárias, como apresentado por Xian-jun *et al.* (2006). Estes mesmos autores obtiveram coeficientes abaixo de $0,009 \text{ kg}_{\text{água}}/(\text{kg K})$ para *Pinus massoniana*. Martinović *et al.* (2001), Horman *et al.* (2009) e Younsi *et al.* (2006) utilizaram o valor de $0,02 \text{ kg}_{\text{água}}/(\text{kg K})$ e Kocafe *et al.* (2006), o valor de $0,025 \text{ kg}_{\text{água}}/(\text{kg K})$.

Na situação em que o fluxo de energia é devido ao gradiente de temperatura da mistura, assim como ao de concentração da espécie A, em que este é uma consequência daquele, reconhece-se o efeito Dufour, que estabelece a dependência do gradiente de concentração do soluto ao de temperatura da mistura. Desse efeito, aparece uma parcela do fluxo de calor em virtude do gradiente de concentração da espécie A denominada termodifusão (CREMASCO, 2002, p. 579).

Xian-jun *et al.* (2005) relatam que estudos demonstram que a termodifusão ocorre quando o gradiente de temperatura é mantido durante períodos superiores a cinco semanas, como em elementos estruturais e paredes de construções. Bramhall (1979) *apud* Xian-jun *et al.* (2005) afirma que, em condições normais de secagem, esse efeito é tão pequeno que pode ser desconsiderado. Segundo Kang *et al.* (2008), há pouca evidência do efeito Dufour pela dificuldade de medi-lo e que o efeito da termodifusão na taxa de transferência de calor pode não ser significativo porque a difusão de calor é mais rápida que a difusão de umidade.

3.4 MODELOS MATEMÁTICOS APLICADOS À SECAGEM DE MADEIRA

Diversos aspectos podem ser abordados na modelagem da secagem de madeira serrada, entre eles o teor de umidade, a temperatura, a pressão parcial de vapor, as tensões resultantes da contração, alterações de cor e aspectos especiais como o colapso da parede celular. Segundo Perré (2002), não há um modelo capaz de prever todas estas propriedades em condições variadas de secagem e que em poucos casos houve uma real melhoria dos programas de secagem pela aplicação da modelagem e simulação, faltando considerar diversos aspectos do comportamento mecânico da madeira para que este objetivo seja alcançado.

Entre os poucos trabalhos com resultados aplicados na melhoria dos programas do processo de secagem, pode-se exemplificar o de Salin (2001) que usou um modelo que permitia prever as tensões de secagem para otimizar a duração e as condições da fase de condicionamento. Pang (2002) utilizou também um modelo para simular a secagem de peças tangenciais e radiais usando três métodos de secagem. Pang (2004), utilizando um modelo matemático, definiu o intervalo entre reversões do sentido da ventilação, minimizando a variação no teor de umidade entre as peças e o consumo de energia elétrica. Mas as aplicações de maior impacto tecnológico são as relacionadas à definição dos programas de secagem, como a apresentada por Carlsoon e Tinnsten (2002), que partiram de um programa inicial e de restrições relacionadas à tensão máxima e chegaram a um programa que maximiza a velocidade da secagem sem ultrapassar as restrições relacionadas à resistência da madeira.

As variáveis consideradas nos modelos variam de autor para autor, sendo basicamente apresentados modelos para prever a umidade, a

temperatura e, mais recentemente, as tensões de secagem. Em quase todos os modelos a difusão está presente como um fenômeno predominante da secagem, nem sempre o único. Keey *et al.* (2000) consideraram a abordagem da secagem de madeira através da difusão como adequada para prever os gradientes de umidade e o teor de umidade médio para folhosas.

Rozas (2007) comparou modelos difusivos com modelos de transporte nos quais são considerados diversos fenômenos de transferência de massa como a capilaridade e o efeito Soret. Para os casos de baixa taxa de secagem e alta difusividade térmica, encontrados na secagem de muitas madeiras tropicais, nos quais o gradiente de umidade é maior que o gradiente de temperatura, são recomendados modelos difusivos.

O ideal seria obter um modelo versátil, capaz de prever o comportamento da madeira em diversos aspectos além da umidade; porém um modelo com estas características exige a determinação de muitos parâmetros associados e torna a sua solução mais difícil. Dessa forma, os modelos matemáticos apresentados na literatura são ajustados para situações específicas, ponderando os principais fenômenos de transporte envolvidos.

Outra característica que diferencia os modelos são as forças motrizes. Para a difusão, as principais forças motrizes são a concentração de umidade, o teor de umidade, o potencial químico e a pressão parcial de vapor (KEEY *et al.*, 2000).

Martinović *et al.* (2001) utilizaram os modelos apresentados nas equações 3.71 e 3.72 para determinar os perfis transientes de temperatura e umidade, respectivamente.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) = - \frac{\partial q}{\partial x} + \rho s_q \quad (5.71)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_m X) = - \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} + \rho s_m \quad (5.72)$$

onde t = tempo (s);

ρ = massa específica (kg/m³);

c_p = calor específico (J/(kg K));

c_m = umidade específica (kg/%);

q = fluxo de calor (W/m²);

x = eixo considerado;

s_q = termo fonte de energia;

s_m = termo fonte de massa;

T = temperatura (K);

X = teor de umidade em base seca (%);

\dot{m} = fluxo de massa (kg/(m² s)).

Os fluxos de massa, incluindo o efeito Soret, e de energia são apresentados nas equações 3.73 e 3.74.

$$\dot{m} = -D \frac{\partial M}{\partial x} - \delta D \frac{\partial T}{\partial x} \quad (5.73)$$

$$q = -k_h \frac{\partial T}{\partial x} + \varepsilon r \dot{m} = -(k_h + \varepsilon r \delta D) \frac{\partial T}{\partial x} - \varepsilon r D \frac{\partial M}{\partial x} \quad (5.74)$$

sendo k_h = condutividade efetiva (W/(m K));

D = difusividade efetiva (m²/s);

ε = razão entre a difusividade mássica de vapor e a difusividade mássica total de umidade;

r = calor latente de vaporização;

δ = coeficiente do gradiente de temperatura (%/K).

Stanish et al. (1986) adotaram o potencial químico como força motriz e apresentaram cinco equações governantes: dois balanços de massa, sendo um para o ar (equação 3.75) e outro para a água (equação 3.76); um balanço de energia (equação 3.77) e duas equações de equilíbrio, sendo uma para descrever a relação de saturação entre vapor e líquido e a outra para descrever as relações de sorção de água.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{ar}) = \frac{\partial}{\partial x} (\dot{m}_{ar}) \quad (5.75)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_v + \rho_b + \rho_f) = \frac{\partial}{\partial x} (\dot{m}_v + \dot{m}_b + \dot{m}_f) \quad (5.76)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho_{ar}h_{ar} + \rho_vh_v + \rho_bh_b + \rho_fh_f) = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\dot{m}_{ar}h_{ar} + \dot{m}_vh_v + \dot{m}_bh_b + \dot{m}_fh_f - k_h \frac{\partial T}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (5.77)$$

onde \dot{m} = fluxo de massa (kg/(m² s));

h = entalpia (J/kg);

ρ = massa específica (kg/m³)

k_h = condutividade efetiva (W/(m K)).

subscritos:

ar = ar;

v = vapor;

b = água higroscópica ou ligada;

f = água livre.

Dedic *et al.* (2003) e Dedic *et al.* (2004) modelaram os fenômenos de transferência de calor e de massa, utilizando as equações 3.78 e 3.79, respectivamente.

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial x} = k_h \bar{\nabla} \cdot \bar{\nabla} T + \varepsilon r \frac{\partial X}{\partial x} \quad (5.78)$$

$$\frac{\partial X}{\partial x} = D \bar{\nabla} \cdot \bar{\nabla} X + D \delta \bar{\nabla} \cdot \bar{\nabla} T \quad (5.79)$$

sendo c_p = calor específico (J/(kg K));

T = temperatura (K);

X = teor de umidade (kg/kg);

ρ = massa específica (kg/m³);

k_h = condutividade térmica efetiva (W/(m K));

ε = razão entre a difusividade mássica de vapor e a difusividade mássica total de umidade;

r = calor latente de vaporização (J/kg);

D = difusividade efetiva (m²/s);

δ = coeficiente relativo à difusão térmica (%/K);

Para modelar a secagem de *Pinus massoniana* em condições de alta temperatura, Ping e Lianbai (2003) utilizaram um modelo que considera o gradiente de pressão parcial de vapor e as forças capilares, do ponto de saturação das fibras (equação 3.80) e um modelo difusional para condições abaixo deste ponto (equação 3.81).

$$\rho_s \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (j_v + j_l) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\frac{10GK_v \rho_v RT}{\mu_v} + \frac{K_l \rho_l}{\mu_l}}{AB(M_{\max} - M_{fsp})^B} \right) \frac{\partial M}{\partial x} \quad (5.80)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial M}{\partial x} \right) \quad (5.81)$$

onde D = difusividade efetiva (m²/s);

t = tempo (s);

ρ = massa específica (kg/m³);

μ = viscosidade;

K = permeabilidade;

T = temperatura;

R = constante dos gases ideais (kJ/(kgmol K));

Subscritos

l = água livre;

v = vapor de água.

3.5 MÉTODOS NUMÉRICOS PARA SOLUÇÃO DE EQUAÇÕES DIFERENCIAIS

Maliska (2004) relaciona como métodos tradicionais para a solução numérica de equações diferenciais os Métodos de Diferenças Finitas, de Volumes Finitos e Elementos Finitos. Ainda diferencia o Método de Diferenças Finitas do Método de Volumes Finitos afirmando que o primeiro é apenas a substituição do operador diferencial pelo seu correspondente numérico, enquanto o segundo realiza um balanço de conservação da

propriedade para cada volume elementar para obter a correspondente equação aproximada.

O Método de Volumes Finitos é o mais utilizado na atualidade para solução de modelos matemáticos relacionados à secagem de madeira, sendo aplicado para a estimativa do teor de umidade, temperatura, tensão e pressão interna do sólido.

A aplicação do Método dos Volumes Finitos na solução do modelo apresentado por Martinović *et al.* (2001) é apresentada no capítulo Materiais e Métodos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada neste trabalho está dividida em três unidades: uma experimental, relativa à determinação de coeficientes necessários ao modelo, como isoterma de sorção, difusividade efetiva, difusividade térmica e coeficientes convectivos de transferência de calor e massa; a segunda, relativa à discretização do modelo matemático com suas condições de contorno, utilizando o Método dos Volumes Finitos; e a terceira, referente aos programas de secagem simulados com a aplicação do modelo matemático.

4.1 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4.1.1 Madeiras selecionadas

A modelagem e simulação da secagem convencional serão aplicadas em três espécies de madeira de folhosas tropicais. As espécies são timborana (*Enterolobium schomburgkii*), muirapiranga (*Brosimum rubescens* e *B. paraensis*) e andiroba (*Carapa guianensis*).

As espécies foram escolhidas devido à qualidade da madeira, ao potencial para o setor florestal e madeireiro e ao desconhecimento das condições ideais de secagem.

Andiroba (*Carapa guianensis* Aubl.) é uma madeira com cerne marrom-escuro ou marrom-avermelhado, grã direita tendendo a reversa, textura média, brilho moderado e cheiro imperceptível. É considerada sucedânea do mogno (*Swietenia macrophylla*) e do cedro (*Cedrela* spp.) (SOUZA *et al.*, 1997). Entre os principais defeitos da secagem são relatados rachaduras, encanoamento e torcimento.

Muirapiranga é o nome comum de duas espécies botânicas, *Brosimum rubescens* Taub. e *Brosimum paraensis* Huber. A madeira apresenta cerne vermelho-escuro-vivo, figura em faixas mais escuras e possui anéis de crescimento

pouco distintos, grã direita ou reversa, textura média a fina e brilho moderado (SOUZA *et al.*, 1997). A secagem é referenciada como lenta (16 a 20 dias), apresentando tendência a rachaduras de topo, encanoamento e torcimento.

Timborana ou fava-orelha-de-negro (*Enterolobium schomburgkii* Benth) apresenta cerne marrom-pálido a marrom-amarelo-claro e possui anéis de crescimento distintos, grã reversa ou ondulada, textura média a grossa, brilho moderado (SOUZA *et al.*, 1997). Apresenta tendência moderada a rachaduras e a torcimentos fortes.

A espessura média da madeira de andiroba, timborana e muirapiranga foi de 30,1 mm, 28,6 mm e 25,2 mm, respectivamente. Comprimentos em torno de 950 mm foram obtidos para todas as peças e larguras de 84 mm para andiroba e 95 mm para muirapiranga e timborana. As medidas reais de cada peça foram tomadas antes da secagem utilizadas para o cálculo das propriedades físicas.

4.1.2 Propriedades físicas

A massa específica básica, definida pela razão entre a massa anidra e o volume saturado, foi determinada para todas as peças submetidas à secagem. O volume foi determinado antes da secagem, pelo método estereométrico e a massa seca foi determinada a partir de uma amostra da peça, obtida no momento de sua retirada do processo. Desta amostra foi determinado o teor de umidade que permitiu determinar a massa seca da peça.

O teor de umidade ao longo da secagem foi determinado através de pesagens diárias das peças selecionadas para a avaliação experimental. A massa seca utilizada para cálculo da massa específica básica foi utilizada para o cálculo do teor de umidade ao longo do processo.

O gradiente de umidade inicial das peças das duas primeiras repetições foi determinado pelo método gravimétrico. A amostra foi retirada a, pelo menos, 5 cm do topo das peças (Figura 4.1). A porção central desta peça foi laminada e o teor de umidade foi determinado para cada uma das lâminas, revelando o gradiente de umidade ao longo da espessura.

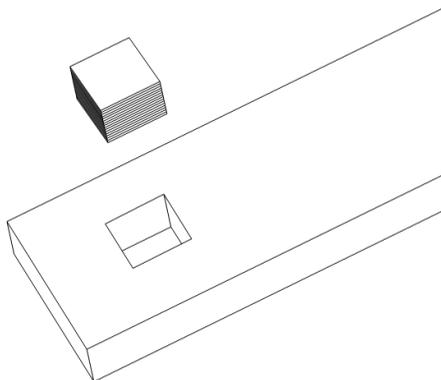


FIGURA 4.1: Localização das amostras para determinação do gradiente inicial de umidade.

Com a informação da massa específica básica e o teor de umidade inicial foram calculados, através das equações 3.56c, 3.61 e 3.62, o calor específico e a condutividade térmica.

4.1.3 Preparação do material e condições de secagem

Apesar do fluxo de massa preferencial ser no sentido da espessura das peças, sempre ocorre fluxo através das faces laterais e nos topos. Para minimizar este efeito, as peças selecionadas foram isoladas através da aplicação de duas camadas de adesivo de contato e uma camada de papel alumínio.

Após este procedimento, as peças foram dispostas na posição central de uma pilha que preenchia toda a altura e largura interna de um secador em escala piloto. Cada camada era

constituída de oito peças, sendo as selecionadas dispostas nas quatro posições centrais. As duas peças da entrada e da saída do ar minimizavam o efeito da borda. Os tabiques, separadores das camadas, tinham 25 mm de espessura.

A Figura 4.2 apresenta, através da janela de inspeção, a disposição das peças nas camadas. Foi utilizada uma média de 10 peças por espécie e por repetição.



FIGURA 4.2: Visão através da janela de inspeção, das amostras submetidas à secagem.

A secagem experimental foi conduzida na Unidade Piloto de Secagem de Madeira Serrada do Laboratório de Processos de Industrialização da Madeira (LaPIM/FURB). Este equipamento (Figura 4.3) permite, através de um inversor de frequência e de um controlador lógico programável, o controle da velocidade, temperatura e umidade relativa do ar. A temperatura e umidade relativa do ar foram

determinadas através de um psicrômetro. A velocidade média do ar foi medida no vão entre duas camadas, com um anemômetro Testo 435, e mantida constante em 3,7 m/s. Não foi programada reversão dos ventiladores.



FIGURA 4.3: Unidade piloto de secagem de madeira serrada.

As amostras foram submetidas à secagem em condições de temperatura de 50 e 70 °C, umidades relativas do ar de 20 e 60%. Essas condições representam valores próximos aos aplicados na secagem convencional destas espécies. A combinação de três espécies, duas temperaturas e duas umidades relativas gera um total de 12 tratamentos. O tratamento com temperatura de 70 °C e 60% de umidade relativa foi aplicado duas vezes para avaliar a repetibilidade do processo.

Durante a secagem, com intervalos diários, todas as peças remanescentes eram removidas da pilha e pesadas. Uma peça era definitivamente

retirada para determinação do gradiente de umidade e as outras eram devolvidas ao processo. Esse procedimento durava cerca de 10 minutos. A peça substituída era repostada por outra da mesma espécie para não alterar a geometria da pilha.

As amostras para determinação do gradiente de umidade e da massa seca foram obtidas no meio do comprimento das peças. Cada amostra foi laminada no sentido da espessura, utilizando uma guilhotina, como apresentado por Gu e Zink-Sharp (1999), obtendo-se fatias como as apresentadas na Figura 4.4, cujos teores de umidade foram determinados pelo método gravimétrico.

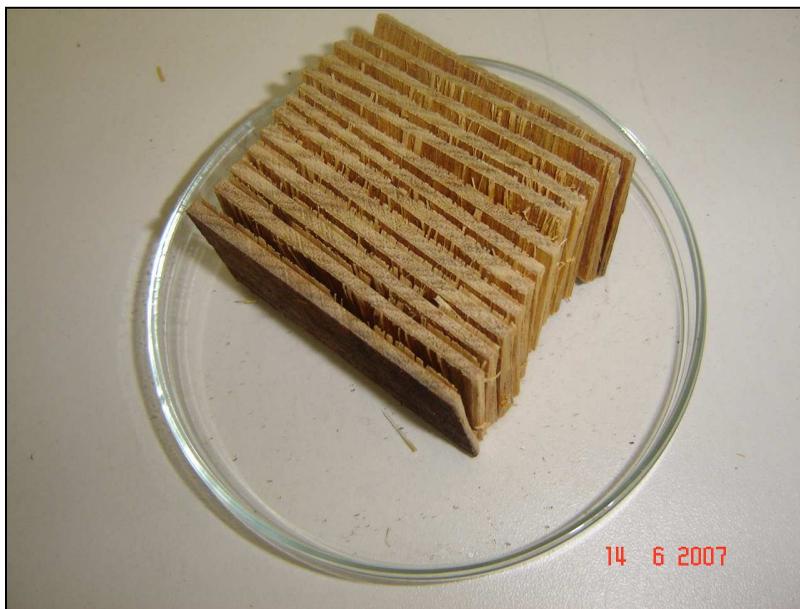


FIGURA 4.4: Lâminas obtidas para determinação do gradiente de umidade durante a secagem.

O teor de umidade médio desta amostra foi extrapolado para a peça, possibilitando

determinar a massa seca e o teor de umidade ao longo do processo de secagem.

4.1.4 Determinação da difusividade mássica efetiva.

A difusividade efetiva de cada peça foi determinada através de duas formas: do ajuste à forma linearizada da equação 3.70 e através da aplicação de valores crescentes de difusividade efetiva até obter um erro mínimo. Neste último método, aplicou-se valores entre $1 \cdot 10^{-12}$ m²/s e $1 \cdot 10^{-9}$ m²/s, com passo de $1 \cdot 10^{-12}$ m²/s, na equação 3.70, com cinco termos na série infinita. O valor escolhido era o que minimizava a soma de quadrados dos desvios entre os valores calculados e experimentais. Ambas as formas de determinação consideram a difusividade constante com a umidade.

O efeito da temperatura na difusividade mássica efetiva foi determinado através da energia de ativação, conforme apresentado na equação 3.42.

4.1.5 Determinação dos coeficientes convectivos de transferência de calor e massa

Experimentalmente, os coeficientes convectivos de transferência de massa foram determinados através da equação 4.1.

$$h_m = \frac{\dot{m}}{(C_e - C_s)} \quad (5.82)$$

onde C_s = concentração de umidade superficial (kg/m³);

C_e = concentração de umidade em equilíbrio (kg/m³);

\dot{m} = fluxo de massa (kg/(m² s)).

O teor de umidade superficial foi aquele obtido na lâmina mais externa extraída durante a determinação do gradiente de secagem.

Os coeficientes convectivos de transferência de massa determinados

experimentalmente foram comparados com os calculados a partir da equação 3.25.

Com os coeficientes convectivos de transferência de massa e as difusividades mássicas efetivas foram calculados os números de Biot mássico, que determinam a relação entre as resistências interna e externa à transferência de massa.

Os coeficientes convectivos de transferência de calor foram estimados pela equação 3.24. Com a condutividade térmica e o coeficiente convectivo de transferência de calor, foi calculado o número de Biot de calor.

4.1.6 Determinação de isotermas de sorção.

As isotermas de sorção foram determinadas em amostras constituídas de 25 peças por espécie, com comprimento de 100 mm, largura de 50 mm e espessura de 5 mm. Subamostras com cinco peças por espécie foram mantidas dentro de dessecadores durante a dessorção inicial, sobre cada uma das soluções supersaturadas dos sais apresentados na Tabela 4.1. Todos os sais foram adquiridos como tendo pureza para análise (P.A.) Os dessecadores foram mantidos dentro de estufas de secagem com temperatura controlada de modo que a combinação de temperatura e solução salina resultou nos valores de umidade relativa do ar apresentados na Tabela 1.

TABELA 4.1: Umidade relativa do ar (%) obtida em diferentes temperaturas para soluções salinas supersaturadas.

T (°C)	KF	MgCl ₂	NaBr	NaNO ₃	KCl
47	21,5	30,7	52,0	69,9	81,4
65	21,2	28,5	49,5	67,0	79,3
80	22,8	26,0	51,4	65,2	78,9

A temperatura de 47°C foi mantida por cem dias, até que pesagens sucessivas, com

intervalos de três ou mais dias, indicassem variação na massa úmida inferior a 0,5%. Neste momento a temperatura foi elevada para 65 °C e mantida por mais cinquenta dias, até nova estabilização, quando a temperatura foi elevada para 80 °C e assim mantida por mais quarenta dias.

A massa seca de cada peça foi determinada ao final do experimento pela pesagem, após manutenção em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até massa constante. O teor de umidade de equilíbrio para cada espécie e temperatura foi determinado como a relação entre a massa de água e a massa seca do material, em percentagem.

Os modelos de Hailwood e Horrobin de um hidrato (equação 3.43) e GAB (equação 3.48) foram ajustados a partir dos dados experimentais.

Os indicadores de qualidade dos modelos na predição da umidade de equilíbrio foram o coeficiente de determinação (equação 4.2) e o erro relativo médio (equação 4.3).

$$R^2\% = \frac{\sum_{i=1}^N (X_p - \bar{X}_e)^2}{\sum_{i=1}^N (X_e - \bar{X}_e)^2} * 100 \quad (5.83)$$

$$E\% = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|X_p - X_e|}{X_e} \quad (5.84)$$

Sendo N = número de medidas experimentais

X_p = umidade prevista ou estimada

X_e = umidade obtida experimentalmente

A energia de adsorção foi calculada em função do teor de umidade pela aplicação da equação de Clausius-Clapeyron (equação 4.4), como apresentado por Keey *et al.* (2000),

$$q_s = - R \left. \frac{\partial \ln(\varphi)}{\partial \left(\frac{1}{T}\right)} \right|_x \quad (5.85)$$

sendo q_s = energia de adsorção (kJ/kg)

T = temperatura absoluta (K)

R = constante dos gases ideais (kJ/(kgmol K))

φ = umidade relativa do ar (Pa/Pa)

Um polinômio do segundo grau, na forma da equação 4.5, foi ajustado para estimar a energia de adsorção em função da umidade de equilíbrio.

$$q_s = A + B * X + C * X^2 \quad (5.86)$$

Este polinômio pode ser aplicado para obter-se a energia integral de adsorção.

4.2 METODOLOGIA NUMÉRICA

4.2.1 Modelo Matemático

O modelo adotado para simular a secagem das três espécies escolhidas contempla a temperatura, a concentração de umidade e o acoplamento entre estas variáveis através da difusão térmica. Trata-se de uma adaptação do modelo proposto por Martinović *et al.* (2001).

A secagem de madeira é modelada pelas equações de balanço de energia (equação 4.6) e de massa (equação 4.7).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) = - \frac{\partial q}{\partial x} \quad (5.87)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} \quad (5.88)$$

O fluxo de massa apresenta dois componentes, a difusão segundo a primeira Lei

de Fick e a difusão térmica, esta última como resultado do efeito Soret (equação 4.8).

$$\dot{m} = -D \frac{\partial C}{\partial x} - \delta D \frac{\partial T}{\partial x} \quad (5.89)$$

O fluxo de energia apresenta um componente relacionado à condução segundo a Lei de Fourier e outro relacionado ao consumo de energia para evaporar a parcela da massa que se difunde na forma de vapor (equação 4.9).

$$q = -k_h \frac{\partial T}{\partial x} + \epsilon r \dot{m} \quad (5.90)$$

Substituindo na equação do fluxo de calor a equação do fluxo de massa, obtém-se:

$$q = -k_h \frac{\partial T}{\partial x} + \epsilon r \left(-D \frac{\partial C}{\partial x} - \delta D \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (5.91)$$

$$q = -k_h \frac{\partial T}{\partial x} - \epsilon r D \frac{\partial C}{\partial x} - \epsilon r \delta D \frac{\partial T}{\partial x} \quad (5.92)$$

$$q = -(k_h + \epsilon r \delta D) \frac{\partial T}{\partial x} - \epsilon r D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (5.93)$$

Inserindo a equação do fluxo de calor na equação da conservação de energia, obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) = - \frac{\partial \left(-(k_h + \epsilon r \delta D) \frac{\partial T}{\partial x} - \epsilon r D \frac{\partial C}{\partial x} \right)}{\partial x} \quad (5.94)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) = + \frac{\partial \left((k_h + \epsilon r \delta D) \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\epsilon r D \frac{\partial C}{\partial x} \right)}{\partial x} \quad (5.95)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) - \frac{\partial \left((k_h + \epsilon r \delta D) \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} - \frac{\partial \left(\epsilon r D \frac{\partial C}{\partial x} \right)}{\partial x} = 0 \quad (5.96)$$

Inserindo a equação do fluxo de massa na equação da conservação da espécie química, obtém-se:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial \left(-D \frac{\partial C}{\partial x} - \delta D \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} \quad (5.97)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = + \frac{\partial \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\delta D \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} \quad (5.98)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} - \frac{\partial \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right)}{\partial x} - \frac{\partial \left(\delta D \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} = 0 \quad (5.99)$$

As condições de contorno são definidas pelas equações 4.19 e 4.20.

$$k_h \frac{\partial T}{\partial x} + (1 - \varepsilon) \cdot r \cdot h_m (C_s - C_e) + h_h (T - T_\infty) = 0 \quad (5.100)$$

Nesta equação a energia que chega à superfície por convecção é conduzida para dentro do material ou é consumida para evaporar a umidade na superfície.

$$D \frac{\partial C}{\partial x} + \delta \cdot D \frac{\partial T}{\partial x} + h_m (C_s - C_e) = 0 \quad (5.101)$$

Nesta equação a umidade que chega à superfície por difusão e pelo efeito Soret é removida por convecção.

O fluxo nulo em razão da simetria é definido como a condição de contorno na metade da espessura e da largura.

4.2.2 Discretização das equações de conservação de energia e da espécie química.

A solução numérica foi obtida através da discretização das equações diferenciais parciais pelo Método dos Volumes Finitos, que consiste em integrar as equações ao longo das dimensões dos volumes de controle.

Apenas para uniformizar o balanço de massa e o balanço de energia, na equação 4.18, a concentração de umidade (C) foi substituída pelo produto da massa específica básica [$\rho_{bás}(\text{kg}/\text{m}^3)$], da umidade específica ($c_m = 0,01 \text{ kg água/kg sólido seco } \%$) e do teor de umidade em base seca [$X(\%)$].

Dessa forma, nas equações 4.15 e 4.18 as grandezas de interesse, temperatura (T) e teor

de unidade (X), podem ser substituídas por uma variável genérica ϕ , os coeficientes difusivos, tanto de calor como de massa, podem ser substituídos por uma variável genérica Γ^ϕ e os demais fenômenos agrupados no termo fonte S_ϕ .

TABELA 4.2: Termos correspondentes na equação generalizada.

Variável	Variável (ϕ)	Capacidade específica (c_ϕ)	Termo Difusivo (Γ^ϕ)	Termo Fonte
Temperatura	T	c_p	$(k + \epsilon r \delta D)$	$\frac{\partial(\epsilon r D \frac{\partial C}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(\epsilon r D \frac{\partial C}{\partial y})}{\partial y} + \frac{\partial(\epsilon r D \frac{\partial C}{\partial z})}{\partial z}$
Concentração	X	c_m	D	$\frac{\partial(\delta D \frac{\partial T}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(\delta D \frac{\partial T}{\partial y})}{\partial y} + \frac{\partial(\delta D \frac{\partial T}{\partial z})}{\partial z}$

Os balanços, na forma generalizada, são apresentados na equação 4.21.

$$\frac{\partial(\rho c_\phi \phi_P)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) - S_\phi = 0$$

Aplicando o Método dos Volumes Finitos, obtém-se as equações 4.22 e 4.23.

$$\begin{aligned}
& \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n \int_b^t \frac{\partial(\rho \cdot c_\phi \phi_P)}{\partial t} dz dy dx dt - \\
& - \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n \int_b^t \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dz dy dx dt - \\
& - \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n \int_b^t \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dz dy dx dt - \quad (5.103) \\
& - \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n \int_b^t \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) dz dy dx dt - \\
& - \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n \int_b^t S_\phi dz dy dx dt = 0 \\
& \left(\rho_P c_\phi \phi_P - \rho_P^0 c_{\phi_P}^0 \phi_P^0 \right) \Delta x \Delta y \Delta z -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \left(\Gamma_e^\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_e - \Gamma_w^\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_w \right) \Delta t \Delta y \Delta z - \\
& - \left(\Gamma_n^\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_n - \Gamma_s^\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_s \right) \Delta t \Delta x \Delta z - \quad (5.104) \\
& - \left(\Gamma_t^\phi \frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_t - \Gamma_b^\phi \frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_b \right) \Delta t \Delta x \Delta y - \\
& - S_\phi \Delta t \Delta x \Delta y \Delta z = 0
\end{aligned}$$

Usando a função de interpolação do esquema CDS, obtém-se a equação 4.24.

$$\begin{aligned}
& \left(\rho_P c_\phi \phi_P - \rho_P^0 c_{\phi_P}^0 \phi_P^0 \right) \Delta x \Delta y \Delta z - \\
& - \left(\Gamma_e^\phi \frac{\phi_E - \phi_P}{\Delta x} - \Gamma_w^\phi \frac{\phi_P - \phi_W}{\Delta x} \right) \Delta t \Delta y \Delta z - \\
& - \left(\Gamma_n^\phi \frac{\phi_N - \phi_P}{\Delta y} - \Gamma_s^\phi \frac{\phi_P - \phi_S}{\Delta y} \right) \Delta t \Delta x \Delta z - \quad (5.105) \\
& - \left(\Gamma_t^\phi \frac{\phi_T - \phi_P}{\Delta z} - \Gamma_b^\phi \frac{\phi_P - \phi_B}{\Delta z} \right) \Delta t \Delta x \Delta y - \\
& - S_\phi \Delta t \Delta x \Delta y \Delta z = 0
\end{aligned}$$

Dividindo a equação por Δt obtém-se a equação 4.25.

$$\begin{aligned}
& \left(\rho_P c_\phi \phi_P - \rho_P^0 c_{\phi_P}^0 \phi_P^0 \right) \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} - \\
& - \left(\Gamma_e^\phi \frac{\phi_E - \phi_P}{\Delta x} - \Gamma_w^\phi \frac{\phi_P - \phi_W}{\Delta x} \right) \Delta y \Delta z - \\
& - \left(\Gamma_n^\phi \frac{\phi_N - \phi_P}{\Delta y} - \Gamma_s^\phi \frac{\phi_P - \phi_S}{\Delta y} \right) \Delta x \Delta z - \\
& - \left(\Gamma_t^\phi \frac{\phi_T - \phi_P}{\Delta z} - \Gamma_b^\phi \frac{\phi_P - \phi_B}{\Delta z} \right) \Delta x \Delta y - S_\phi \Delta x \Delta y \Delta z = 0
\end{aligned} \tag{5.106}$$

Isolando os termos obtém-se a equação 4.26 e 4.27.

$$\begin{aligned}
& \rho_P c_\phi \phi_P \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + \Gamma_e^\phi \frac{\phi_P}{\Delta x} \Delta y \Delta z + \Gamma_w^\phi \frac{\phi_P}{\Delta x} \Delta y \Delta z + \\
& + \Gamma_n^\phi \frac{\phi_P}{\Delta y} \Delta x \Delta z + \Gamma_s^\phi \frac{\phi_P}{\Delta y} \Delta x \Delta z + \Gamma_t^\phi \frac{\phi_P}{\Delta z} \Delta x \Delta y + \\
& + \Gamma_b^\phi \frac{\phi_P}{\Delta z} \Delta x \Delta y = \rho_P^0 c_{\phi_P}^0 \phi_P^0 \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + \Gamma_e^\phi \frac{\phi_E}{\Delta x} \Delta y \Delta z + (5.107) \\
& + \Gamma_w^\phi \frac{\phi_W}{\Delta x} \Delta y \Delta z + \Gamma_n^\phi \frac{\phi_N}{\Delta y} \Delta x \Delta z + \Gamma_s^\phi \frac{\phi_S}{\Delta y} \Delta x \Delta z + \\
& + \Gamma_t^\phi \frac{\phi_T}{\Delta z} \Delta x \Delta y + \Gamma_b^\phi \frac{\phi_B}{\Delta z} \Delta x \Delta y + S_\phi \Delta x \Delta y \Delta z \\
& \left(\rho_P c_\phi \frac{\Delta V}{\Delta t} + \Gamma_e^\phi \frac{\Delta y \Delta z}{\Delta x} + \Gamma_w^\phi \frac{\Delta y \Delta z}{\Delta x} + \right. \\
& \left. + \Gamma_n^\phi \frac{\Delta x \Delta z}{\Delta y} + \Gamma_s^\phi \frac{\Delta x \Delta z}{\Delta y} + \Gamma_t^\phi \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta z} + \right. \\
& \left. + \Gamma_b^\phi \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta z} \right) = \\
& = \Gamma_e^\phi \frac{\Delta y \Delta z}{\Delta x} \phi_E + \Gamma_w^\phi \frac{\Delta y \Delta z}{\Delta x} \phi_W + \Gamma_n^\phi \frac{\Delta x \Delta z}{\Delta y} \phi_N + \\
& + \Gamma_s^\phi \frac{\Delta x \Delta z}{\Delta y} \phi_S + \Gamma_t^\phi \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta z} \phi_T + \Gamma_b^\phi \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta z} \phi_B + \\
& + S_{\phi_P} \Delta V + \rho_P^0 c_{\phi_P}^0 \frac{\Delta V}{\Delta t} \phi_P^0
\end{aligned} \tag{5.108}$$

Neste trabalho é utilizada a técnica de *lagging* (PINTO; LAGE, 2001) em que se utilizam

os valores de ρ e Γ calculados com o valor de ϕ_P^0 sem nenhuma correção posterior, resultando na equação 4.28.

$$\begin{aligned} & \left(\rho_P^0 C_\phi^0 \frac{\Delta V}{\Delta t} + \Gamma_e^\phi \frac{\Delta y \Delta z}{\Delta x} + \Gamma_w^\phi \frac{\Delta y \Delta z}{\Delta x} + \Gamma_n^\phi \frac{\Delta x \Delta z}{\Delta y} + \right. \\ & \left. + \Gamma_s^\phi \frac{\Delta x \Delta z}{\Delta y} + \Gamma_t^\phi \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta z} + \Gamma_b^\phi \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta z} \right) = \\ & = \Gamma_e^\phi \frac{\Delta y \Delta z}{\Delta x} \phi_E + \Gamma_w^\phi \frac{\Delta y \Delta z}{\Delta x} \phi_W + \Gamma_n^\phi \frac{\Delta x \Delta z}{\Delta y} \phi_N + \quad (5.109) \\ & + \Gamma_s^\phi \frac{\Delta x \Delta z}{\Delta y} \phi_S + \Gamma_t^\phi \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta z} \phi_T + \Gamma_b^\phi \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta z} \phi_B + \\ & + S_{\phi_P} \Delta V + \rho_P^0 C_{\phi_P}^0 \frac{\Delta V}{\Delta t} \phi_P^0 \end{aligned}$$

4.2.3 Discretização das condições de contorno

As condições de contorno 4.19 e 4.20 foram aplicadas através de volumes fictícios, como apresentado na Figura 4.5.

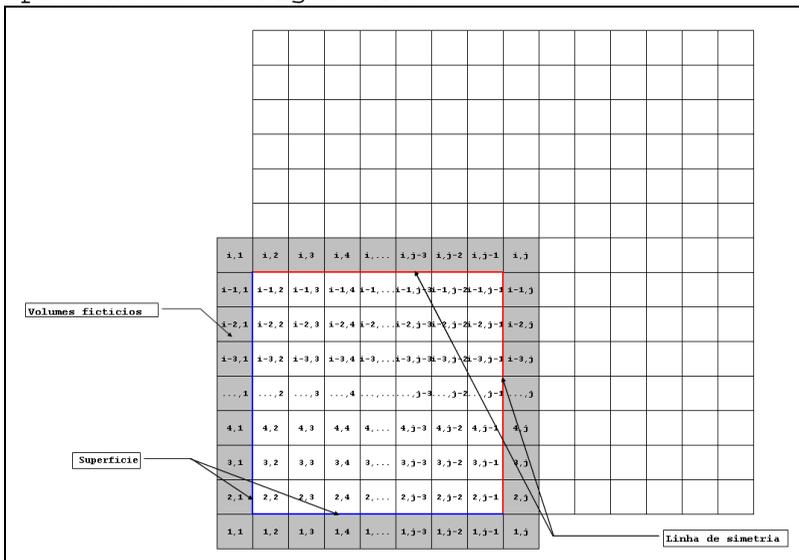


FIGURA 4.5: Volumes de controle com destaque para os volumes fictícios.

Os coeficientes para o volume de controle 1,1 são apresentados nas equações 4.29 e 4.30:

$$\phi_P = \left(\frac{\phi_E + \phi_S + \phi_{SE}}{3} \right) \quad (5.110)$$

$$\phi_P - \frac{1}{3} \phi_E - \frac{1}{3} \phi_S - \frac{1}{3} \phi_{SE} = 0 \quad (5.111)$$

Os coeficientes para o volume de controle 1,j são apresentados nas equações 4.31 e 4.32:

$$\phi_P = \left(\frac{\phi_W + \phi_S + \phi_{SW}}{3} \right) \quad (5.112)$$

$$\phi_P - \frac{1}{3} \phi_W - \frac{1}{3} \phi_S - \frac{1}{3} \phi_{SW} = 0 \quad (5.113)$$

Os coeficientes para o volume de controle i,1 são apresentados nas equações 4.33 e 4.34:

$$\phi_P = \left(\frac{\phi_E + \phi_N + \phi_{NE}}{3} \right) \quad (5.114)$$

$$\phi_P - \frac{1}{3} \phi_E - \frac{1}{3} \phi_N - \frac{1}{3} \phi_{NE} = 0 \quad (5.115)$$

Os coeficientes para o volume de controle i,j são apresentados nas equações 4.35 e 4.36:

$$\phi_P = \left(\frac{\phi_W + \phi_N + \phi_{NW}}{3} \right) \quad (5.116)$$

$$\phi_P - \frac{1}{3} \phi_W - \frac{1}{3} \phi_N - \frac{1}{3} \phi_{NW} = 0 \quad (5.117)$$

Os coeficientes para os volumes de controle 1,2 a 1,j-1 são apresentados nas equações 4.37 e 4.38:

$$-k \frac{\phi_P - \phi_S}{\Delta y} = h \left(\frac{\phi_P + \phi_S}{2} - \phi_\infty \right) + S_\phi \quad (5.118)$$

$$\left(-\frac{k}{\Delta y} - \frac{h}{2} \right) \phi_P + \left(\frac{k}{\Delta y} - \frac{h}{2} \right) \phi_S = -h\phi_\infty + S_\phi \quad (5.119)$$

Os coeficientes para os volumes de controle 2,j a i-1,j são apresentados nas equações 4.39 e 4.40:

$$-k \frac{\phi_P - \phi_W}{\Delta x} = 0 \quad (5.120)$$

$$-\frac{k}{\Delta x} \phi_P + \frac{k}{\Delta x} \phi_W = 0 \quad (5.121)$$

Os coeficientes para os volumes de controle 2,1 a i-1,1 são apresentados nas equações 4.41 e 4.42:

$$-k \frac{\phi_E - \phi_P}{\Delta x} = h \left(\frac{\phi_P + \phi_E}{2} - \phi_\infty \right) + S_\phi \quad (5.122)$$

$$\left(\frac{k}{\Delta x} - \frac{h}{2} \right) \phi_P + \left(-\frac{k}{\Delta x} - \frac{h}{2} \right) \phi_E = -h\phi_\infty + S_\phi \quad (5.123)$$

Os coeficientes para os volumes i,2 a i,j-1 são apresentados nas equações 4.43 e 4.44:

$$-k \frac{\phi_N - \phi_P}{\Delta y} = 0 \quad (5.124)$$

$$\frac{k}{\Delta y} \phi_P - \frac{k}{\Delta y} \phi_N = 0 \quad (5.125)$$

Entre as equações 4.34 a 4.41, o termo k refere-se à condutividade térmica quando ϕ for a temperatura e à difusividade efetiva quando ϕ for o teor de umidade. Os coeficientes convectivos de transferência de calor e massa foram representados pela letra h . Os termos fonte são apresentados na Tabela 4.3.

TABELA 4.3: Termos fontes para as condições de contorno quando a variável de interesse for a temperatura e a concentração de umidade.

Volumes	Termo fonte	
	Calor	Massa
1,2 a 1,j-1	$(1 - \varepsilon) \cdot r \cdot h_m \left(\frac{M_P + M_S}{2} - M_\infty \right)$	$\delta D \frac{T_P - T_S}{\Delta y}$
2,1 a i- 1,1	$(1 - \varepsilon) \cdot r \cdot h_m \left(\frac{M_P + M_W}{2} - M_\infty \right)$	$\delta D \frac{T_P - T_W}{\Delta x}$

Os termos fonte foram calculados com o valor das variáveis na iteração anterior.

O método iterativo ponto a ponto de Gauss-Seidel foi utilizado para a solução das equações lineares. Neste método cada equação é

calculada utilizando os valores da iteração anterior e da iteração atual quando disponíveis. O critério para o avanço no tempo foi a estabilização da solução, obtida quando a diferença máxima entre a solução de duas iterações consecutivas fosse menor que 0,05%. O avanço no tempo foi de 600 s e o número de volumes de controle foi de 22 ao longo da espessura e um número variável na largura, de modo que a largura e altura do volume de controle fossem iguais.

4.3 APLICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO NA SIMULAÇÃO DA SECAGEM

Os modelos anteriormente apresentados e discretizados foram aplicados na simulação da secagem de muirapiranga, timborana e andiroba utilizando os programas umidade-temperatura sugeridos por CIRAD (2009), apresentados na Tabela 4.4 e por Forest Products Laboratory (2009), apresentados na Tabela 4.5. Estas fontes foram selecionadas por apresentarem programas de secagem para as três espécies estudadas.

Os programas de secagem do tipo umidade-temperatura determinam que temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido devem ser adotadas em função da umidade da madeira. O objetivo é encontrar o equilíbrio entre a taxa de secagem e a ocorrência de defeitos relacionados às tensões de secagem.

TABELA 4.4: Programas umidade-temperatura apresentados por CIRAD (2009), sendo UM (teor de umidade base seca da madeira (%)), TBS (temperatura de bulbo seco (°C)), UR (umidade relativa do ar (%)) e UEq (umidade de equilíbrio).

Espécies	UM	TBS	UR	UEq
Muirapiranga	Verde	42	94	14,0
	50	48	74	9,7
	30	54	63	7,9
	20	60	62	7,5
	15	60	62	7,5
Timborana	Verde	42	82	16,0
	50	48	74	13,0
	40	48	74	13,0
	30	48	74	13,0
	15	54	63	10,4
Andiroba	30	42	94	21,0
	25	42	82	17,5
	20	48	74	14,5
	15	48	74	14,5

TABELA 4.5: Programas umidade-temperatura apresentados por Forest Products Laboratory (2009), sendo UM (teor de umidade base seca da madeira (%)), TBS (temperatura de bulbo seco (°C)), UR (umidade relativa do ar (%)) e UEq (umidade de equilíbrio).

Espécies	UM	TBS	UR	UEq
Muirapiranga	Acima de 40	37,8	86	12,5
	40-35	37,8	83	12,0
	35-30	37,8	74	10,5
	30-25	40,6	59	8,3
	25-20	40,6	56	7,9
	20-15	46,1	39	6,2
	15 ao final	48,9	32	5,6
Timborana	Acima de 40	43,3	87	17,5
	40-35	43,3	84	16,5
	35-30	43,3	76	14,0
	30-25	48,9	63	10,8
	25-20	54,4	36	7,1
	20-15	60,0	15	4,7
	15 ao final	71,1	22	5,0
Andiroba	Acima de 50	48,9	85	19,0
	50-40	48,9	80	18,0
	40-35	48,9	70	15,8
	35-30	48,9	52	12,0
	30-25	54,4	29	8,0
	25-20	60,0	15	5,3
	20-15	65,6	19	6,0
15 ao final	82,2	26	5,7	

As variáveis de entrada na simulação foram a temperatura inicial, arbitrada em 30 °C, a concentração de umidade inicial média, apresentada no item 5.1.2, a massa específica

básica média, apresentada no item 5.1.1, e o programa de secagem desejado para cada espécie.

Com a concentração de umidade e a massa específica foram calculadas as propriedades térmicas iniciais. Com a temperatura inicial foi calculada a difusividade efetiva, através da equação de Arrhenius.

Por variarem pouco nas condições analisadas, os coeficientes convectivos de transferência de calor foram mantidos constantes, em $19 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Os coeficientes convectivos de transferência de massa também foram mantidos constantes, em $0,019 \text{ m/s}$, justificado pela pouca variação nas condições analisadas e pelo alto número de Biot mássico, que minimiza a importância deste fator.

Na solução das equações discretizadas, o processo iterativo se repetia até que a diferença máxima nos valores obtidos para qualquer um dos pontos internos na peça, entre iterações sucessivas, fosse de $0,05\%$.

Após convergência eram atualizadas as propriedades térmicas e da difusividade efetiva. Este processo se repetiu até alcançar determinado teor de umidade para a mudança na fase do programa de secagem ou finalização do processo (Figura 4.6).

As variáveis observadas na comparação dos programas de secagem foram o tempo de secagem por fase e as taxas de secagem.

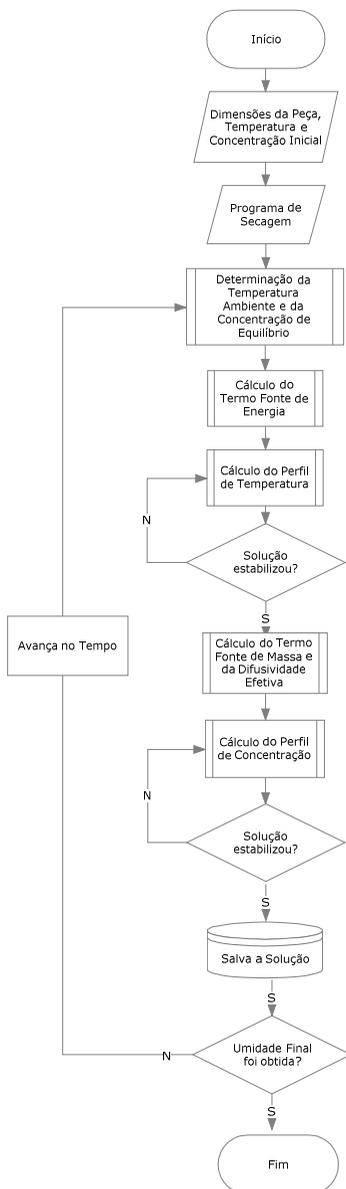


FIGURA 4.6: Fluxograma de simulação dos programas de secagem.

4.4 EFEITO DE VARIÁVEIS DA MADEIRA QUE INTERFEREM NO TEMPO DE SECAGEM

Como exemplo, o programa de secagem sugerido por Forest Products Laboratory (2009) para timborana foi aplicado considerando a variabilidade natural das propriedades físicas da madeira. Essa variabilidade reflete em diferentes teores de umidade ao final de determinado tempo de secagem ou tempos diversos até obter-se o mesmo teor de umidade.

Foram consideradas variações na espessura, difusividade e concentração inicial de umidade. Estas variáveis foram aplicadas na simulação nos valores de $\pm 1,65$ vezes o desvio-padrão, o que corresponde a 90% da população, considerando uma distribuição normal (Tabela 4.6).

Para a difusividade foi aplicado um fator que considera a distribuição de frequência e a variabilidade natural da propriedade sobre o valor calculado para cada temperatura.

TABELA 4.6: Valores utilizados para simular as variações nas propriedades da madeira com impacto no tempo de secagem.

Variável	Valor Mínimo	Valor Médio	Valor Máximo
Espessura (mm)	26,24	28,60	30,96
Difusividade	Calculado * 0,52	Calculado	Calculado*1,52
Concentração Inicial (kg/m ³)	189,89	250,75	311,98

O efeito considerado na avaliação da variabilidade destas propriedades foi o tempo de secagem em relação ao obtido com as propriedades médias.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

5.1 PROPRIEDADES E CONDIÇÕES INICIAIS DA MADEIRA

5.1.1 Massa específica básica

Com base na massa específica básica e utilizando os critérios apresentados por Durlo (1991) as três espécies estão em classes distintas. Andiroba, com uma média de 548,3 kg/m³, pode ser classificada como madeira média; timborana, com uma média de 748,4 kg/m³, como madeira pesada; e muirapiranga, com 906,8 kg/m³, como madeira muito pesada. A dispersão nesta propriedade, expressa pelo coeficiente de variação, foi de 3,8%; 10,4% e 6,5% para muirapiranga, timborana e andiroba, respectivamente. Os valores de coeficiente de variação para muirapiranga e andirora estão abaixo do valor médio de 10%, apresentado por Forest Products Laboratory (1999).

5.1.2 Teores e concentrações iniciais e máximas de umidade

O teor de umidade inicial variou tanto entre as três espécies como também entre peças de uma mesma espécie. Os valores médios de umidade inicial foram de 35,2% para muirapiranga, 33,9% para timborana e 55,5% para andiroba. A variação nos valores iniciais desta propriedade segue a seqüência inversa, com o coeficiente de variação de 23,8%, 20,5% e 10,5%, para andiroba, timborana e muirapiranga, respectivamente.

Na Figura 5.1 a linha central representa a média e o afunilamento representa o intervalo de confiança para a média. Essa variação no teor de umidade inicial está relacionada com a variação desta propriedade ao longo da árvore, mesmo que ainda em pé, e relacionada com a exposição das peças ao ar durante o processamento, transporte e armazenagem.

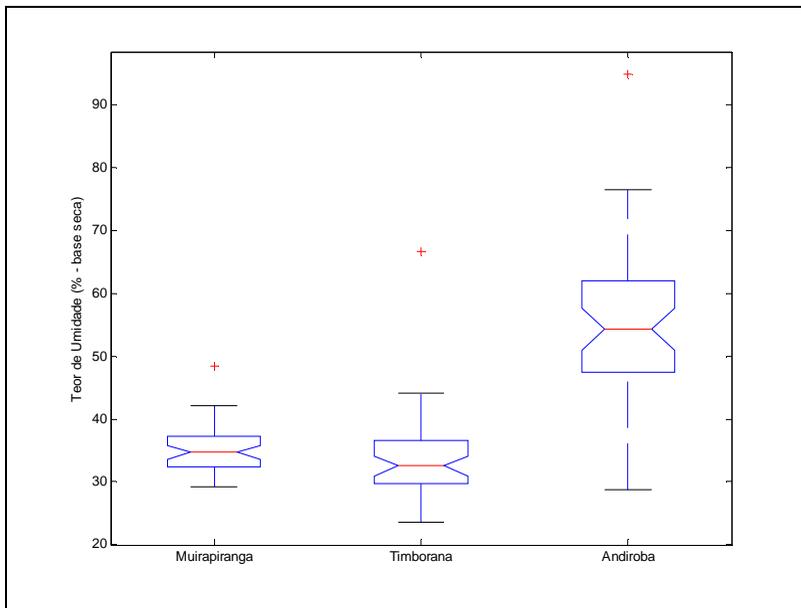


FIGURA 5.1: Teor de umidade inicial e máximo.

Simpson e Sagoe (1991) propuseram a equação 3.35 para estimar o teor de umidade inicial. Esta equação superestimou o teor de umidade para andiroba e timborada e subestimou para muirapiranga.

As peças de muirapiranga apresentavam-se com teor de saturação mais alto, correspondente a 80,7% do máximo, calculado pela equação 3.34, seguidas de timborana, com 51,4% e de andiroba, com 48,0%. Uma explicação para este fato é que o aumento da massa específica resulta em redução da difusividade mássica, que, por sua vez, limita a perda de umidade para o ambiente durante as fases de industrialização e transporte da madeira prévias à secagem. Dessa forma a madeira de muirapiranga manteve-se mais próxima da condição saturada.

Em termos de concentração de umidade, os valores médios foram de 318,66 kg/m³ para muirapiranga, com coeficiente de variação de

8,1%; de 250,75 kg/m³ para timborana, com coeficiente de variação de 14,8% e de 303,78 kg/m³ para andiroba, com coeficiente de variação de 23,2%.

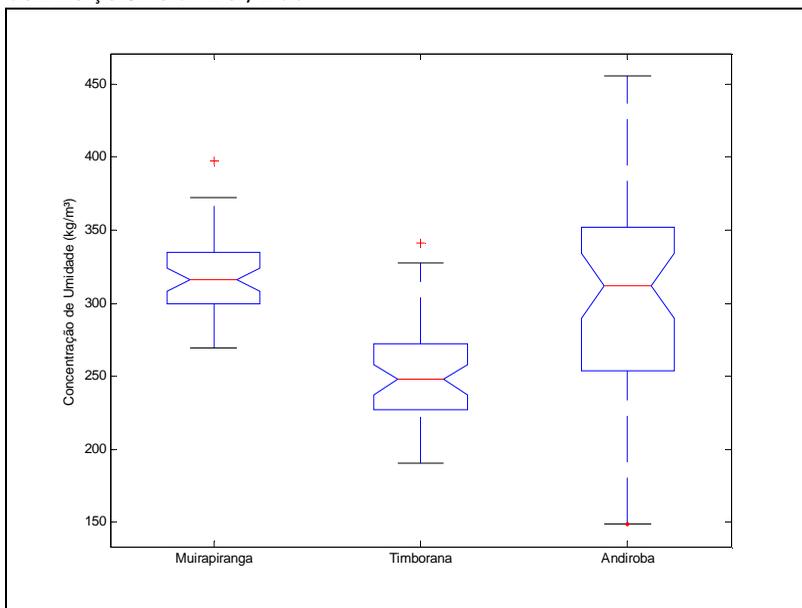


FIGURA 5.2: Concentração inicial de umidade.

Em termos de concentração de umidade, a ordem se altera, com muirapiranga apresentando a maior concentração, seguida de andiroba e de timborana. Os coeficientes de variação encontrados foram menores em termos de concentração de umidade do que em relação ao teor de umidade. Não há diferença significativa entre a concentração de umidade de muirapiranga e andiroba.

Considerando o conjunto formado pelas três espécies, a massa específica apresentou uma correlação linear de Pearson de -69% com o teor de umidade inicial e de 8% com a concentração de umidade inicial. Esse fato está relacionado à relação da massa específica com o teor de

umidade máximo e da massa seca que é usada como base para o cálculo do teor de umidade.

5.1.3 Isotermas e calor de sorção

Na Tabela 5.1 são apresentados os valores médios e a variação dos teores de umidade de equilíbrio experimentais.

Foi observada a tendência generalizada de redução na umidade de equilíbrio com o acréscimo da temperatura e de aumento na umidade de equilíbrio com a elevação da umidade relativa. Essa tendência apenas não se confirmou, nas temperaturas de 47 e 80 °C, para a solução de brometo de sódio, independente da espécie. Após a repetição completa do procedimento experimental para esta solução salina os resultados foram similares, o que leva a questionar a pureza do sal. Os valores nestas condições não foram utilizados para os ajustes das isotermas.

Observando as tendências apresentadas na Tabela 5.1, detecta-se que a higroscopicidade da madeira de andiroba é maior que a da madeira de timborana, que por sua vez é maior que a da madeira de muirapiranga. Entre as possíveis causas desta variação estão a composição química e a acessibilidade aos sítios de adsorção.

TABELA 5.1: Umidade de equilíbrio (% - base seca) obtida experimentalmente após exposição a diferentes soluções supersaturadas. Valores médios seguidos de desvio-padrão entre parênteses.

Temp. (°C)	Espécie	Solução Supersaturada				
		KF	MgCl ₂	NaBr	NaNO ₃	KCl
47	UR	21,5	30,7	52,0	69,9	81,4
	Muirapiranga	4,92 (0,10)	5,10 (0,14)	10,36 (0,37)	9,06 (0,38)	10,61 (0,45)
	Timborana	6,23 (0,28)	6,34 (0,06)	13,62 (0,05)	11,89 (0,30)	15,03 (0,86)
	Andiroba	7,40 (0,24)	7,10 (0,16)	15,76 (0,11)	13,15 (0,58)	16,76 (0,90)
65	UR	21,2	28,5	49,5	67,0	79,3
	Muirapiranga	4,24 (0,12)	4,32 (0,11)	7,03 (0,26)	7,53 (0,30)	8,74 (0,50)
	Timborana	5,48 (0,23)	5,49 (0,12)	8,80 (0,42)	10,13 (0,24)	12,27 (0,52)
	Andiroba	6,54 (0,18)	6,13 (0,10)	10,62 (0,17)	11,27 (0,26)	13,78 (0,42)
80	UR	22,8	26,0	51,4	65,2	78,9
	Muirapiranga	3,78 (0,13)	3,75 (0,10)	6,76 (0,19)	6,04 (0,20)	7,74 (0,18)
	Timborana	4,78 (0,13)	4,78 (0,11)	8,43 (0,17)	8,06 (0,12)	10,28 (0,28)
	Andiroba	5,56 (0,21)	5,62 (0,36)	10,06 (0,33)	9,09 (0,17)	11,63 (0,38)

A participação relativa dos constituintes essenciais da madeira, hemiceluloses, celulose e lignina, determina parte da quantidade de sítios de adsorção disponíveis. Por outro lado, os extrativos podem impedir o acesso da água a estes sítios de adsorção. A massa específica também apresentou correlação inversa com o teor de umidade em equilíbrio. A dificuldade das moléculas de água em atingir as hidroxilas nas quais ocorrem as pontes de hidrogênio, resultado de paredes celulares mais espessas e as tensões formadas na contração, maiores para madeiras mais densas, são alguns dos fatores relacionados às diferenças observadas.

A manutenção de amostras de madeira das três espécies consideradas, em ambientes com diferentes atividades da água, resultou em dados experimentais que demonstram que a madeira é um material higroscópico. Através da curva formada pela relação entre atividade da água e teor de umidade da madeira, como apresentado por Skaar (1972), conclui-se que a água é adsorvida em múltiplas camadas.

Os modelos de Hailwood e Horrobin e GAB foram ajustados com os dados experimentais. Como a forma de obtenção dos dados foi a mesma, através do ajuste de parábolas apresentadas nas equações 3.43 e 3.48, os coeficientes de determinação e os erros médios são os mesmos para os dois modelos.

Nas Tabelas 5.2, 5.3 e 5.4 são apresentados, para muirapiranga, timborana e andiroba, respectivamente, os coeficientes para os dois modelos ajustados, nas três temperaturas analisadas.

Ainda nas Tabelas 5.2 a 5.4, o coeficiente K_2 do modelo de Hailwood e Horrobin caracteriza a mobilidade da água dissolvida (MAJKA; OLEK, 2007), e sendo menor que um, indica restrição em relação à água na forma líquida. A higroscopicidade crescente na seqüência de

muirapiranga, timborana e andiroba é relacionada ao número de sítios de adsorção, comprovados pelo coeficiente W da teoria de Hailwood e Horrobin. Entre as espécies, a massa de madeira relacionada a um mol de água em adsorção monocamada ou monomolecular é distinta.

Nas Figuras 5.3, 5.4 e 5.5 são apresentados, para muirapiranga, timborana e andiroba, respectivamente, os pontos experimentais e o modelo GAB ajustado nas três temperaturas avaliadas. Há uma relação inversa com a temperatura e direta com a umidade relativa do ar e a umidade de equilíbrio.

A forma das isotermas comprova que a madeira é um material higroscópico, no qual a água é adsorvida em múltiplas camadas (SKAAR, 1972).

TABELA 5.2: Coeficientes das isotermas de sorção para Muirapiranga, ajustadas pelos modelos de Hailwood e Horrobin e Gugenheim, Andersen e de Bôer (GAB) com o respectivo erro médio (E%) e o coeficiente de determinação (R^2) (continua).

Espécie	Temp. (°C)	Repetição	Hailwood e Horrobin				
			K1	K2	W	E%	R^2
Muirapiranga	47	A	28,6385	0,7188	375,4282	3,0	99,77%
		B	30,7814	0,6993	391,1536	3,1	99,74%
		C	28,6739	0,7207	381,1273	2,1	99,86%
		D	30,8154	0,6963	393,2141	3,2	99,66%
		E	33,5085	0,6966	392,9962	4,9	99,64%
		\bar{X}	30,1249	0,7082	384,8782	3,3	99,73%
	65	A	25,1288	0,6455	376,3554	8,0	98,30%
		B	25,2300	0,5821	371,3715	11,0	96,48%
		C	27,1225	0,6725	398,9369	6,3	98,80%
		D	27,3688	0,5947	389,5076	8,6	98,18%
		E	29,0616	0,6126	391,8856	7,1	98,12%
		\bar{X}	26,4039	0,6257	384,1308	8,2	97,98%
	80	A	43,0694	0,7257	523,6969	4,1	99,79%
		B	45,7285	0,7188	548,3930	4,5	99,74%
		C	42,3136	0,7098	524,3690	2,0	99,94%
		D	48,6057	0,7365	563,7432	5,7	99,61%
		E	42,0730	0,6826	503,9879	2,6	99,89%
		\bar{X}	44,0485	0,7170	531,3463	3,8	99,79%

TABELA 5.2: Coeficientes das isotermas de sorção para Muirapiranga, ajustadas pelos modelos de Hailwood e Horrobian e Gugenhein, Andersen e de Bôer (GAB) com o respectivo erro médio (E%) e o coeficiente de determinação (R^2) (continuação).

Espécie	Temp. (°C)	Repetição	GAB				
			K	C_g	X_m	E%	R^2
Muirapiranga	47	A	0,7188	29,6385	0,0479	3,0	99,77%
		B	0,6993	31,7814	0,0460	3,1	99,74%
		C	0,7207	29,6739	0,0472	2,1	99,86%
		D	0,6963	31,8154	0,0458	3,2	99,66%
		E	0,6966	34,5085	0,0458	4,9	99,64%
		\bar{X}	0,7082	31,1249	0,0468	3,3	99,73%
	65	A	0,6455	26,1288	0,0478	8,0	98,30%
		B	0,5821	26,2300	0,0485	11,0	96,48%
		C	0,6725	28,1225	0,0451	6,3	98,80%
		D	0,5947	28,3688	0,0462	8,6	98,18%
		E	0,6126	30,0616	0,0459	7,1	98,12%
		\bar{X}	0,6257	27,4039	0,0469	8,2	97,98%
	80	A	0,7257	44,0694	0,0344	4,1	99,79%
		B	0,7188	46,7285	0,0328	4,5	99,74%
		C	0,7098	43,3136	0,0343	2,0	99,94%
		D	0,7365	49,6057	0,0319	5,7	99,61%
		E	0,6826	43,0730	0,0357	2,6	99,89%
		\bar{X}	0,7170	45,0485	0,0339	3,8	99,79%

TABELA 5.3: Coeficientes das isotermas de sorção para Timborana, ajustadas pelos modelos de Hailwood e Horrobian e Gugenhein, Andersen e de Bôer (GAB) com o respectivo erro médio (E%) e o coeficiente de determinação (R^2) (*continua*).

Espécie	Temp. (°C)	Repetição	Hailwood e Horrobin				
			K1	K2	W	E%	R^2
Timborana	47	A	24,1135	0,7464	314,9498	4,0	99,76%
		B	22,3241	0,7859	315,4093	2,7	99,91%
		C	23,9032	0,7947	319,1824	6,1	99,57%
		D	23,1311	0,7820	315,8411	4,3	99,77%
		E	24,1951	0,7025	292,1586	5,7	99,31%
		\bar{X}	23,4774	0,7632	311,5372	4,6	99,66%
	65	A	20,1090	0,6659	304,3621	8,4	97,63%
		B	24,4504	0,7540	344,7456	1,4	99,90%
		C	26,1562	0,7739	353,9579	3,4	99,75%
		D	22,2545	0,7169	320,4957	4,2	99,51%
		E	23,2363	0,6511	303,5300	5,7	98,79%
		\bar{X}	22,2013	0,7041	319,9378	4,6	99,12%
	80	A	31,3410	0,7301	413,0104	1,8	99,94%
		B	30,9232	0,7267	404,2523	2,2	99,90%
		C	32,9380	0,7582	421,7844	4,0	99,74%
		D	30,0662	0,7340	401,5669	1,1	99,98%
		E	31,8151	0,6726	379,0651	2,6	99,88%
		\bar{X}	31,3482	0,7261	405,4813	2,3	99,89%

TABELA 5.3: Coeficientes das isotermas de sorção para Timborana, ajustadas pelos modelos de Hailwood e Horrobian e Gugenhein, Andersen e de Bôer (GAB) com o respectivo erro médio (E%) e o coeficiente de determinação (R^2) (*continuação*).

Espécie	Temp. (°C)	Repetição	GAB				
			K	C_g	X_m	E%	R^2
Timborana	47	A	0,7464	25,1135	0,0572	4,0	99,76%
		B	0,7859	23,3241	0,0571	2,7	99,91%
		C	0,7947	24,9032	0,0564	6,1	99,57%
		D	0,7820	24,1311	0,0570	4,3	99,77%
		E	0,7025	25,1951	0,0616	5,7	99,31%
		\bar{X}	0,7632	24,4774	0,0578	4,6	99,66%
	65	A	0,6659	21,1090	0,0591	8,4	97,63%
		B	0,7540	25,4504	0,0522	1,4	99,90%
		C	0,7739	27,1562	0,0509	3,4	99,75%
		D	0,7169	23,2545	0,0562	4,2	99,51%
		E	0,6511	24,2363	0,0593	5,7	98,79%
		\bar{X}	0,7041	23,2013	0,0563	4,6	99,12%
	80	A	0,7301	32,3410	0,0436	1,8	99,94%
		B	0,7267	31,9232	0,0445	2,2	99,90%
		C	0,7582	33,9380	0,0427	4,0	99,74%
		D	0,7340	31,0662	0,0448	1,1	99,98%
		E	0,6726	32,8151	0,0475	2,6	99,88%
		\bar{X}	0,7261	32,3482	0,0444	2,3	99,89%

TABELA 5.4: Coeficientes das isotermas de sorção para Andiroba, ajustadas pelos modelos de Hailwood e Horrobin e Gugenhein, Andersen e de Bôer (GAB) com o respectivo erro médio (E%) e o coeficiente de determinação (R^2) (continua).

Espécie	Temp. (°C)	Repetição	Hailwood e Horrobin				
			K1	K2	W	E%	R^2
Andiroba	47	A	21,3168	0,7519	271,9616	6,0	99,46%
		B	22,0506	0,7240	261,0600	8,3	98,92%
		C	20,1549	0,7652	264,5189	6,2	99,43%
		D	21,0625	0,7449	264,8199	7,1	99,14%
		E	22,8252	0,6996	268,2739	6,9	99,12%
		\bar{X}	21,4286	0,7396	267,0948	6,9	99,21%
	65	A	24,4106	0,7395	308,1271	5,3	99,57%
		B	19,5712	0,6389	253,1712	6,9	98,01%
		C	22,7474	0,7298	293,4039	4,0	99,47%
		D	19,2291	0,6610	258,1390	7,6	97,77%
		E	18,8851	0,5943	242,8258	8,9	96,83%
		\bar{X}	20,6498	0,6790	272,2466	6,6	98,33%
	80	A	27,7864	0,7211	359,5374	2,0	99,93%
		B	29,0110	0,7031	348,5555	4,9	99,58%
		C	26,3626	0,6642	326,0657	0,6	99,98%
		D	28,7562	0,6867	331,9217	5,0	99,53%
		E	27,6982	0,6803	319,4984	4,7	99,44%
		\bar{X}	27,8519	0,6970	340,8831	3,4	99,69%

TABELA 5.4: Coeficientes das isotermas de sorção para Andiroba, ajustadas pelos modelos de Hailwood e Horrobian e Gugenhein, Andersen e de Bôer (GAB) com o respectivo erro médio (E%) e o coeficiente de determinação (R^2) (*continuação*).

Espécie	Temp. (°C)	Repetição	GAB				
			K	C_g	X_m	E%	R^2
Andiroba	47	A	0,7519	22,3168	0,0662	6,0	99,46%
		B	0,7240	23,0506	0,0689	8,3	98,92%
		C	0,7652	21,1549	0,0680	6,2	99,43%
		D	0,7449	22,0625	0,0680	7,1	99,14%
		E	0,6996	23,8252	0,0671	6,9	99,12%
		\bar{X}	0,7396	22,4286	0,0674	6,9	99,21%
	65	A	0,7395	25,4106	0,0584	5,3	99,57%
		B	0,6389	20,5712	0,0711	6,9	98,01%
		C	0,7298	23,7474	0,0613	4,0	99,47%
		D	0,6610	20,2291	0,0697	7,6	97,77%
		E	0,5943	19,8851	0,0741	8,9	96,83%
		\bar{X}	0,6790	21,6498	0,0661	6,6	98,33%
	80	A	0,7211	28,7864	0,0501	2,0	99,93%
		B	0,7031	30,0110	0,0516	4,9	99,58%
		C	0,6642	27,3626	0,0552	0,6	99,98%
		D	0,6867	29,7562	0,0542	5,0	99,53%
		E	0,6803	28,6982	0,0563	4,7	99,44%
		\bar{X}	0,6970	28,8519	0,0528	3,4	99,69%

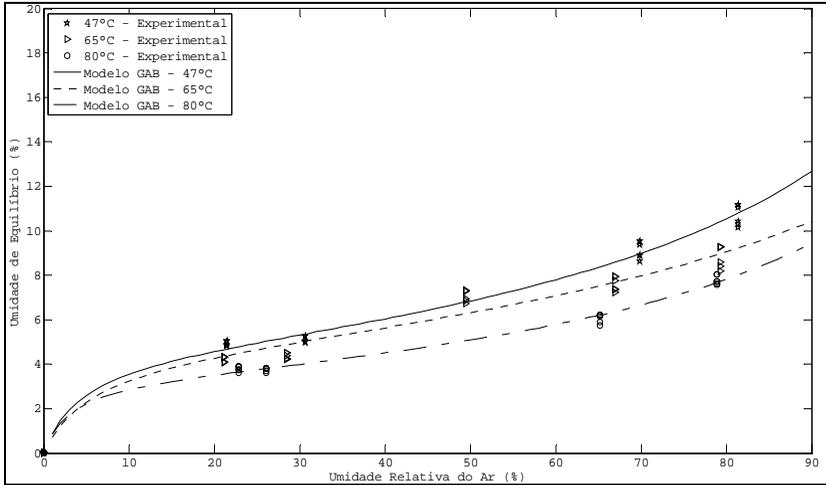


FIGURA 5.3: Isotermas de sorção para muirapiranga, nas temperaturas de 47, 65 e 80 °C.

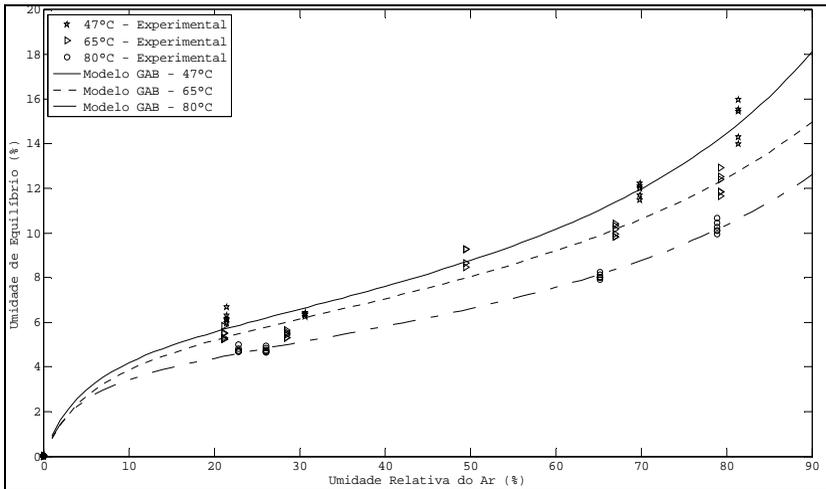


FIGURA 5.4: Isoterma de sorção para timborana, nas temperaturas de 47, 65 e 80 °C.

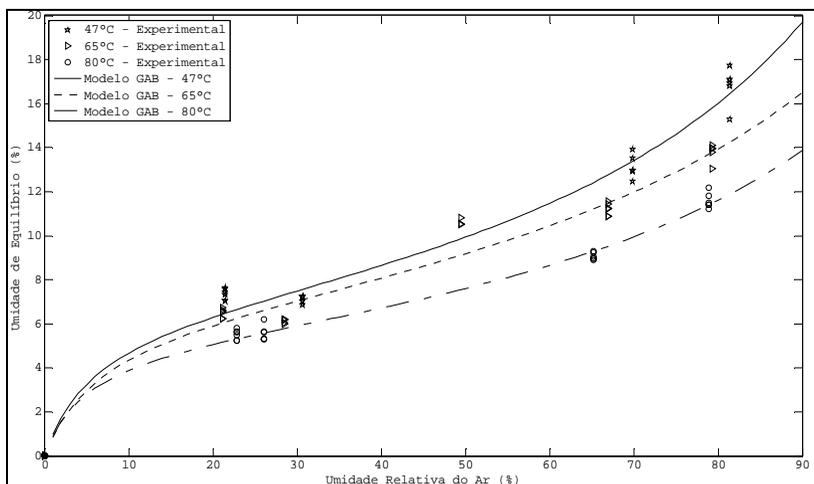


FIGURA 5.5: Isoterma de sorção para andiroba, nas temperaturas de 47, 65 e 80 °C.

O ponto de saturação das fibras, obtido através da extrapolação das isotermas de sorção até a umidade relativa do ar de 100%, pode ser observado na Tabela 5.5.

TABELA 5.5: Ponto de saturação das fibras obtido através da extrapolação das isotermas de sorção, nas temperaturas de 47, 65 e 80 °C.

Espécie	Temperatura (°C)		
	47	65	80
Muirapiranga	15,8	12,2	11,9
Timborana	24,1	18,7	16,0
Andiroba	25,5	20,2	17,2

Os valores obtidos são menores que os normalmente adotados, entre 28 e 30% de umidade na temperatura ambiente, com decréscimo de 0,1%/°C (KEYEY et al., 2000), o que corresponderia a umidade de equilíbrio em torno de 25,3, 23,5 e 22,0% para as temperaturas de 47, 65 e 80 °C, respectivamente. Na temperatura de 47 °C, para timborana e andiroba, os valores obtidos são próximos, porém, devido ao efeito

da temperatura na redução do ponto de saturação das fibras, observado com mais intensidade em timborana e andiroba, ocorre uma redução acentuada nos valores estimados.

Nas Figuras 5.6 a 5.8 são apresentados os teores de umidade em mono e multicamadas, segundo a teoria de Hailwood e Horrobin.

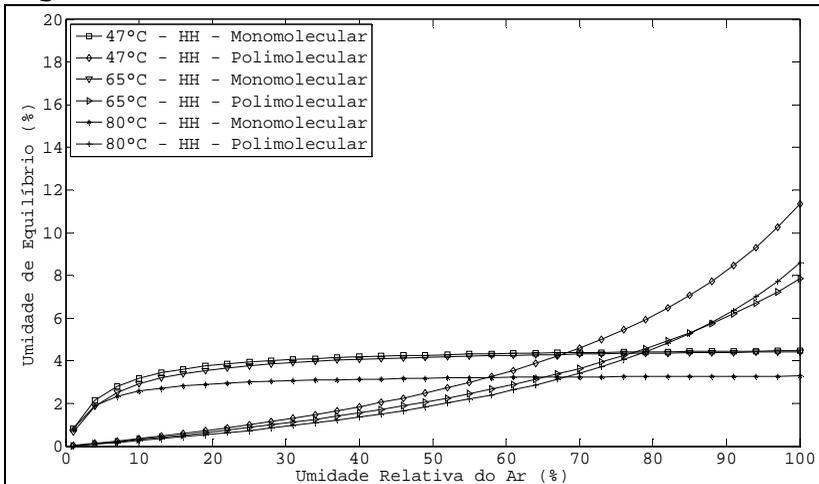


FIGURA 5.6: Adsorção em mono e multicamadas para muirapiranga segundo a teoria de Hailwood e Horrobin e GAB.

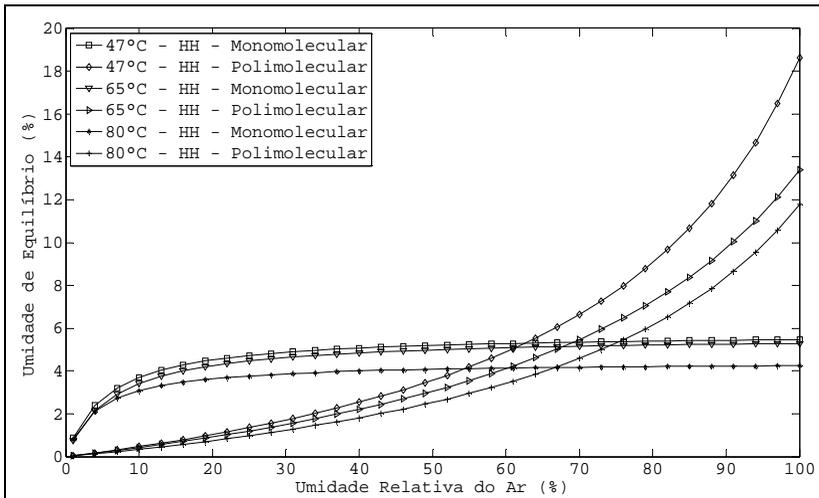


FIGURA 5.7: Adsorção em mono e multicamadas para timborana segundo a teoria de Hailwood e Horrobin e GAB.

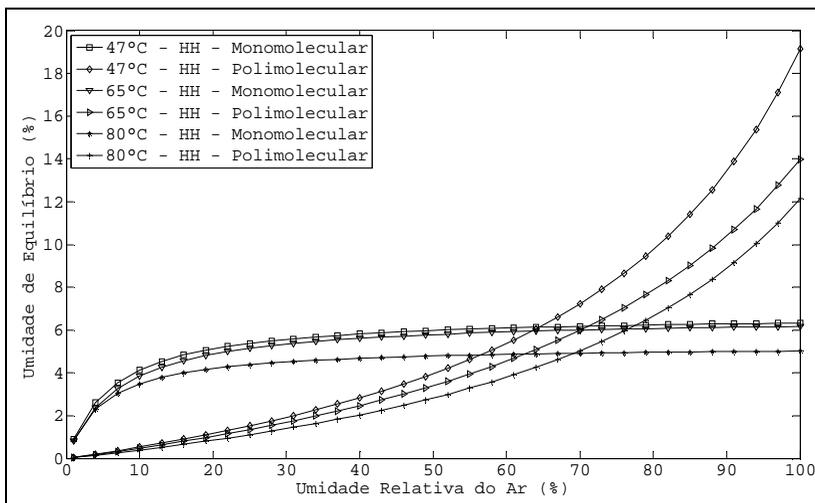


FIGURA 5.8: Adsorção em mono e multicamadas para andiroba segundo a teoria de Hailwood e Horrobin e GAB.

Os teores de umidade monocamada ou monomoleculares, representados pelo coeficiente X_m do modelo GAB e pelo termo M_h do modelo de Hailwood e Horrobin, apresentaram tendência de decréscimo com a temperatura na condição de 80 °C em relação às temperaturas inferiores. Moreira *et al.* (2003) também não encontraram tendência de variação para o teor de umidade em monocamada até a temperatura de 70 °C, que foi a máxima avaliada naquele experimento. A redução no teor de umidade de equilíbrio monomolecular pode estar associada à degradação das hemiceluloses, constituintes da madeira reconhecidas como sensíveis à degradação térmica. Outra possível causa seria a plasticidade das paredes celulares em temperaturas mais altas, que resultaria em

aproximação dos componentes da madeira, formação de pontes de hidrogênio entre estes componentes, tendo como resultado a redução na higroscopicidade.

Os valores de adsorção monomolecular, estimados pelo modelo GAB, foram superiores aos estimados pelo modelo de Hailwood e Horrobin em valores que variam de 0,1 a 0,4%.

A umidade relativa do ar em que a camada monomolecular atingiu 90% do valor final situa-se entre 30 e 40% para timborana e andiroba e entre 20 e 30% para muirapiranga.

A figura 5.9 apresenta, para valores constantes de umidade de equilíbrio, a variação na umidade relativa do ar em função da temperatura. A partir da relação entre o logaritmo neperiano da umidade relativa e o inverso da temperatura foram determinadas as energias de adsorção fazendo uso da equação 4.4.

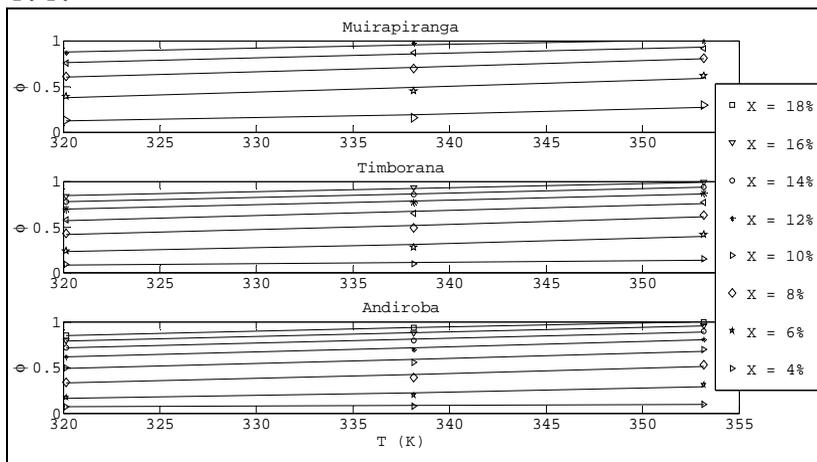


FIGURA 5.9: Relação entre a umidade relativa do ar (ϕ) e a temperatura para diferentes umidades de equilíbrio.

A energia de adsorção em função do teor de umidade em base seca das três espécies é apresentada na Figura 5.10. Nota-se que a

energia de adsorção é crescente quando se compara muirapiranga, timborana e andiroba, tendo como reflexo número crescente de camadas de água adsorvidas na forma polimolecular.

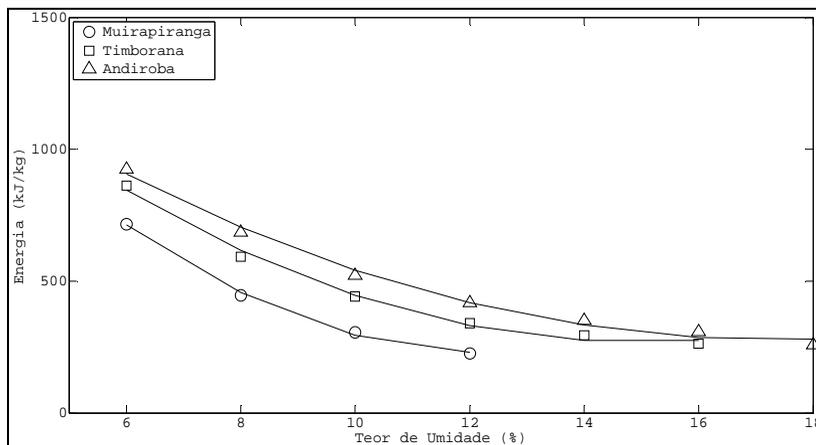


FIGURA 5.10: Energia de adsorção em função do teor de umidade de equilíbrio da madeira.

Um modelo polinomial quadrático da energia de adsorção em função do teor de umidade de equilíbrio foi ajustado por espécie. Os coeficientes estão apresentados na Tabela 5.6.

TABELA 5.6: Coeficientes do modelo de regressão polinomial ajustado para a energia de adsorção (kJ/kg) em função do teor de umidade de equilíbrio (% - base seca).

Espécie	A	B	C
Muirapiranga	2.052,9	-294,9	11,9
Timborana	1.875,3	-214,5	07,2
Andiroba	1.741,9	-168,5	04,8

Os teores de umidade de equilíbrio para as condições experimentais de secagem foram obtidos através da interpolação linear na Figura 5.9 e são apresentados na Tabela 5.7.

TABELA 5.7: Teor de umidade de equilíbrio (% - base seca), por espécie, em função da temperatura e umidade relativa do ar (UR %)

Temperatura (°C)	UR (%)	Muirapiranga	Timborana	Andiroba
50	60	7,8	10,2	11,6
50	20	4,8	5,6	6,5
70	60	6,8	8,7	9,8
70	20	3,8	5,0	7,6

Os valores de energia de adsorção são similares aos apresentados por Keey *et al.*(2000) para andiroba e para timborana, mas inferiores para muirapiranga.

A higroscopicidade distinta é relacionada ao número de sítios de adsorção acessíveis e à energia de adsorção destes sítios.

As isotermas de sorção distintas para as três espécies comprovam a necessidade de ajustá-las individualmente e de que generalizações podem ocasionar erros na simulação, programação e execução de programas de secagem.

Para converter em concentração de umidade, os valores de teor de umidade de equilíbrio devem ser multiplicados pela respectiva massa específica básica, apresentada no item 5.1.

5.1.4 Coeficiente de difusividade efetiva

Entre as duas formas adotadas para determinar o coeficiente de difusividade efetivo, o chamado método ótimo, em que diferentes coeficientes são aplicados na série infinita truncada no quinto termo, até minimizar a soma de quadrados dos desvios, mostrou-se superior em relação à linearização da solução analítica. Nesta primeira forma pequenos desvios da relação linear entre o logaritmo do teor de umidade adimensional e o tempo foram considerados.

No exemplo apresentado na Figura 5.11, o primeiro quadro refere-se à linearização da relação entre o logaritmo do teor de umidade adimensional e o tempo. No segundo quadro observa-se o ajuste obtido através da Equação 3.70 com cinco termos da série infinita, tanto fazendo uso da difusividade efetiva determinada pelo método ótimo e como pela linearização através do logaritmo do teor de umidade adimensional. No último quadro observam-se os erros relativos aos teores de umidade experimentais considerando as duas formas de determinar a difusividade efetiva. Os erros da forma otimizada de determinação da difusividade efetiva são inferiores em praticamente todo o intervalo de tempo e para a ampla maioria das peças.

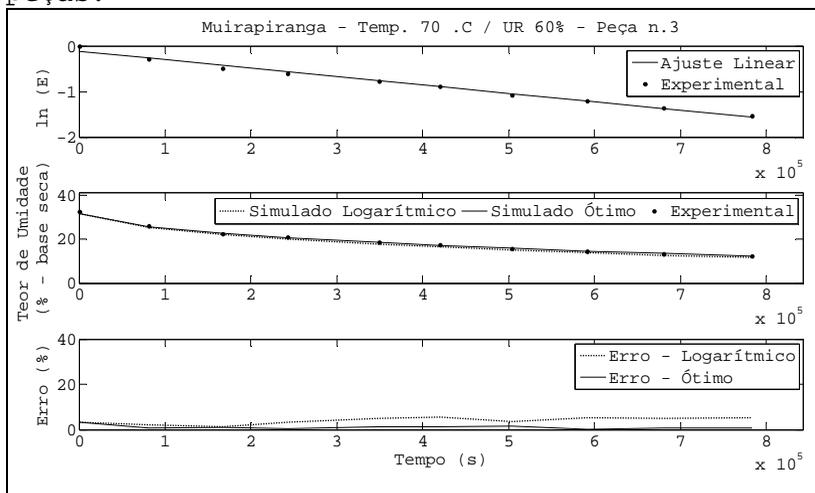


FIGURA 5.11: Determinação da difusividade efetiva através da linearização da solução analítica e da minimização da soma dos quadrados dos desvios.

Na Tabela 5.8 são apresentados os valores de difusividade efetiva por peça, obtidos em cada tratamento, incluindo espécie, temperatura e umidade relativa.

Os valores são da mesma ordem de grandeza dos apresentados na Tabela 3.1.

A natural variabilidade nas propriedades físicas de materiais naturais como a madeira ficou clara através dos coeficientes de variação da difusividade efetiva. Esta variabilidade resulta em diferenças entre peças nas taxas de secagem ao longo do tempo acarretando diferenças no teor de umidade final e tem como consequência a necessidade de uma fase de uniformização ao final do processo.

As difusividades apresentaram correlação de 96% com a massa específica básica, indicando que o aumento da espessura das paredes celulares contribui diretamente para o aumento da resistência ao fluxo de umidade. Essa relação já foi apresentada por Eleotério *et al.* (2006) para as madeiras de marupá, virola, pará-pará e eucalipto.

TABELA 5.8: Difusividade efetiva por peça das diferentes espécies, submetidas à secagem em diferentes temperaturas e umidades relativas do ar (UR - %) (*continua*).

Temp. (°C)	UR (%)	Peça			
		Muirapiranga	Timborana	Andiroba	
50	60	1	6,80E-11	1,99E-10	3,67E-10
		2	7,40E-11	2,39E-10	2,67E-10
		3	8,50E-11	2,32E-10	3,97E-10
		4	1,24E-10	2,43E-10	2,56E-10
		5	8,90E-11	2,61E-10	5,71E-10
		6	7,80E-11	2,02E-10	4,79E-10
		7	1,13E-10		5,86E-10
		8			4,46E-10
		Média	9,01E-11	2,29E-10	4,21E-10
		CV	23,1%	10,6%	29,5%
50	20	1	9,20E-11	2,38E-10	4,36E-10
		2	1,57E-10	4,77E-10	6,21E-10
		3	1,08E-10	1,50E-10	8,12E-10
		4	1,15E-10	1,94E-10	7,11E-10
		5	1,60E-10	2,05E-10	5,65E-10
		6	7,80E-11	1,96E-10	3,77E-10
		7	8,70E-11	2,35E-10	7,02E-10
		8	9,60E-11	3,41E-10	3,57E-10
		9	7,10E-11	3,31E-10	6,03E-10
		10	9,40E-11	2,32E-10	
		Média	10,6E-11	2,60E-10	5,76E-10
CV	28,9%	37,2%	27,4%		

TABELA 5.8: Difusividade efetiva por peça das diferentes espécies, submetidas à secagem em diferentes temperaturas e umidades relativas do ar (UR - %) (continuação).

Temp. (°C)	UR (%)	Peça			
		Muirapiranga	Timborana	Andiroba	
70	60	1	6,90E-11	2,93E-10	7,12E-10
		2	1,53E-10	5,14E-10	8,70E-10
		3	1,05E-10	4,69E-10	2,76E-10
		4	9,20E-11	3,23E-10	8,12E-10
		5	1,08E-10	3,62E-10	4,92E-10
		6	1,11E-10	2,94E-10	4,11E-10
		7	1,16E-10	3,93E-10	6,31E-10
		8	7,70E-11	4,63E-10	5,54E-10
		9	1,03E-10	3,75E-10	4,31E-10
		10	1,35E-10	2,02E-10	5,24E-10
	Média	1,07E-10	3,69E-10	5,71E-10	
	CV	23,3%	25,9%	32,6%	
70	60	1	6,40E-11	3,07E-10	4,17E-10
		2	1,00E-10	4,30E-10	8,77E-10
		3	1,56E-10	3,25E-10	6,36E-10
		4	1,69E-10	3,85E-10	6,44E-10
		5	1,23E-10	4,94E-10	6,67E-10
		6	9,50E-11	2,10E-10	5,82E-10
		7	7,90E-11	2,30E-10	3,31E-10
		8	8,00E-11	5,25E-10	7,15E-10
		9	1,37E-10	3,45E-10	7,54E-10
		10	7,00E-11	1,95E-10	6,00E-10
		11	8,30E-11		7,56E-10
		12			7,93E-10
	Média	1,05E-10	3,45E-10	6,48E-10	
	CV	34,1%	33,4%	23,8%	

TABELA 5.8: Difusividade efetiva por peça das diferentes espécies, submetidas à secagem em diferentes temperaturas e umidades relativas do ar (UR - %) (continuação).

Temp. (°C)	UR (%)	Peça			
		Muirapiranga	Timborana	Andiroba	
70	20	1	1,35E-10	5,53E-10	8,44E-10
		2	9,90E-11	8,61E-10	7,59E-10
		3	8,00E-11	5,65E-10	9,25E-10
		4	1,27E-10	3,57E-10	9,70E-10
		5	7,50E-11	2,51E-10	6,07E-10
		6	1,17E-10	3,23E-10	1,05E-09
		7	2,16E-10	2,60E-10	9,53E-10
		8	6,40E-11	4,38E-10	1,00E-09
		9	1,64E-10	3,51E-10	7,29E-10
		10	1,56E-10	5,87E-10	8,16E-10
		11	1,26E-10	6,36E-10	7,78E-10
		12		3,35E-10	
		Média	1,24E-10	4,60E-10	8,58E-10
		CV	36,0%	39,8%	15,8%

O efeito da temperatura resulta em aumento da difusividade e é evidenciado pela energia de ativação, calculada pela equação 3.42. Os valores calculados para timborana, de 21.872 J/mol, e para andiroba, de 16.231 J/mol, estão próximos aos apresentados por Keey, Langrish e Walker (2000). Já o valor obtido para muirapiranga, de 5.523 J/mol, é consideravelmente menor.

Juntamente com o fator de pré-ativação ou fator de Arrhenius (D_0) é possível estimar a difusividade em temperaturas diversas das aplicadas experimentalmente. Este fator foi de $7.7627 \cdot 10^{-10}$, $8,5255 \cdot 10^{-7}$ e $2,1354 \cdot 10^{-7}$ m²/s, para

muirapiranga, timborana e andiroba, respectivamente.

Os valores de difusividade efetiva foram validados através da aplicação na equação da conservação da espécie química, discretizada pelo Método dos Volumes Finitos. As hipóteses simplificadoras foram as mesmas adotadas na escolha da solução analítica da qual foram obtidos os coeficientes, ou seja, fluxo difusivo unidimensional, propriedades físicas e perfil de concentração inicial constante e concentração na superfície em equilíbrio com o ambiente. As simulações da secagem de algumas peças são apresentadas nas Figuras 5.12 a 5.14 e demonstram a adequação dos coeficientes difusivos. Nestas figuras são apresentadas as curvas de secagem para a concentração média da peça e o gradiente de concentração no momento da retirada da peça do sistema de secagem. Todas as soluções são apresentadas no Apêndice 1.

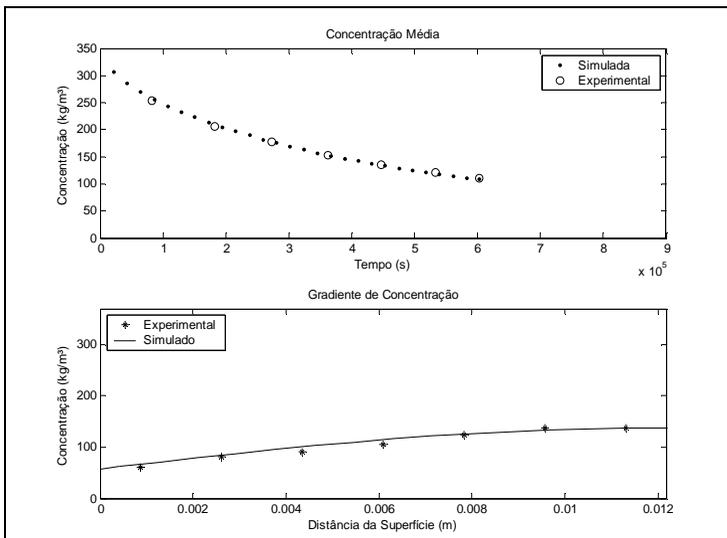


FIGURA 5.12: Exemplos de ajustes das curvas de secagem e do gradiente de umidade para muirapiranga.

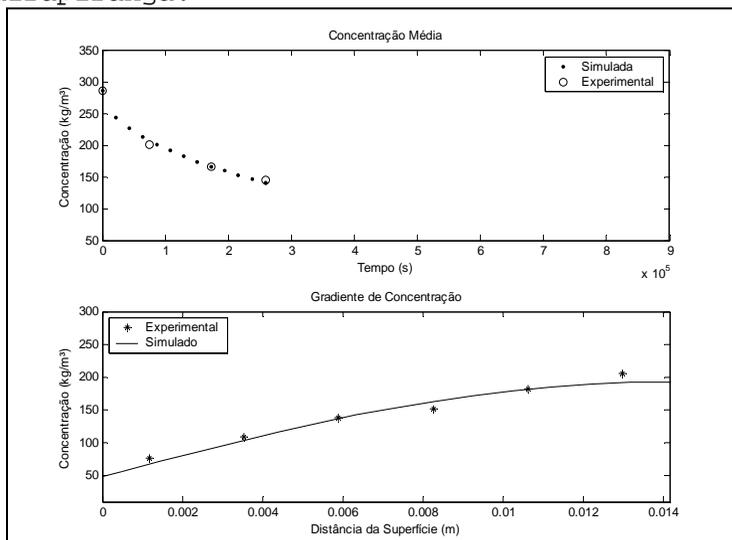


FIGURA 5.13: Exemplos de ajustes das curvas de secagem e do gradiente de umidade para timborana.

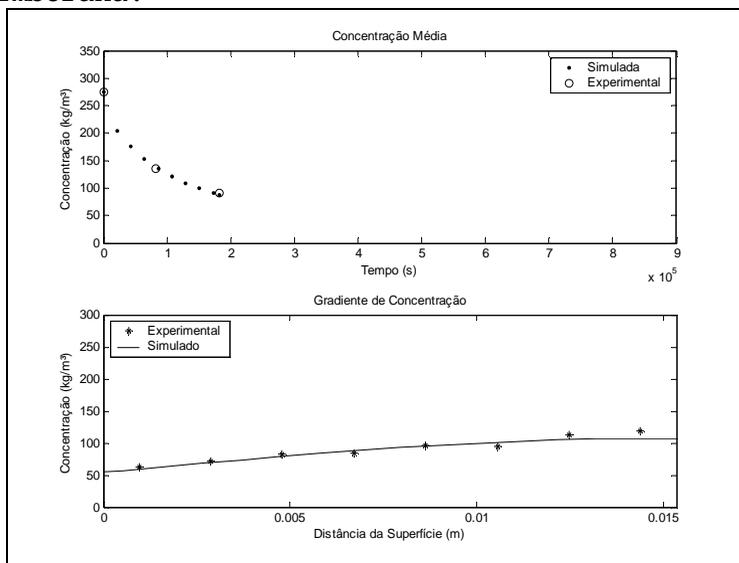


FIGURA 5.14: Exemplos de ajustes das curvas de secagem e do gradiente de umidade para andiroba.

As simulações permitiram reproduzir, para as três espécies, as curvas de dessecamento e os gradientes de umidade, tanto no início como no final do processo.

5.2 PARÂMETROS DE SECAGEM RELACIONADOS AO AMBIENTE

5.2.1 Coeficientes convectivos de transferência de calor e massa

Os coeficientes convectivos de calor e massa foram estimados a partir de relações empíricas definidas nas Equações 3.24 e 3.25. A variáveis utilizadas para estas estimativas são apresentadas na Tabela 5.9.

A madeira empilhada foi considerada um sistema formado por uma série de dutos com seção transversal retangular cuja altura coincidia com a espessura do tabique, de 25 mm, e a largura com a distância entre tabiques, de 400 mm. O diâmetro hidráulico resulta em 0,0471 m.

TABELA 5.9: Número de Reynolds (Re), Schmidt (Sc), Prandtl (Pr), Nusselt (Nu) e coeficiente convectivo de transferência de calor (h_c [$W/(m^2 K)$]), Número de Sherwood (Sh) e coeficiente convectivo de transferência de massa (h_m [m/s]).

Secagem	TBS (°C)	TBU (°C)	Re	Sc	Pr	Nu	h_c	Sh	h_m
1	50	41	9642	0,62	0,75	32,2	19,1	30,2	0,0187
2	50	28	9676	0,62	0,72	31,9	18,9	30,2	0,0187
3 e 4	70	59	8632	0,62	0,83	30,5	19,1	27,6	0,0191

5	70	42	8671	0,62	0,75	29,5	18,5	27,7	0,0192
---	----	----	------	------	------	------	------	------	--------

Em todos os casos considera-se fluxo turbulento segundo o critério de $Re > 8000$. Também se confirma a faixa de aplicação das equações 3.24 e 3.25 para estimativa do número de Sherwood e de Nusselt.

Considerando a difusividade efetiva e a espessura de cada peça constante com a concentração, o Número de Biot mássico (Bi_M) variou de $3,9 \cdot 10^6$ a $5,2 \cdot 10^6$ para muirapiranga, de $1,2 \cdot 10^6$ a $2,3 \cdot 10^6$ para timborana e de $0,7 \cdot 10^6$ a $1,3 \cdot 10^6$ para andiroba. Em todos os casos os valores obtidos indicam que o processo de transferência de massa é controlado pela resistência interna, segundo o valor de referência de $Bi_M > 50$, apresentado por Cresmasco (2002).

Por sua vez, a condutividade térmica varia com a concentração de umidade; dessa forma o menor Número de Biot de calor é encontrado ao início da secagem, quando a condutividade térmica é maior, e decresce à medida que a concentração de umidade diminui. Como a condutividade térmica apresentou pequena diferença entre as espécies e o coeficiente convectivo de transferência de calor resultou em valores semelhantes nas diferentes condições de secagem, os números de Biot de calor (Bi_H) também são similares.

Considerando as diferentes espécies e condições de secagem, os valores calculados situam-se em torno de 1,5 no início e de 2,3 no final do processo. Ao contrário da transferência de massa, a transferência de calor está sujeita à influência em maior grau das condições externas.

Os coeficientes convectivos experimentais de transferência de massa foram determinados a partir da concentração de umidade na lâmina mais externa no momento da retirada da peça. O

fluxo de massa considerado foi o obtido entre a pesagem anterior e aquela no momento da retirada da peça do sistema de secagem.

Os coeficientes convectivos experimentais de transferência de massa adotando como força motriz a diferença no teor de umidade em percentagem são apresentados na Tabela 5.11. Os coeficientes tendo a pressão parcial de vapor como força motriz são apresentados na Tabela 5.11.

Nos casos de coeficientes infinitos, o teor de umidade superficial era inferior ao de equilíbrio, já que este último representa um valor médio para a espécie. Algumas peças apresentaram teor de umidade superficial abaixo deste valor médio como pode ser observado para as três espécies nas Figuras 5.15 a 5.19.

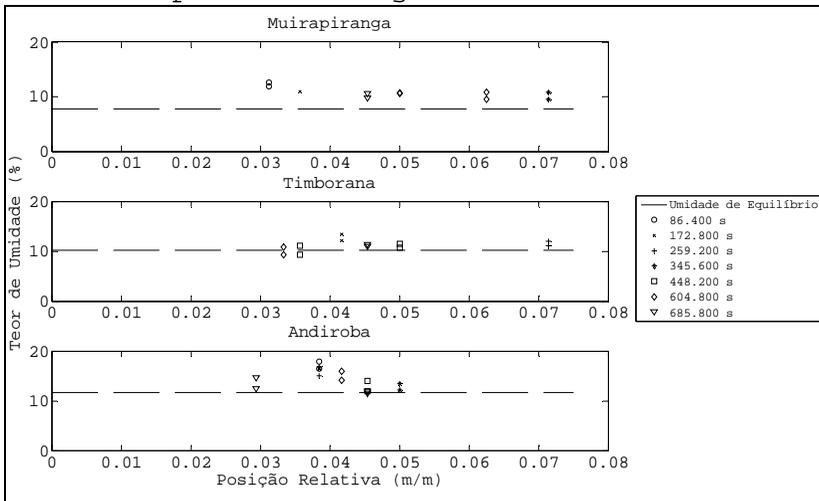


FIGURA 5.15: Teor de Umidade das lâminas mais externas após diferentes tempos de secagem a 50 °C e 60% de umidade relativa do ar - Carga 1.

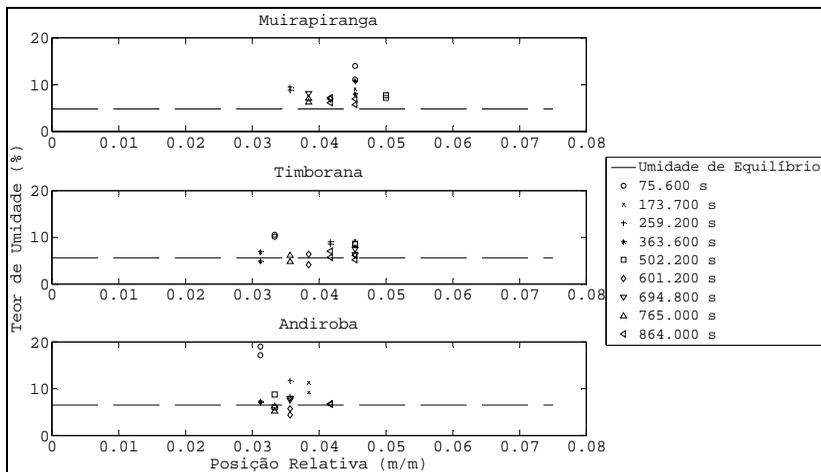


FIGURA 5.16: Teor de Umidade das lâminas mais externas após diferentes tempos de secagem a 50 °C e 20% de umidade relativa do ar - Carga 2.

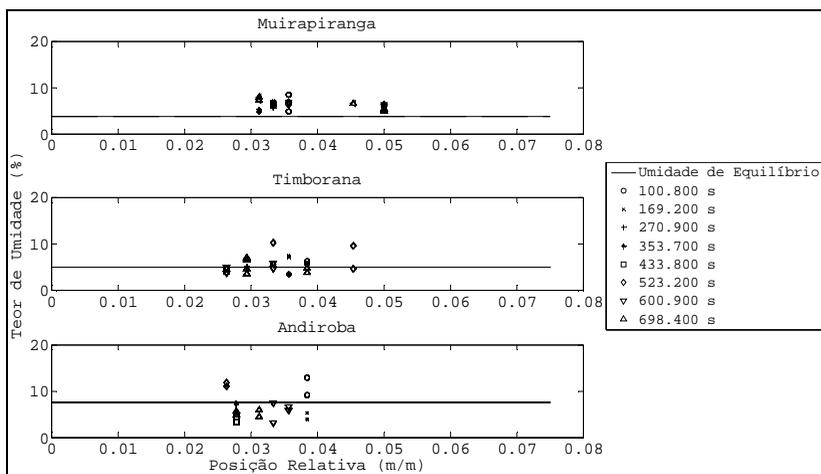


FIGURA 5.17: Teor de Umidade das lâminas mais externas após diferentes tempos de secagem a 70 °C e 60% de umidade relativa do ar - Carga 3.

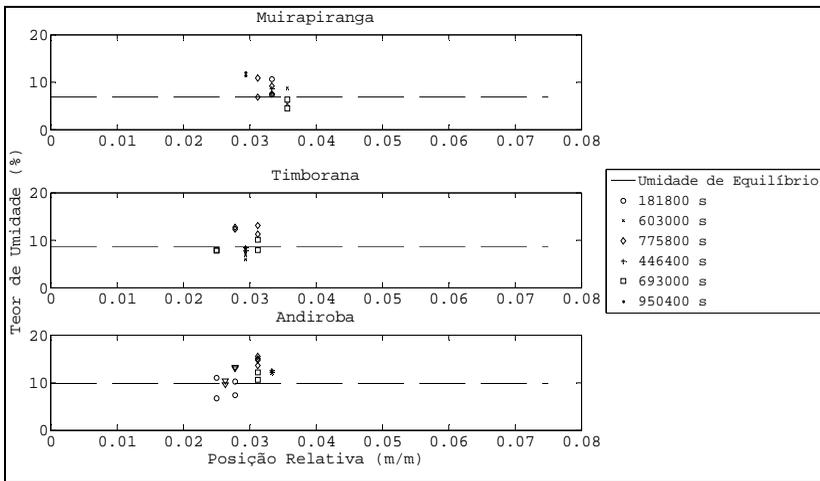


FIGURA 5.18: Teor de Umidade das lâminas mais externas após diferentes tempos de secagem a 70 °C e 60% de umidade relativa do ar – Carga 4.

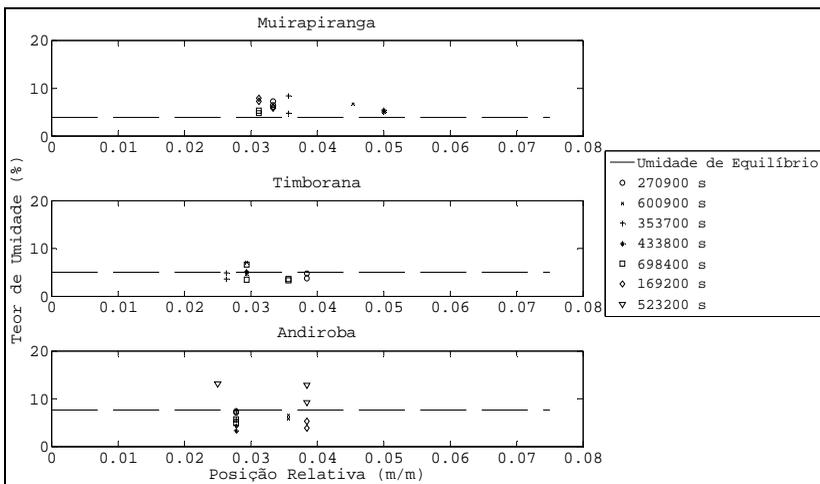


FIGURA 5.19: Teor de Umidade das lâminas mais externas após diferentes tempos de secagem a 70 °C e 20% de umidade relativa do ar – Carga 5.

Nos outros casos, utilizando a concentração de vapor de água como força motriz, os coeficientes convectivos observados

experimentalmente são inferiores aos estimados através das relações empíricas.

Há dois motivos para tal fato, um refere-se ao momento de determinação dos fluxos de umidade, já nas faixas de fluxo decrescente. Não foram observadas faixas de fluxo constante, o que indica que há, desde o início da secagem, influência da resistência interna no processo de transferência de massa.

Outro motivo se refere à espessura das lâminas para determinação da umidade superficial. Lâminas com espessura de um a dois milímetros incluíam parte do gradiente interno de umidade, apresentando teor de umidade acima da umidade na superfície. O fluxo reduzido e a umidade superficial determinada acima da umidade de equilíbrio resultam em um coeficiente convectivo de transferência de massa irreal, muito abaixo do estimado. Há necessidade de um método para determinação do teor de umidade da superfície, sem influência da umidade interna.

Rozas (2004) comparou os coeficientes convectivos de transferência de calor e massa, obtidos experimentalmente durante a secagem convencional de *Pinus*, com os obtidos por diversas relações empíricas e determinou que as equações 3.24 e 3.25 foram as que mais se aproximaram dos valores experimentais. Para esta espécie, na condição de umidade próxima da saturação, pode ocorrer uma pequena faixa de secagem com fluxo de massa constante.

Nas simulações dos programas de secagem foram utilizados os coeficientes convectivos de transferência de massa estimados pelas relações empíricas apresentadas nas equações 3.24 e 3.25.

TABELA 5.10: Coeficientes convectivos experimentais de transferência de massa. (continua)

Tratamento	peça	Força Motriz = Teor de umidade		
		Muirapiranga	Timborana	Andiroba
50 °C / 60% UR	1	0,6E-06	4,0E-06	10,0E-06
	2	0,5E-06	∞	1,8E-06
	3	1,3E-06	2,4E-06	0,1E-06
	4	0,9E-06	∞	1,1E-06
	5	2,0E-06	2,6E-06	2,9E-06
	6	0,5E-06	1,3E-06	4,2E-06
	7	0,7E-06		2,8E-06
	8			0,6E-06
50 °C / 20% UR	1	0,5E-06	1,6E-06	0,5E-06
	2	1,8E-06	0,2E-06	2,0E-06
	3	1,0E-06	38,0E-06	∞
	4	0,7E-06	7,2E-06	∞
	5	0,8E-06	0,7E-06	4,7E-06
	6	0,6E-06	∞	0,8E-06
	7	0,4E-06	∞	3,2E-06
	8	0,7E-06	4,8E-06	2,5E-06
	9	0,6E-06	0,5E-06	1,4E-06
	10	0,5E-06	1,2E-06	
70 °C / 60% UR	1	0,7E-06	3,6E-06	5,6E-06
	2	∞	∞	∞
	3	0,7E-06	3,2E-06	0,3E-06
	4	2,8E-06	0,9E-06	∞
	5	1,4E-06	∞	3,7E-06
	6	7,0E-06	∞	1,7E-06
	7	3,3E-06	2,7E-06	∞
	8	2,0E-06	0,6E-06	∞
	9	3,3E-06	∞	1,4E-06
	10	1,9E-06	∞	0,8E-06

TABELA 5.10: Coeficientes convectivos experimentais de transferência de massa. (continuação)

Tratamento	peça	Força Motriz = Teor de umidade		
		Muirapiranga	Timborana	Andiroba
70 °C / 60% UR	1	1,2E-06	0,2E-06	1,2E-06
	2	∞	∞	4,5E-06
	3	6,4E-06	18,0E-06	4,7E-06
	4	0,5E-06	∞	∞
	5	2,3E-06	∞	∞
	6	1,7E-06	∞	0,5E-06
	7	∞	∞	1,9E-06
	8	1,8E-06	∞	∞
	9	7,0E-06	∞	0,2E-06
	10	1,3E-06	0,3E-06	5,8E-06
	11	0,3E-06		∞
	12			∞
70 °C / 20% UR	1	0,6E-06	0,2E-06	∞
	2	0,2E-06	∞	∞
	3	0,3E-06	∞	8,6E-06
	4	3,9E-06	23,0E-06	∞
	5	1,2E-06	∞	∞
	6	1,5E-06	16,0E-06	∞
	7	3,0E-06	0,5E-06	∞
	8	0,5E-06	0,5E-06	∞
	9	0,7E-06	2,3E-06	∞
	10	1,9E-06	17,0E-06	0,2E-06
	11	1,0E-06	∞	∞
	12		4,7E-06	

TABELA 5.10: Coeficientes convectivos experimentais de transferência de massa. (continua)

Tratamento	peça	Força Motriz = Pressão parcial de vapor		
		Muirapiranga	Timborana	Andiroba
50 °C / 60% UR	1	9,1E-05	79,8E-05	215,4E-05
	2	7,5E-05	∞	38,7E-05
	3	20,7E-05	53,9E-05	3,3E-05
	4	13,8E-05	∞	29,2E-05
	5	36,1E-05	49,5E-05	76,6E-05
	6	7,8E-05	26,1E-05	114,4E-05
	7	10,3E-05		59,0E-05
	8			14,4E-05
50 °C / 20% UR	1	5,2E-05	19,4E-05	6,6E-05
	2	24,8E-05	2,9E-05	28,8E-05
	3	10,5E-05	568,5E-05	∞
	4	6,5E-05	90,0E-05	∞
	5	6,7E-05	8,2E-05	68,8E-05
	6	6,8E-05	∞	12,0E-05
	7	4,2E-05	∞	45,0E-05
	8	5,9E-05	65,3E-05	51,8E-05
	9	5,4E-05	6,5E-05	19,5E-05
	10	4,5E-05	14,4E-05	
70 °C / 60% UR	1	5,37E-05	30,5	42,5E-05
	2	∞	∞	∞
	3	3,53E-05	26,4E-05	2,4E-05
	4	12,1E-05	6,1E-05	∞
	5	7,01E-05	∞	31,4E-05
	6	29,6E-05	∞	14,4E-05
	7	14,6E-05	18,4E-05	∞
	8	9,1E-05	4,0E-05	∞
	9	14,1E-05	∞	10,6E-05
	10	16,1E-05	∞	5,7E-05

TABELA 5.10: Coeficientes convectivos experimentais de transferência de massa. (continuação)

Tratamento	peça	Força Motriz = Pressão parcial de vapor		
		Muirapiranga	Timborana	Andiroba
70 °C / 60% UR	1	5,8E-05	1,5E-05	10,4E-05
	2	∞	∞	33,3E-05
	3	27,4 E-05	114,8E-05	30,4E-05
	4	2,7E-05	∞	∞
	5	11,7E-05	∞	∞
	6	8,1E-05	∞	3,2E-05
	7	∞	∞	14,8E-05
	8	8,7E-05	∞	∞
	9	33,6E-05	∞	1,4E-05
	10	5,9E-05	2,7E-05	53,1E-05
	11	1,8E-05		∞
	12			∞
70 °C / 20% UR	1	1,8E-05	0,7E-05	∞
	2	0,8E-05	∞	∞
	3	1,0E-05	∞	53,3E-05
	4	12,8E-05	107,0E-05	∞
	5	4,0E-05	∞	∞
	6	4,9E-05	61,2E-05	∞
	7	9,7E-05	2,1E-05	∞
	8	1,7E-05	2,2E-05	∞
	9	2,2E-05	10,5E-05	∞
	10	6,5E-05	77,2E-05	1,6E-05
	11	3,1E-05	∞	∞
	12		22,5E-05	

6 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MODELO

6.1 SIMULAÇÃO DE PROGRAMAS DE SECAGEM

6.1.1 Simulação de programas de secagem para muirapiranga

Os dois programas de secagem aplicados para muirapiranga apresentaram desempenho similar. Na Tabela 6.1 são apresentados os tempos de secagem por fase e a taxa média de remoção de umidade.

TABELA 6.1: Tempo e taxas médias de secagem obtidos através dos programas de secagem sugeridos por CIRAD e por FPL para muirapiranga, sendo X = umidade da madeira (%), C = concentração (kg/m^3), t = tempo de secagem (s) e Ts = taxa de secagem ($\text{kg/m}^3 \text{ s}$)

Espécie	Programa	X	C	t	Ts
Muirapiranga	CIRAD	35,1-30	318-272	44.400	1,04E-03
		30-20	272-181	328.200	2,76E-04
		20-10	181-91	1.108.200	8,18E-05
	FPL	35,1-30	318-272	50.400	9,18E-04
		30-25	272-227	126.000	3,60E-04
		25-20	227-181	232.800	1,95E-04
		20-15	181-136	307.200	1,48E-04
		15 -10	136-91	550.800	8,23E-05

Ambos os programas de secagem resultaram em taxas decrescentes de secagem.

Na Figura 6.1 são apresentados os teores de umidade médios, temperatura e potencial de secagem, que é a relação entre umidade da madeira e umidade de equilíbrio.

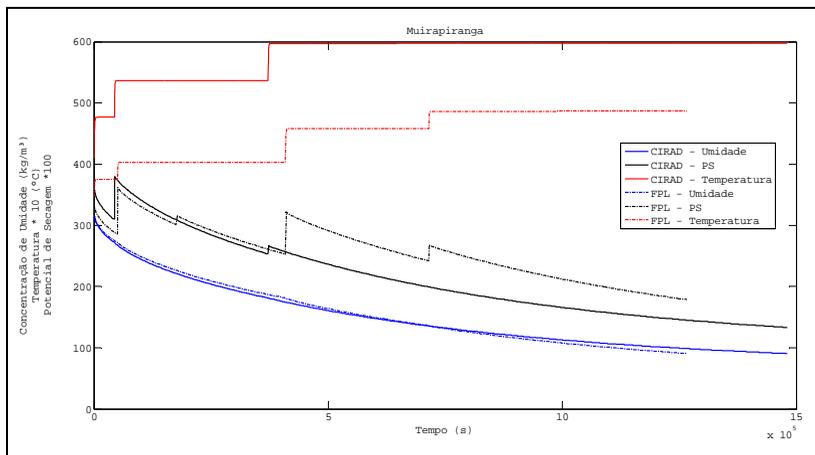


FIGURA 6.1: Concentração de umidade, potencial de secagem e temperatura dos programas de secagem simulados para muirapiranga.

Os programas simulados tiveram comportamento similar, explicado pelo potencial de secagem bastante próximo. Além disso, a difusividade efetiva de muirapiranga apresentou uma dependência com a temperatura menor que as demais espécies analisadas. Dessa forma, não houve ganhos consideráveis pela temperatura mais elevada prescrita pelo programa sugerido por CIRAD (2009).

As Figuras 6.2 a 6.5 apresentam os perfis de temperatura e concentração de umidade 1200 s após o início da secagem, 600 s após cada mudança de fase dentro do programa de secagem proposto por CIRAD (2009) e ao final do processo, quando o teor de umidade médio é de 10%.

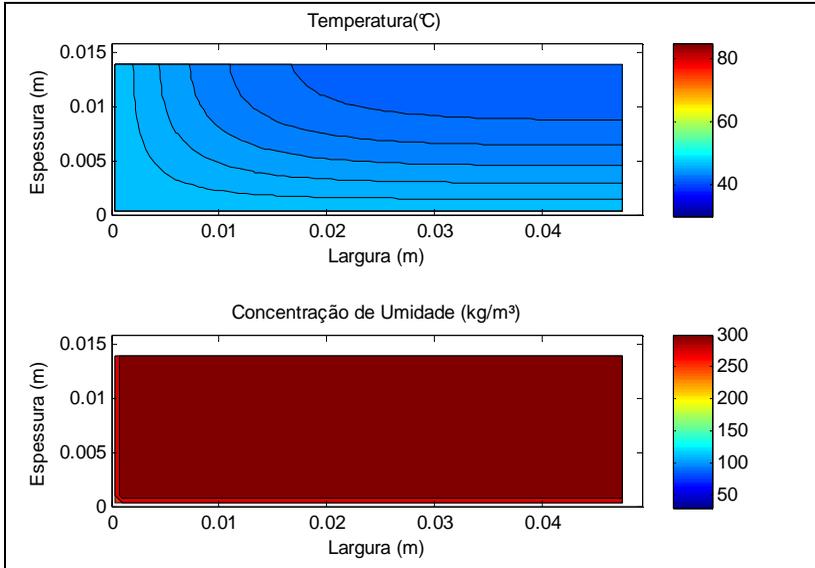


FIGURA 6.2: Perfis de temperatura e concentração de umidade após 1200 s do início da secagem.

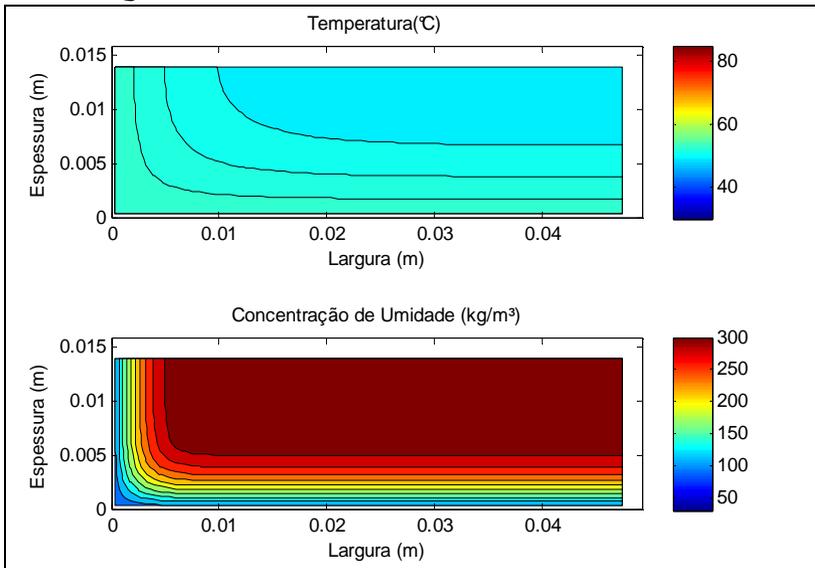


FIGURA 6.3: Perfis de temperatura e concentração de umidade após 600 s da primeira mudança das condições de secagem.

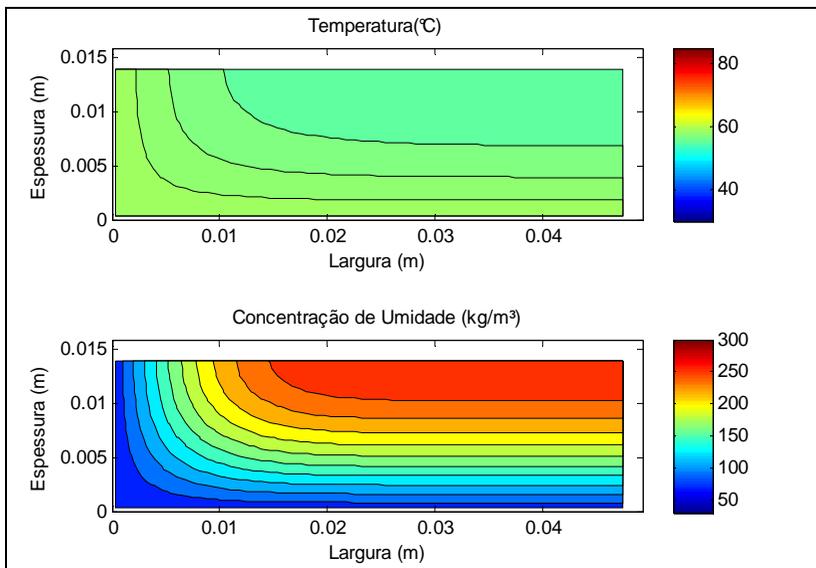


FIGURA 6.4: Perfis de temperatura e concentração de umidade após 600 s da segunda mudança das condições de secagem.

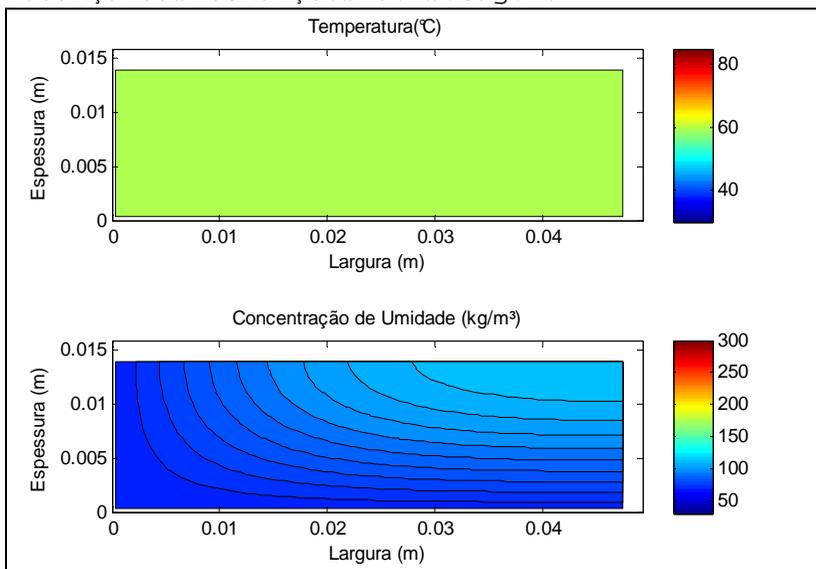


FIGURA 6.5: Perfis de temperatura e concentração de umidade ao final do processo de secagem.

Na Figura 6.2, o perfil de temperatura já demonstra o aquecimento da madeira enquanto o perfil de concentração de umidade apresenta alteração apenas muito próxima à superfície.

Na Figuras 6.3 e 6.4, o perfil de concentração de umidade apresenta gradientes acentuados. O gradiente de temperatura é eliminado rapidamente e só é visível nestas figuras pela mudança das condições externas.

Na Figura 6.5 observa-se que o perfil de temperatura é constante e permanece um gradiente de concentração de umidade constante quando o teor de umidade médio da peça atinge o valor desejado.

As Figuras 6.6 a 6.11 apresentam os perfis de temperatura e concentração de umidade 1200 s após o início da secagem, 600 s após cada mudança de fase dentro do programa de secagem proposto por Forest Products Laboratory (2009) e ao final do processo, quando o teor de umidade médio é de 10%.

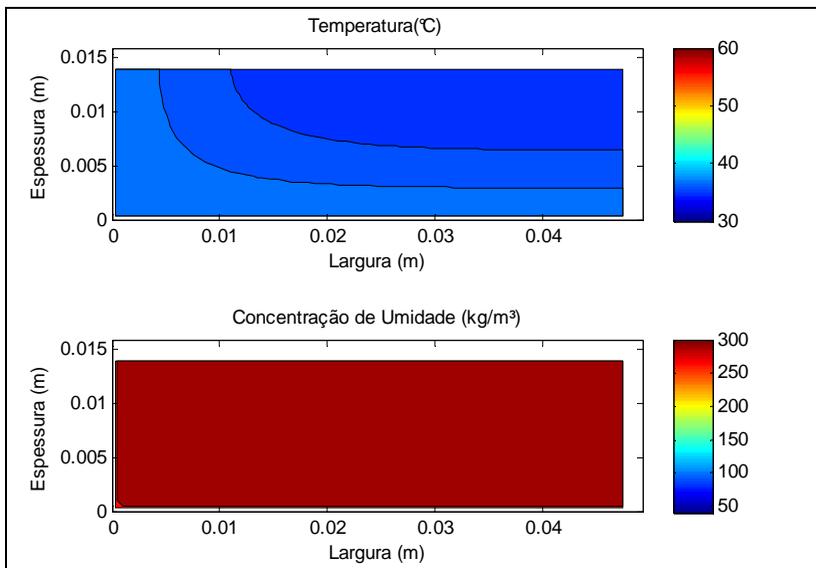


FIGURA 6.6: Perfis de temperatura e concentração de umidade após 1200 s do início da secagem.

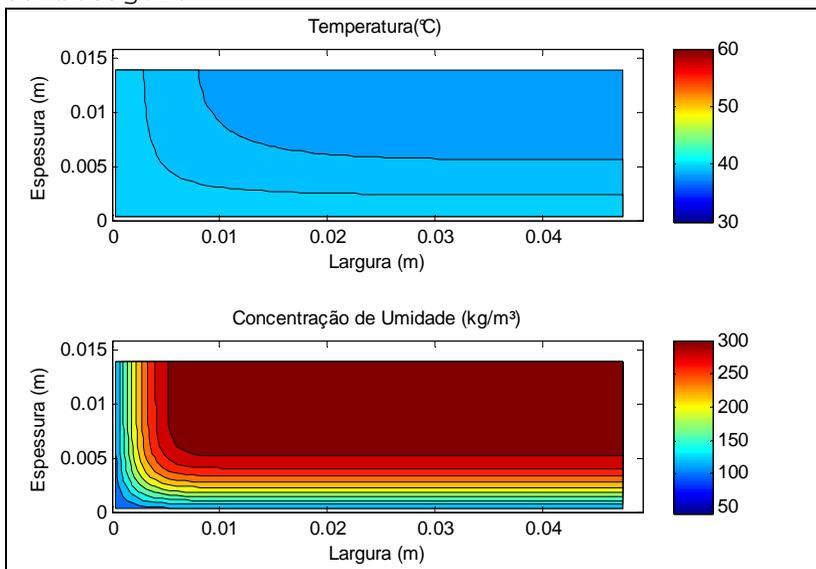


FIGURA 6.7: Perfis de temperatura e concentração de umidade após 600 s da primeira mudança das condições de secagem.

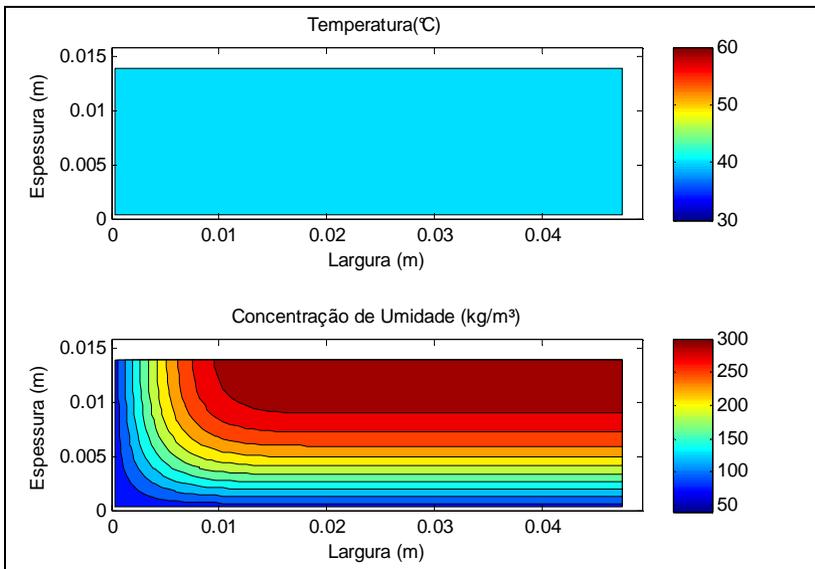


FIGURA 6.8: Perfis de temperatura e concentração de umidade após 600 s da segunda mudança das condições de secagem.

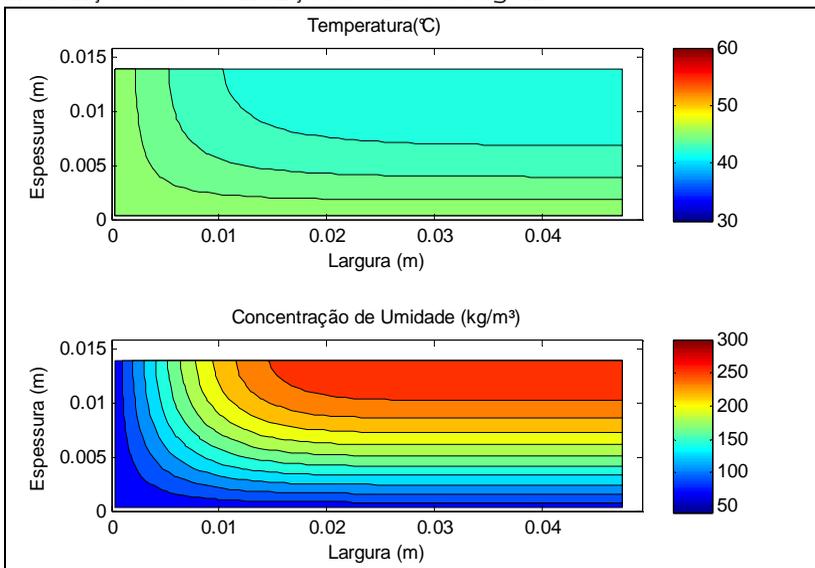


FIGURA 6.9: Perfis de temperatura e concentração de umidade após 600 s da terceira mudança das condições de secagem.

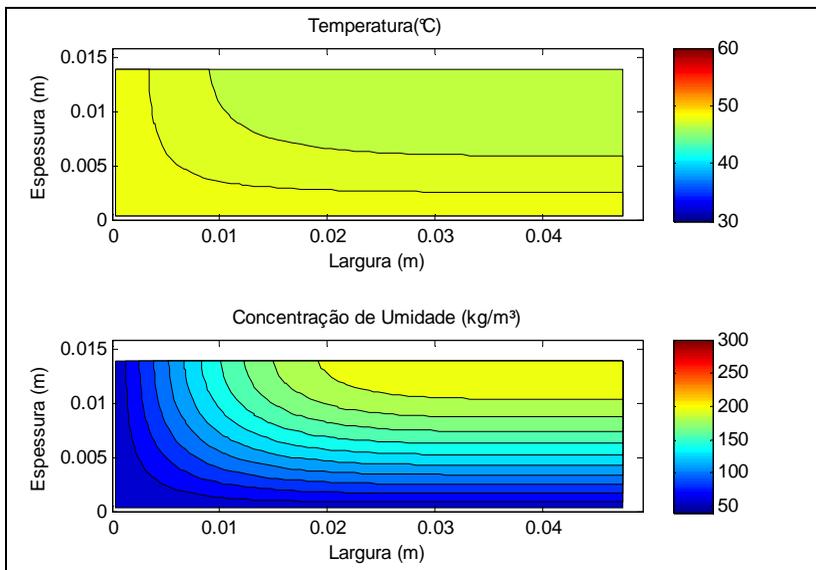


FIGURA 6.10: Perfis de temperatura e concentração de umidade após 600 s da quarta mudança das condições de secagem.

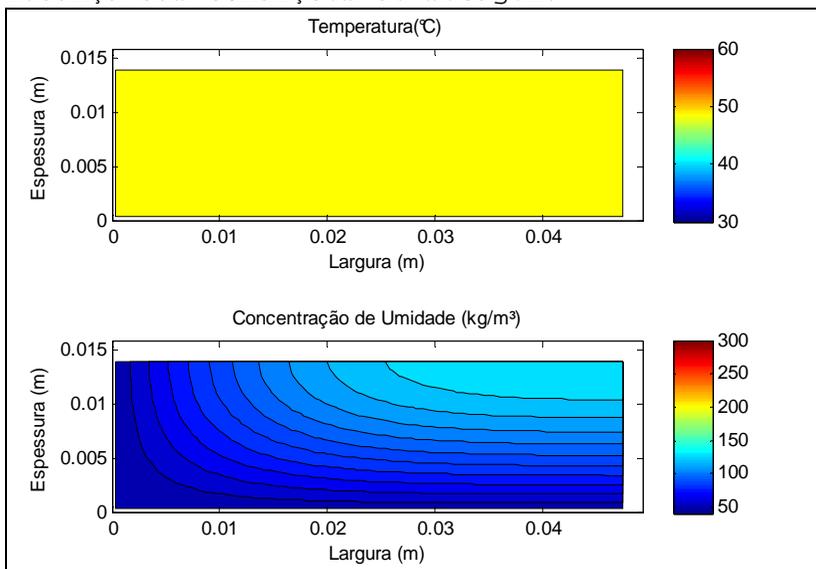


FIGURA 6.11: Perfis de temperatura e concentração de umidade ao final do processo de secagem.

Para a Figura 6.6, aplicam-se os mesmos comentários da Figura 6.2. Para as Figuras 6.7, 6.9 e 6.10 aplicam-se os mesmos comentários relativos às Figuras 6.3 e 6.4 e para a Figura 6.11, os mesmos comentários relativos à Figura 6.5.

Já em relação à Figura 6.8, houve mudança da umidade de equilíbrio e não da temperatura, o que explica o perfil uniforme de temperatura da peça.

6.1.2 Simulação de programas de secagem para timborana

Para timborana os dois programas simulados resultaram em tempos de secagem distintos. Na Tabela 6.2 são apresentados os tempos de secagem por fase e a taxa média de remoção de umidade.

TABELA 6.2: Tempo e taxas médias de secagem para programas de secagem sugeridos por CIRAD e por FPL para timborana, sendo X = umidade da madeira (%), C = concentração (kg/m^3), t = tempo de secagem (s) e T_s = taxa de secagem ($\text{kg}/\text{m}^3 \text{ s}$)

Espécie	Programa	X	C	t	T_s
Timborana	CIRAD	33,5-30	251-225	10.800	2,43E-03
		30-12	225-90	670.200	2,01E-04
	FPL	33,5-30	251-225	16.800	1,56E-03
		30-25	225-187	53.400	7,01E-04
		25-20	187-150	48.600	7,70E-04
		20-15	150-112	96.000	3,90E-04
		15-10	112-75	125.400	2,98E-04

Na Figura 6.12 são apresentados os teores de umidade médios, temperatura e potencial de secagem, que é a relação entre umidade da madeira e umidade de equilíbrio, obtidos durante a simulação dos programas de secagem recomendados para timborana.

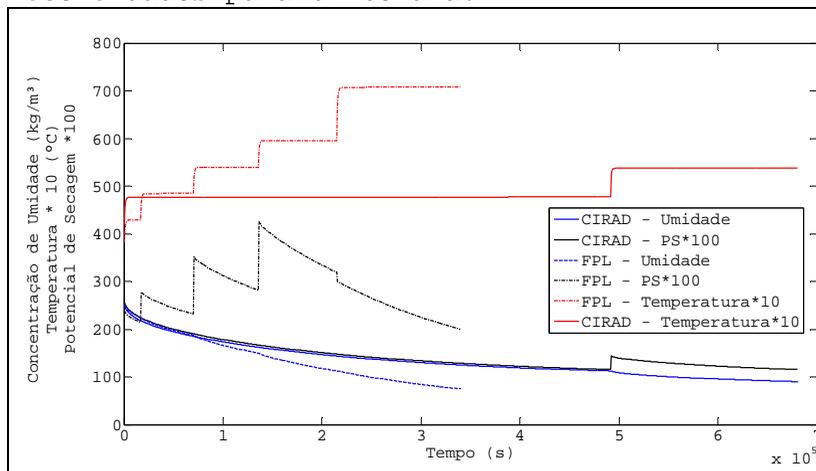


FIGURA 6.12: Concentração de umidade, potencial de secagem e temperatura dos programas de secagem simulados para timborana.

O programa sugerido por CIRAD (2009) apresenta potenciais de secagem baixos, menores que os obtidos na simulação do programa de secagem sugerido por Forest Products Laboratory. Esse fato limitou a secagem a um teor de umidade final de 12% ou 90 kg/m³.

Temperaturas superiores do programa sugerido por Forest Products Laboratory (2009) e a dependência da difusividade efetiva com a temperatura também contribuíram para que o teor de umidade final fosse obtido na metade do tempo.

As Figuras 6.13 a 6.15 apresentam os perfis de temperatura e concentração de umidade 1200 s obtidos após o início da secagem, 600 s após a mudança de fase dentro do programa de secagem

proposto por CIRAD (2009) e ao final do processo, quando o teor de umidade médio é de 12%.

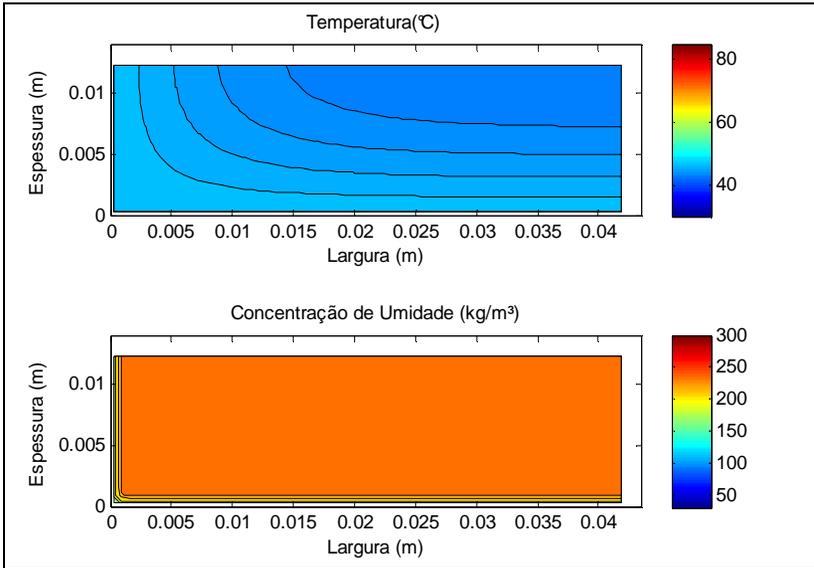


FIGURA 6.13: Perfis de temperatura e concentração de umidade após 1200 s do início da secagem.

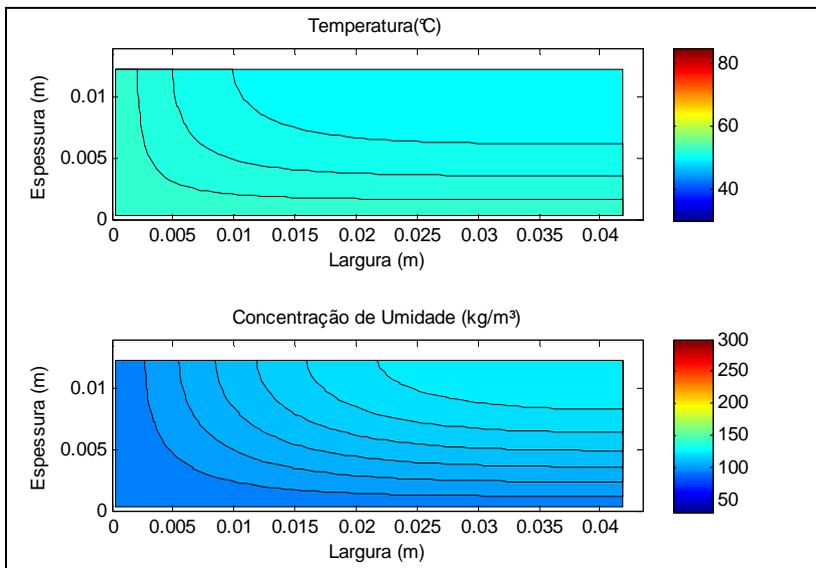


FIGURA 6.14: Perfis de temperatura e concentração de umidade após 600 s a primeira mudança das condições de secagem.

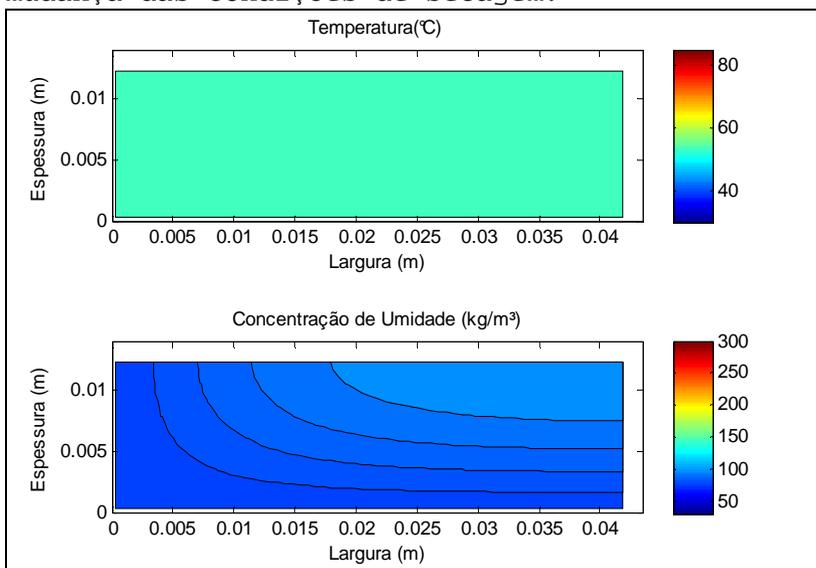


FIGURA 6.15: Perfis de temperatura e concentração de umidade ao final do processo de secagem.

As Figuras 6.16 a 6.21 apresentam os perfis de temperatura e concentração de umidade obtidos 1200 s após o início da secagem, 600 s após cada mudança de fase dentro do programa de secagem proposto por Forest Products Laboratory (2009) e ao final do processo, quando o teor de umidade médio é de 10%.

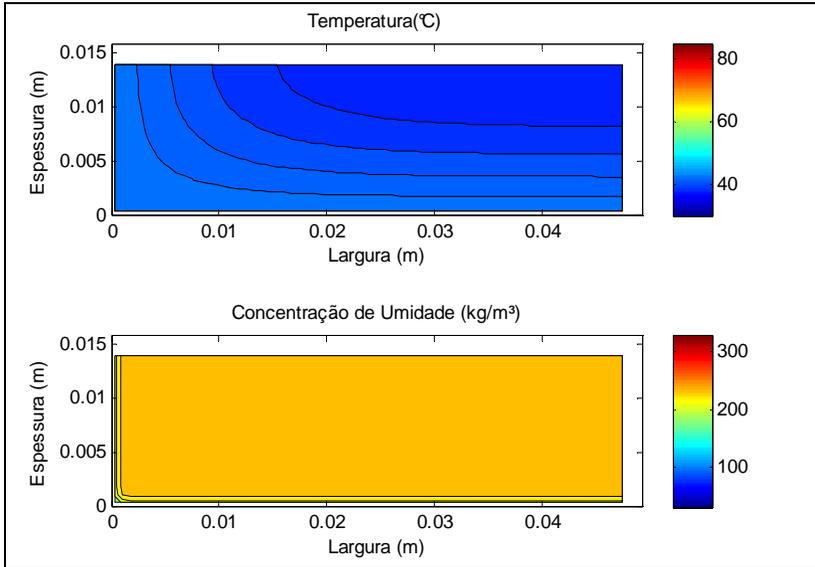


FIGURA 6.16: Perfis de temperatura e concentração de umidade após 1200 s do início da secagem.

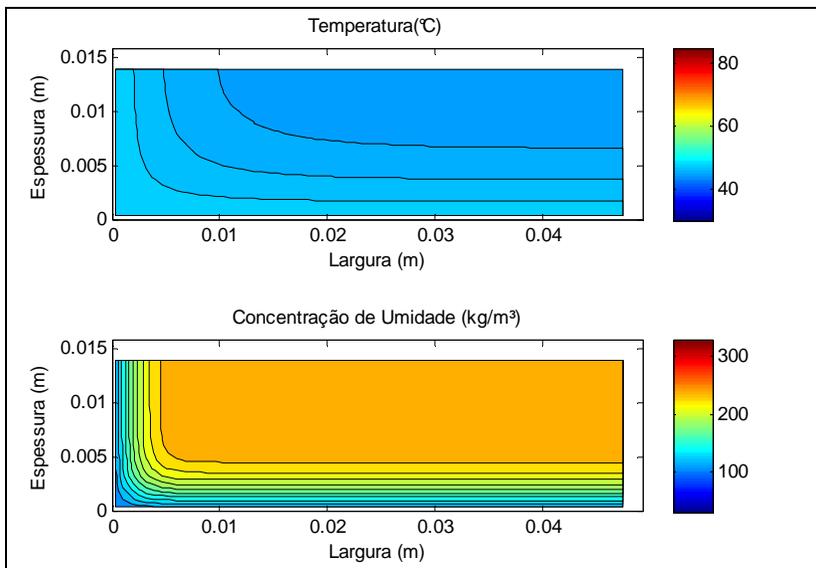


FIGURA 6.17: Perfis de temperatura e concentração de umidade 600 s após a primeira mudança das condições de secagem.

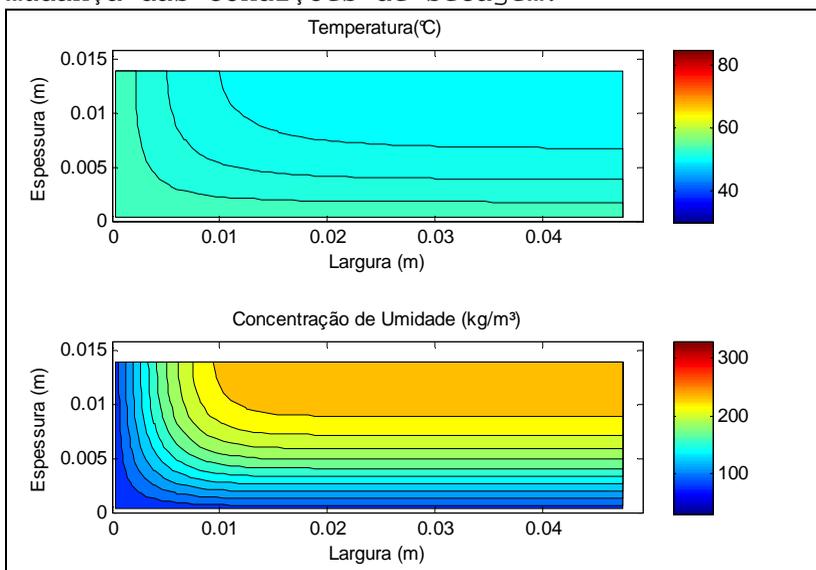


FIGURA 6.18: Perfis de temperatura e concentração de umidade 600 s após a segunda mudança das condições de secagem.

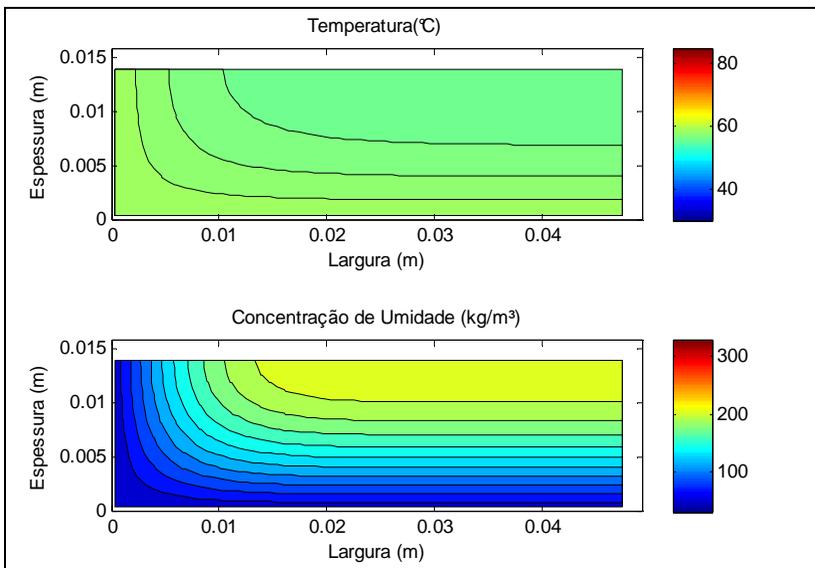


FIGURA 6.19: Perfis de temperatura e concentração de umidade 600 s após a terceira mudança das condições de secagem.

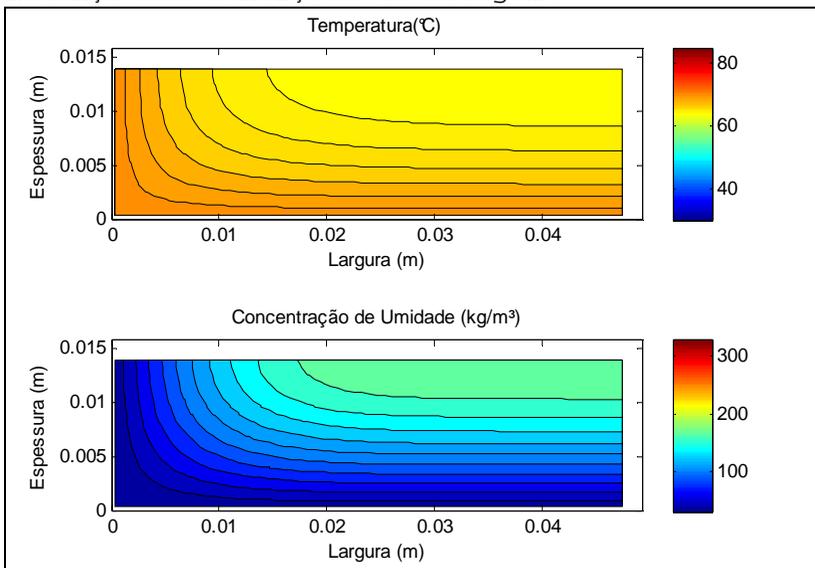


FIGURA 6.20: Perfis de temperatura e concentração de umidade 600 s após a quarta mudança das condições de secagem.

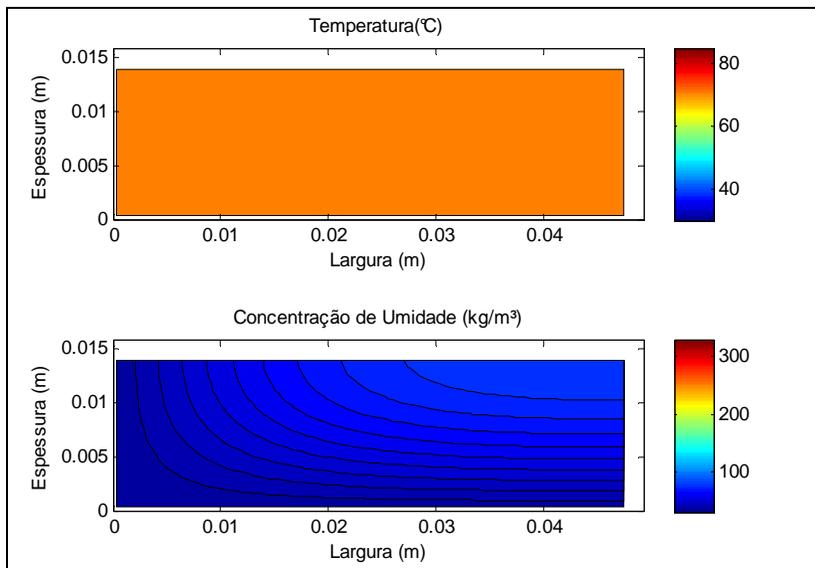


FIGURA 6.21: Perfis de temperatura e concentração de umidade ao final do processo de secagem.

Comparando-se os perfis de concentração de umidade apresentados nas Figuras 6.15 e 6.21, observa-se que o potencial de secagem reduzido do programa proposto por CIRAD em relação ao programa proposto por Forest Products Laboratory resulta em gradientes mais suaves.

6.1.3 Simulação de programas de secagem para andiroba

Para andiroba os dois programas simulados resultaram em tempos de secagem distintos. Na Tabela 6.3 são apresentados os tempos de secagem por fase e a taxa média de remoção de umidade

TABELA 6.3: Tempo e taxas médias de secagem para programas de secagem sugeridos por CIRAD e por FPL para andiroba, sendo X = umidade da madeira (%), C = concentração (kg/m^3), t = tempo de secagem (s) e Ts = taxa de secagem ($\text{kg/m}^3 \text{ s}$)

Espécie	Programa	X	C	t	Ts
Andiroba	CIRAD	55,4 - 30	304-164	193.200	7,21E-04
		30 - 25	164-137	82.200	3,34E-04
		25 - 20	137-110	95.400	2,87E-04
		20 - 16	110-88	222.000	9,88E-05
	FPL	55,4 - 50	304-274	6.000	4,93E-03
		50-40	274-219	37.800	1,45E-03
		40-35	219-192	30.600	8,96E-04
		35-30	192-164	32.400	8,46E-04
		30-25	164-137	31.200	8,79E-04
		25-20	137-110	33.600	8,16E-04
		20-15	110-82	54.600	5,02E-04
		15-10	82-55	73.200	3,75E-04

Da mesma forma que para timborana, o programa sugerido por CIRAD (2009) apresenta potencial de secagem muito baixo quando o teor de umidade é inferior a 20%. A simulação do processo foi encerrada quando o teor de umidade atingiu 16%.

O programa sugerido por Forest Products Laboratory (2009) compensa a queda na taxa de secagem, que seria esperada se as condições de secagem fossem mantidas constantes, com aumento na temperatura e elevação do potencial de secagem. Como pode ser observado na Tabela 6.3, as taxas de secagem permanecem bastante próximas entre os teores de umidade de 40 e 20%.

Na Figura 6.22 pode-se comparar os resultados obtidos pelos programas de secagem, merecendo destaque a elevação do potencial de secagem para o programa sugerido por Forest Products Laboratory (2009).

As Figuras 6.23 a 6.25 apresentam os perfis de temperatura e concentração de umidade obtidos 1200 s após o início da secagem, 600 s após a mudança de fase dentro do programa de secagem proposto por CIRAD (2009) e ao final do processo, quando o teor de umidade médio é de 16%.

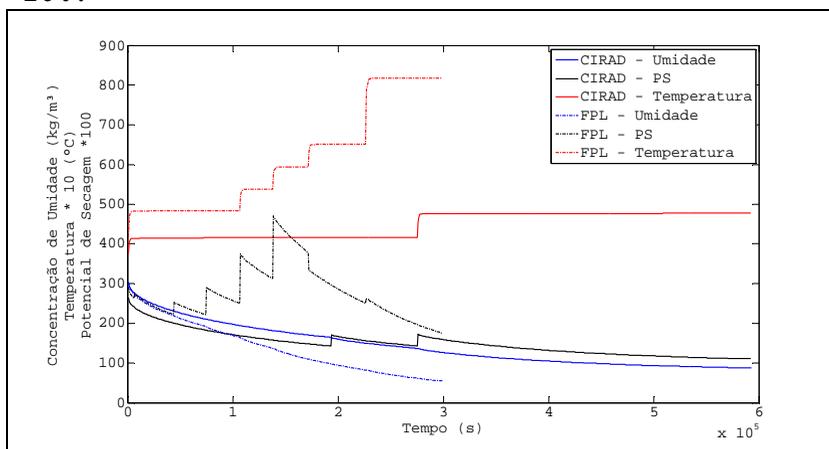


FIGURA 6.22: Concentração de umidade, potencial de secagem e temperatura dos programas de secagem simulados para andiroba.

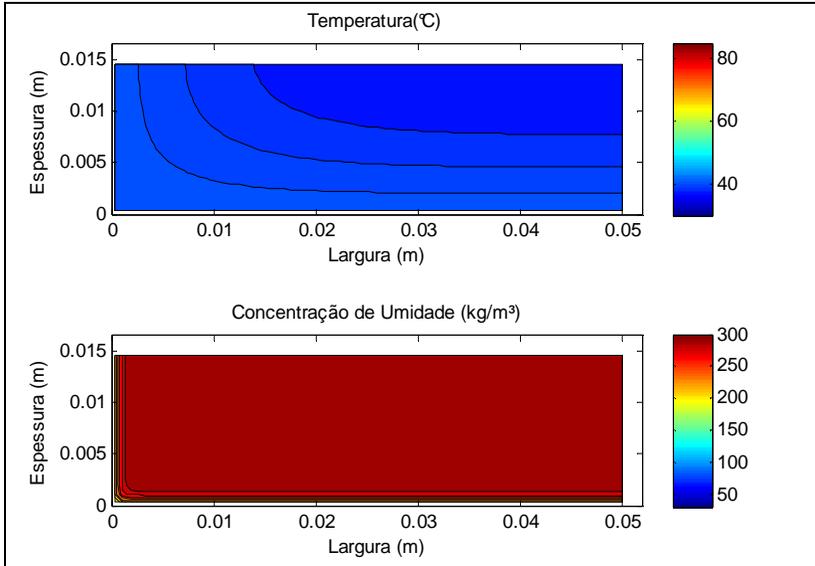


FIGURA 6.23: Perfis de temperatura e concentração de umidade após 1200 s do início da secagem.

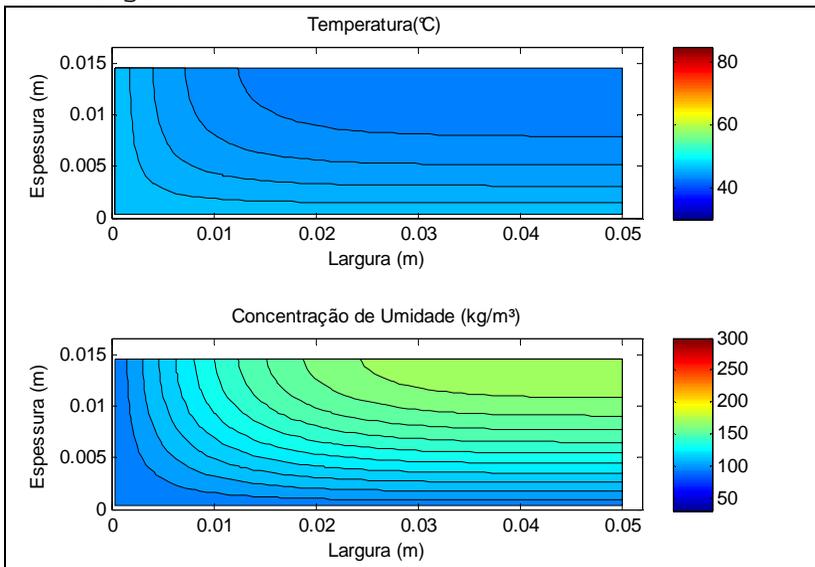


FIGURA 6.24: Perfis de temperatura e concentração de umidade 600 s após a primeira mudança das condições de secagem.

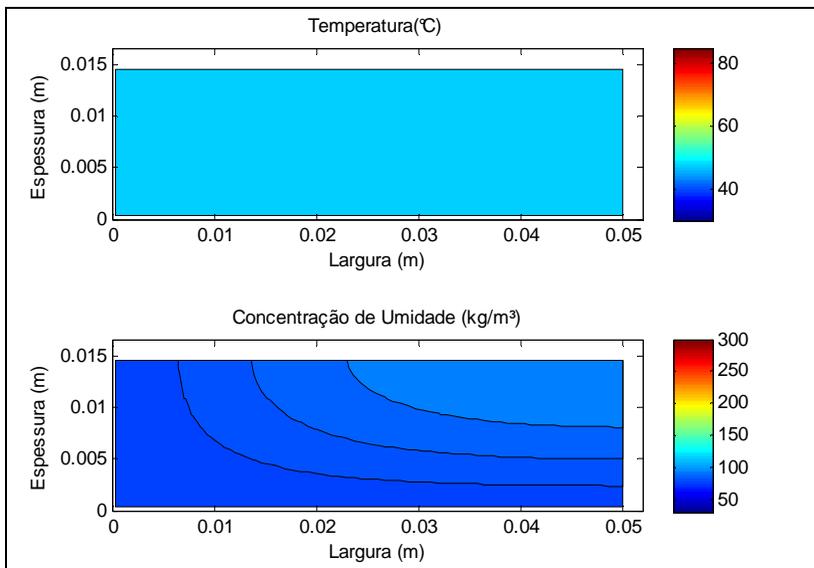


FIGURA 6.25: Perfis de temperatura e concentração de umidade ao final do processo de secagem.

O potencial de secagem muito baixo, próximo de um associado com a alta difusividade efetiva observada em andiroba, resulta em perfis de concentração de umidade com gradientes bastante suaves ao final do processo.

As Figuras 6.26 a 6.34 apresentam os perfis de temperatura e concentração de umidade obtidos 1200 s após o início da secagem, 600 s após cada mudança de fase dentro do programa de secagem proposto por Forest Products Laboratory (2009) e ao final do processo, quando o teor de umidade médio é de 10%.

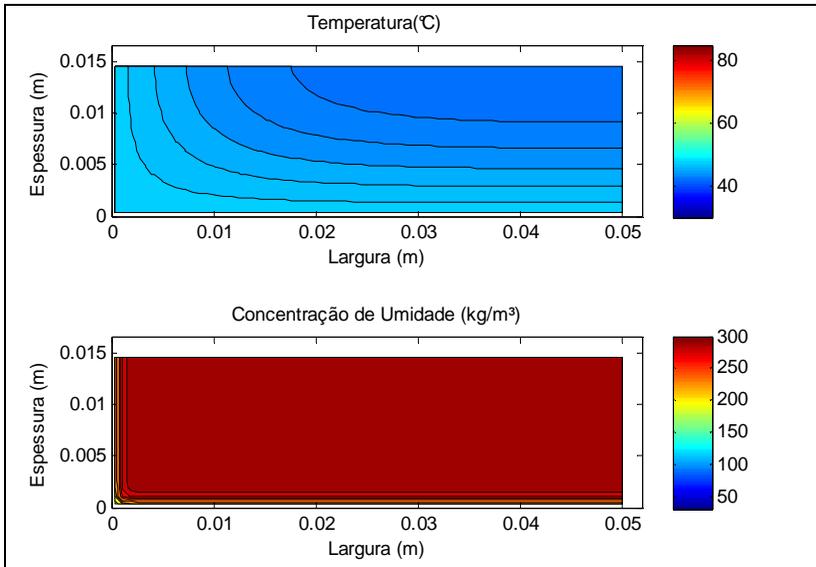


FIGURA 6.26: Perfis de temperatura e concentração de umidade após 1200 s do início da secagem.

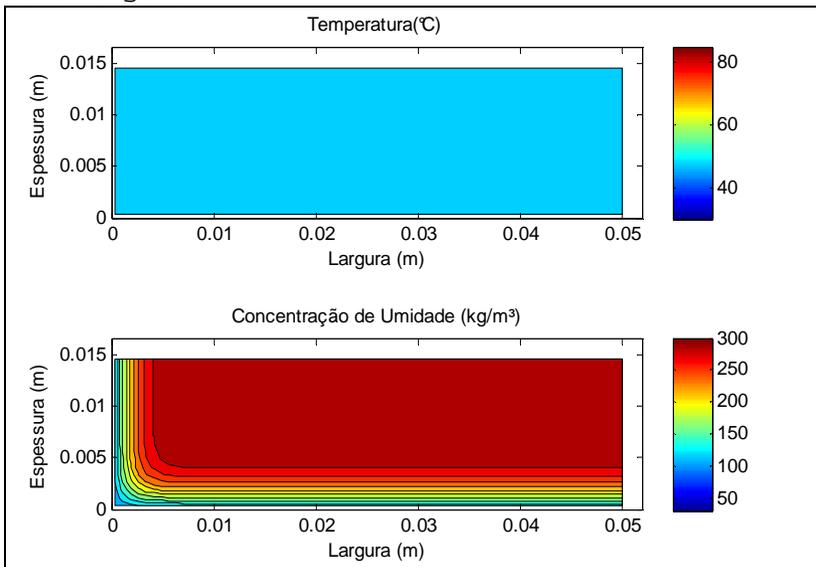


FIGURA 6.27: Perfis de temperatura e concentração de umidade 600 s após a primeira mudança das condições de secagem.

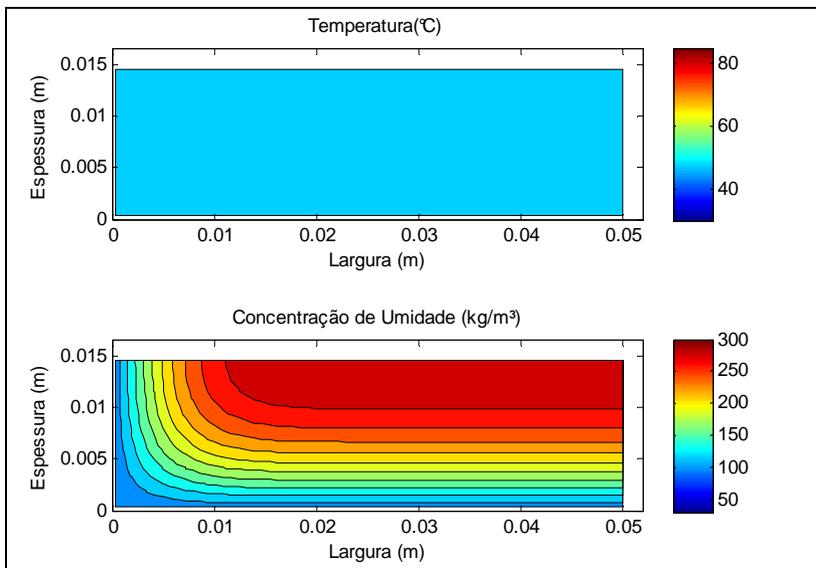


FIGURA 6.28: Perfis de temperatura e concentração de umidade 600 s após a segunda mudança das condições de secagem.

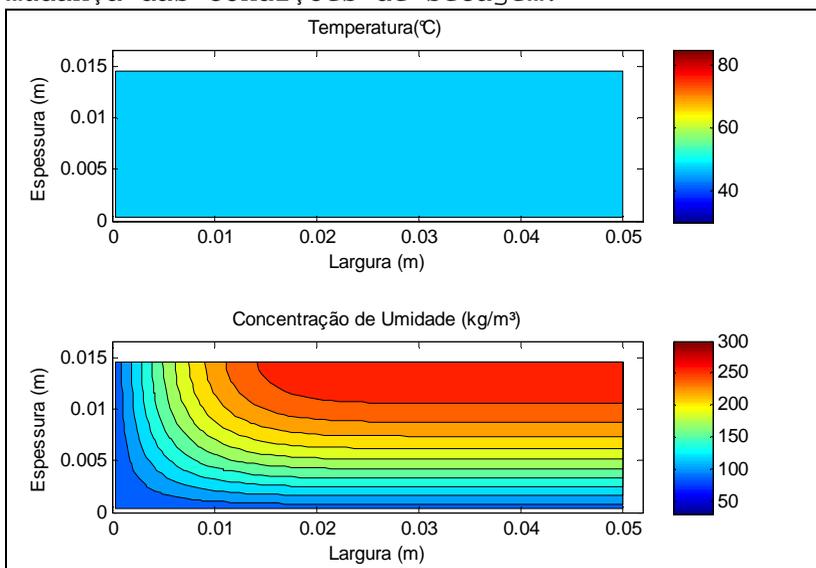


FIGURA 6.29: Perfis de temperatura e concentração de umidade 600 s após a terceira mudança das condições de secagem.

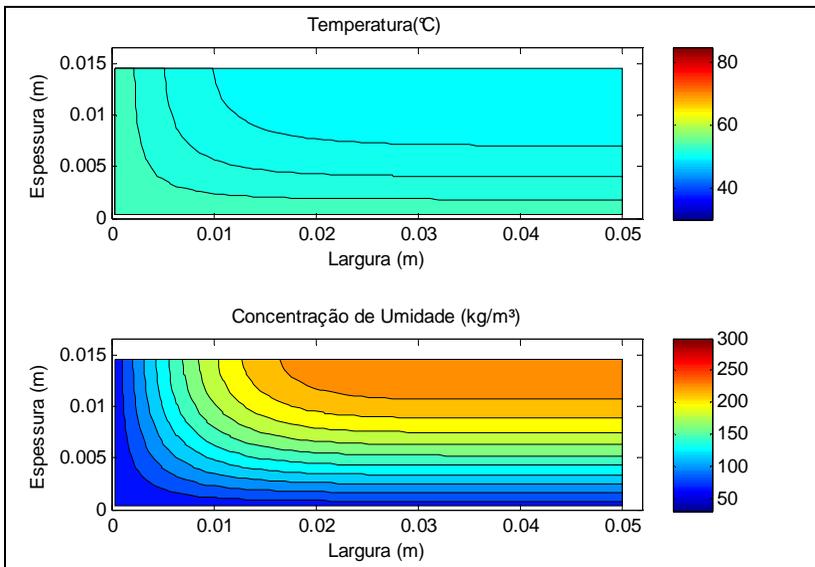


FIGURA 6.30: Perfis de temperatura e concentração de umidade 600 s após a quarta mudança das condições de secagem.

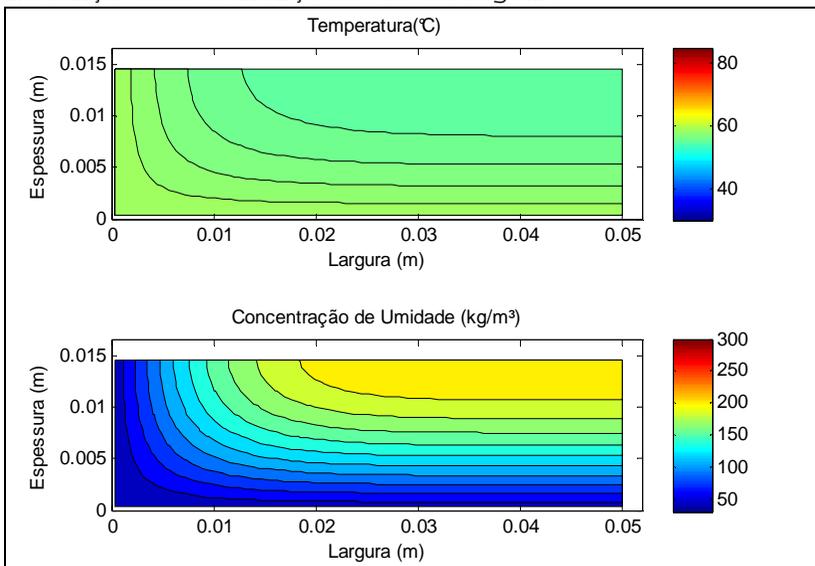


FIGURA 6.31: Perfis de temperatura e concentração de umidade 600 s após a quinta mudança das condições de secagem.

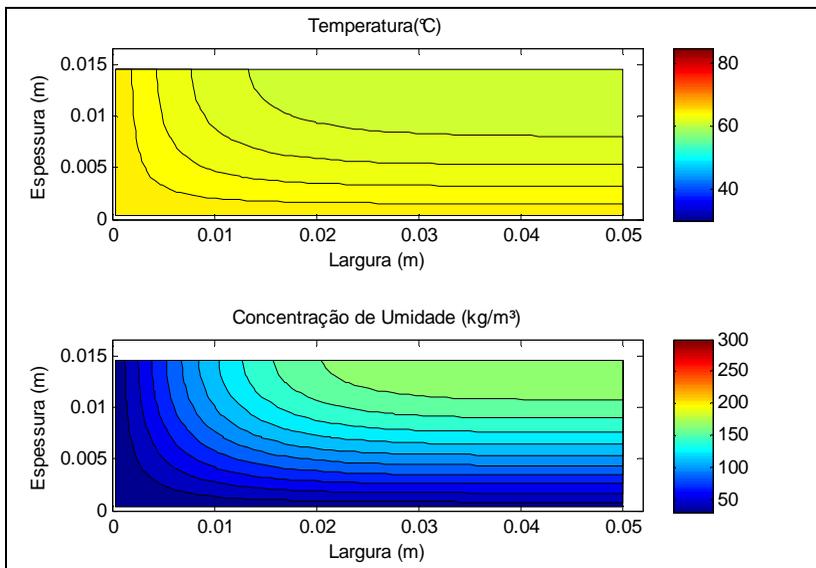


FIGURA 6.32: Perfis de temperatura e concentração de umidade 600 s após a sexta mudança das condições de secagem.

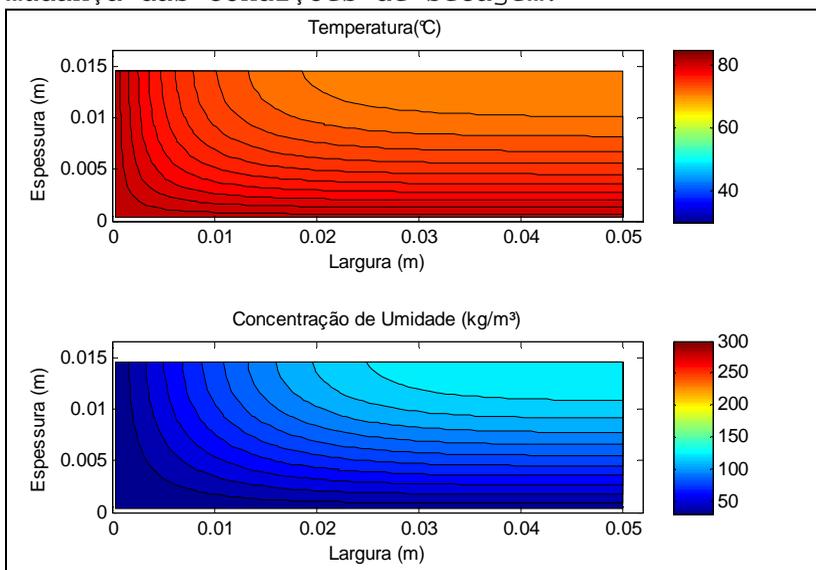


FIGURA 6.33: Perfis de temperatura e concentração de umidade 600 s após a sétima mudança das condições de secagem.

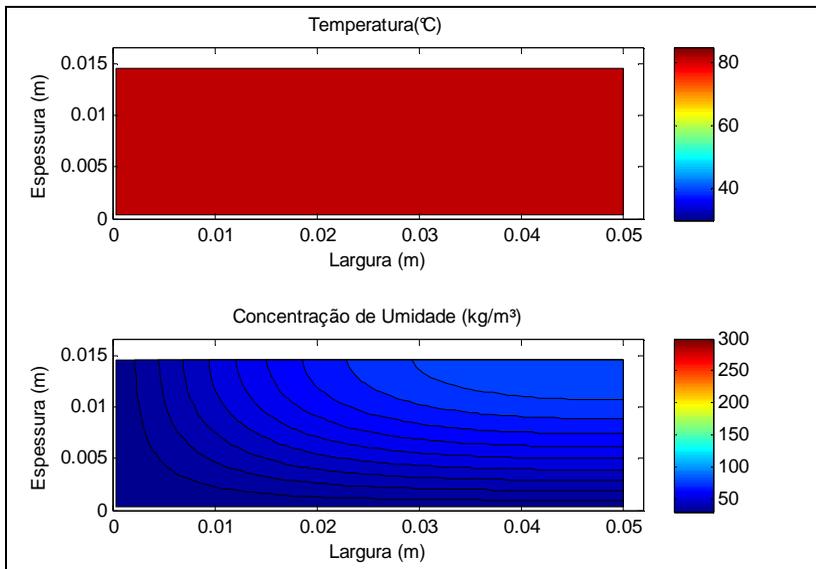


FIGURA 6.34: Perfis de temperatura e concentração de umidade ao final do processo de secagem.

A adoção de potenciais de secagem mais altos resultou em menor tempo de secagem, mas apresentou um gradiente mais acentuado de concentração de umidade ao final do processo de secagem.

6.2 SIMULAÇÃO DO EFEITO DA VARIABILIDADE NAS PROPRIEDADES DA MADEIRA

As Figuras 6.35 a 6.37 apresentam o teor de umidade em função do tempo quando são variadas propriedades relacionadas à madeira. Na Figura 6.35 observa-se o efeito da variabilidade na espessura das peças. Os limites inferior e superior representam as espessuras mínima e máxima que delimitam 90% das peças, como apresentado na Tabela 4.6.

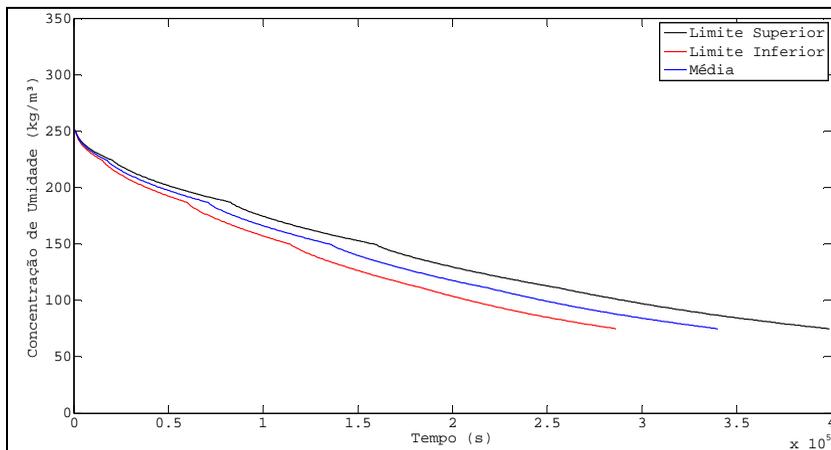


FIGURA 6.35: Concentração de umidade em função do tempo de secagem para timborana para diferentes espessuras da peça.

Quando o programa de secagem é simulado adotando-se a espessura correspondente ao limite inferior, o tempo necessário para atingir 10% de teor de umidade ou concentração de 74,8 kg/m³ é de 365.400 s. Esse tempo é 69.000 segundos, ou 15,9%, menor em relação ao resultado obtido com a espessura média. Adotando-se a espessura correspondente ao limite superior, o valor de 508.800 s é obtido, o que corresponde a um acréscimo de 74.400 s ou 17,1% em relação ao tempo obtido com a espessura média.

O efeito da variação na difusividade efetiva é ainda maior. O coeficiente de variação superior a 30% resulta em amplitude no tempo de secagem entre o limite inferior e superior de 551.400 s. Para o limite inferior da difusividade, o tempo praticamente dobra em relação ao tempo obtido com a simulação utilizando-se a difusividade média.

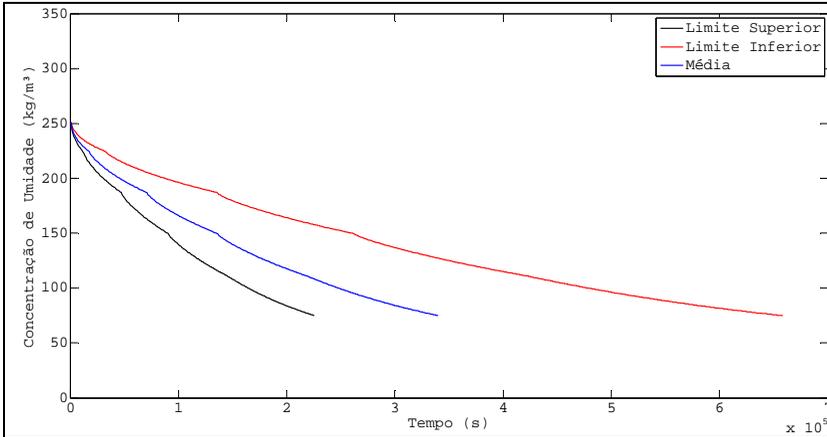


FIGURA 6.36: Concentração de umidade em função do tempo de secagem para timborana para diferentes difusividades efetivas.

Na Figura 6.37 observa-se o efeito da variação na concentração inicial de umidade. O efeito permanece durante o processo de secagem sendo um indicativo de que as restrições internas têm um papel fundamental na remoção de umidade, ultrapassando as diferenças observadas no potencial de secagem, já que diferentes concentrações de umidade e teores de umidade resultam em diferentes potenciais de secagem. Se a importância do potencial de secagem fosse maior, as peças com concentração inicial maior apresentariam maior taxa de secagem.

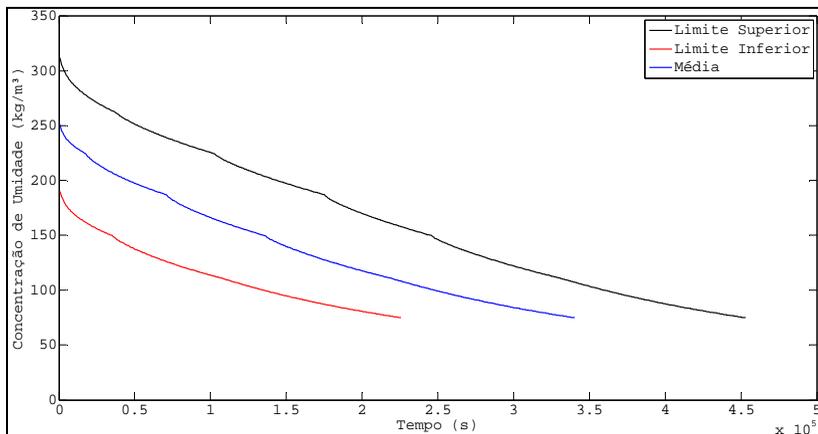


FIGURA 6.37: Concentração de umidade em função do tempo de secagem para timborana para diferentes concentrações iniciais de umidade.

A variação no tempo de secagem correspondeu a $\pm 26\%$ em relação ao tempo obtido com a concentração inicial média, valor muito próximo ao especificado de variação inicial da propriedade considerada.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A umidade de equilíbrio em função da temperatura e da umidade relativa do ar resultou em valores distintos para as três espécies, reforçando a necessidade de determinação experimental deste importante parâmetro utilizado nos modelos de secagem.

Os modelos GAB e Hailwood e Horrobin resultaram em estimativas semelhantes da umidade de equilíbrio, com coeficientes de determinação acima de 96% e erros padrão abaixo de 9%.

A difusividade efetiva apresentou alta correlação com a massa específica da madeira, além de dependência da temperatura, especialmente para andiroba e timborana. Sugere-se determinar a dependência da difusividade com a concentração de umidade.

As difusividades mássicas obtidas permitiram reproduzir as curvas de dessecamento com desvios reduzidos, além de estimar o gradiente de concentração de umidade.

Os números de Biot mássicos, calculados com os coeficientes convectivos de transferência de massa obtidos a partir de relações empíricas, resultaram em valores que permitem concluir que o processo de transferência de massa é controlado pela resistência interna.

O modelo matemático permitiu simular programas de secagem sugeridos para muirapiranga, timborana e andiroba, bem como avaliar o efeito de parâmetros relacionados à madeira e ao ambiente no tempo de secagem e nos perfis de temperatura e concentração de umidade.

Sugere-se, para trabalhos futuros, determinar a dependência da difusividade com a concentração de umidade.

Sugere-se também avaliar a influência dos parâmetros geométricos, bem como as condições

de operação do secador no processo de secagem da madeira.

Sugere-se ainda estudar o processo de secagem de outros tipos de madeiras tropicais brasileiras.

Referências

ABIMCI - Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente. **Estudo setorial 2007: Indústria de madeira processada mecanicamente**. Curitiba: ABIMCI, 2007.

ANDRADE, A. **Indicação de programas para a secagem convencional de madeiras**. 2000. 72p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeiras) - Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Madeiras, Universidade de São Paulo / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2000.

BALL, R. D.; SIMPSON, I. G.; PANG, S.. Measurement, modelling and prediction of equilibrium moisture content in *Pinus radiata* heartwood and sapwood. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Heidelberg, v. 59, n. , p.457-462, 2001.

BARAÚNA, Edy Eime Pereira. **Umidade de equilíbrio da madeira de angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke), guariúba (*Clarisia racemosa*) e tauari vermelho (*Cariniana micrantha* Ducke) em diferentes condições de temperatura e umidade relativa**. 2006. 61 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais, UFAM, Manaus, 2006.

BIRD, R. Byron (Robert Byron); STEWART, Warren E; LIGHTFOOT, Edwin N. **Fenômenos de transporte**. Rio de Janeiro: LTC, 2004. xv, 838 p, il.

BOONE, R. Sidney; KOZLIK, Charles J.; BOIS, Paul J.; WENGERT, Eugene M. **Dry kiln schedules for commercial woods - temperate and tropical**. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture,

Forest Service, Forest Products Laboratory, 1988, 158 p. (Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-57)

BUCKI, M.; PERRÉ, P.. Radio frequency/vacuum drying of wood: A comprehensive 2-D computational model on the board's scale. In: INTERNATIONAL IUFRO WOOD DRYING CONFERENCE, 8., 2003, Brasov. **Proceedings...** Brasov: University Of Brasov, 2003. p. 33 - 38. Disponível em: <<http://www.unitbv.ro/il/iufro2003modific/postiufro/Session1.%20Modelling/Bucki%20-%20Perre.pdf>>. Acesso em: 05 jun. 2006.

CAI, L. Determination of diffusion coefficients for sub-alpine fir. **Wood Science and Technology**, v.39, n.2, 2005, p. 153-162.

CARLSSON, Peter; TINNSTEN, Mats. Optimization of drying schedules adapted for a mixture of boards with distribution of sapwood and heartwood. **Drying Technology**, Philadelphia, v. 20, n. 2, p.403-418, 2002.

CHEN, Chia-ming; WANGAARD, Frederick F.. Wettability and the hysteresis effect in sorption of water vapor by wood. **Wood Science And Technology**, Heidelberg, v. 3, n. 2, p.177-187, set. 1968.

CIRAD, Centre de Coopération Internationale En Recherche Agronomique Pour Le Développement -. **Technological characteristics of 245 tropical species.** Disponível em: <<http://tropix.cirad.fr/america/america.html>>. Acesso em: 14 fev. 2009.

CRANK, John. **The mathematics of diffusion.** 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 1979. viii, 414 p, il. (Oxford science publications).

CREMASCO, Marco Aurélio. **Fundamentos de transferência de massa**. 2. ed. rev. Campinas: Ed. da UNICAMP, 2002. 729p, il. (Livro-texto).

DEDIC, Aleksandar D. J.; MUJUMDAR, Arun S.; VORONJEC, Dimitrije K. A three dimensional model for heat and mass transfer in convective wood drying. **Drying Technology**. v.21, n. 1, p. 1-15, 2003.

DEDIC, Aleksandar D. J.; PETROVIC, Aleksandar L.J.; NESIC, Milan Z. Modeling the process of desorption of water in oak (*Quercus robur* L.) wood. **Holzforschung**. v. 58, p.268-273, 2004.

DENIG, Joseph; WENGERT, Eugene M.; SIMPSON, William T. **Drying hardwood lumber**. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2000. (Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-118).

DURLO, Miguel Antão. **Tecnologia da madeira: peso específico**. Santa Maria: Centro de Pesquisas Florestais, 1991. 29 p, il. (Série técnica, n.8).

ELEOTERIO, J. R. ; VALLE, J. A. B. ; BERTOLI, S. L. ; ULSON DE SOUZA, A. A. ; GUELLI U. SOUZA, S. M. A. . Influência da espécie de madeira na difusividade efetiva da água durante o processo de secagem. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, XVI, 2006, Santos (SP). **Anais...** Lorena; Campinas (SP): EEL; UNICAMP, 2006.

ELEOTÉRIO, Jackson Roberto; HASELEIN, Clóvis Roberto; GIACOMINI, Nestor Pedro. Programa para estimativa da umidade de equilíbrio da madeira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.8, n.1, p.13-22, nov. 1998.

FERNANDES, Laudelino Pontes. **Modelo matemático para secagem de madeira em estufas - fase de aquecimento**. 2006.88p. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática), Universidade Regional do Noroeste do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2006.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood Handbook - Wood as an engineering material**. Madison, WI: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. (Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113).

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **WWW Hardwood Drying Schedules**. Disponível em: <<http://www1.fpl.fs.fed.us/drying.html>>. Acesso em: 14 fev. 2009.

FOTSING, Joseph Albert Mukam; TCHAGANG, Claude Wanko. Experimental determination of the diffusion coefficients of wood in isothermal conditions. **Heat Mass Transfer**. v.41, 2005, p.977-980.

FRANSEN, Henrik Lund. **Modelling of moisture transport in wood. State of the Art and Analytic Discussion**. Aalborg: Aalborg University, 2005, 2nd ed. (Wood Science and Timber Engineering, Paper no. 1)

GU, Hong-Mei; ZINK-SHARP, Audrey. Measurement of moisture gradients during kiln-drying. **Forest Products Journal**, v.49, n.4, 1999, p.77-86.

HORMAN, Izet; MARTINOVIĆ, Dunja; HAJDAREVIĆ, Seid. Finite volume method for analysis of stress and strain in wood. **Drvna Industrija**, Hrvatska, v. 60, n. 1, p.27-32, 2009.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio

de Janeiro: LTC, c2008. xix, 643 p, il. +, 1 CD-ROM.

JANKOWSKY, I. P. Equipamentos e processos para secagem de madeira. In: Seminário Internacional de Utilização da Madeira de Eucalipto para Serraria, São Paulo. **Anais...** Piracicaba: IPEF/IPT, 1995, p. 109-118.

JANKOWSKY, I. P.; LUIZ, M. G. Review of wood drying research in Brazil: 1984-2004. **Drying Technology**, v. 24, p. 447-455, 2006.

JANKOWSKY, Ivaldo Pontes. Variação sazonal da umidade de equilíbrio para madeira de Pinus. **IPEF**, Piracicaba, v. 31, p.41-46, dez. 1985.

JANKOWSKY, Ivaldo Pontes; GALVÃO, Antonio Paulo Mendes. Influência do teor de extrativos na umidade de equilíbrio da madeira. **IPEF**, Piracicaba, v. 18, p.1-33, jun. 1979.

JANNOT, YVES; KANMOGNE, ABRAHAM; TALLA, ANDRÉ; MONKAM, LOUIS. Experimental determination and modelling of water desorption isotherms of tropical woods: afzelia, ebony, iroko, moabi and obeche. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 64, p. 121-124, 2006.

KANG, Wook et al. Some considerations in heterogeneous nonisothermal transport models for wood: a numerical study. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 54, p.267-277, 2008.

KEEY, R. B; LANGRISH, T. A. G.; WALKER, J. C. F. **Kiln-drying of lumber**. Berlin: Springer Verlag, 2000. xi, 326p, il. (Springer Series in Wood Science).

KOCAEFE, Duygu et al. Modeling of heat and mass transfer during high temperature treatment of

aspens. **Wood Science And Technology**, Heidelberg, v. 40, n. 5, p.371-391, 2006.

KOLLMANN, F.F.P.; COTÊ, W.A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer-Verlag, 1968. v.1, 592p.

KOUMOUTSAKOS, Anastasios; AVRAMIDIS, Stavros. Mass transfer characteristics of western hemlock and western red cedar. **Holzforschung**, v.56, 2002, p.185-190

LENTH, Christopher A.. **Wood material behavior in severe environments**. 1999. 122 f. Thesis (Doutorado) - Faculty Of The Virginia Polytechnic Institute And State University, Blacksburg, 1999.

LIER, S. O.; MORAES, P. L.; LIBARDI, J. H. MIRANDA. **LCE-0200 - Física do Ambiente Agrícola**. Disponível em: <
<http://www.lce.esalq.usp.br/aulas/lce200/lce200.html> > Acesso em: 26 de abril de 2007.

LIU, Jen Y.; SIMPSON, William T. Solutions of diffusion equation with constant diffusion and surface emission coefficients. **Drying Technology**, v.15, n.10, 1997, p.2459-2477.

LIU, Jen Y.; SIMPSON, William T.; VERRILL, Steve P. An inverse moisture diffusion algorithm for the determination of diffusion coefficient. **Drying technology**, v.19, n.8, 2001, p. 1555-1568.

MALISKA, C. R. (Clovis Raimundo). **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional: fundamentos e coordenadas generalizadas**. 2. ed. rev., ampl. Rio de Janeiro : Livros Técnicos e Científicos, c 2004. 453 p, il.

MARCHIORI, J. N. C. Influência da estrutura anatômica na secagem de madeiras. In: SEMINÁRIO SOBRE SECAGEM DE MADEIRA, I, 1992, Santa Maria. **Anais...**Santa Maria: UFSM/CEPEF, 1992, p.7-34.

MARTINOVIĆ, D.; HORMAN, I.; DEMIRDŽIĆ, I. Numerical and experimental analysis of a wood drying process. **Wood Science and Technology**. v. 35, p.143-156, 2001.

MENDES, Alfredo de Souza et al. **Programas de secagem para madeiras brasileiras**. Brasília, DF: IBAMA, 1998. 114 p, il.

MENDES, L. M.; ARCE, J. E. Análise comparativa das equações utilizadas para estimar a umidade de equilíbrio da madeira. **Cerne**, Lavras, v.9, n. 2, p. 141-152, jul./dez. 2003.

MUJUMDAR, A. S. (Ed.). **Handbook of industrial drying**. 2nd ed., rev. and expanded. New York: M. Dekker, 1995. 2v, il.

MUÑIZ, G. I. B. **Caracterização e desenvolvimento de modelos para estimar as propriedades e o comportamento na secagem da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. e *Pinus taeda* L.** Curitiba: Tese (Doutorado) Universidade Federal do Paraná, 235 p., 1993.

NABHANI, M; TREMBLAY, C; FORTIN, Y. Experimental determination of convective heat and mass transfer coefficients during wood drying. In: INTERNATIONAL IUFRO WOOD DRYING CONFERENCE, 8, 2003, Brasov. **Proceedings**. Brasov: Iufro, 2003. p. 225 - 230.

OLANDER, Lars **Equations and formulas for air and air contaminants**. Disponível em: <<http://www.byv.kth.se/avd/itek/pers/olander/und>

[ervis/Berakningssambandeng/chap_01.pdf](#)> Acesso em: 26 de outubro de 2005.

PANG, Shusheng. Effects of sawing pattern on lumber drying: model simulation and experimental investigation. **Drying Technology**, Philadelphia, v. 20, n. 9, p.1769-1787, 2002.

PANG, Shusheng. Optimizing airflow reversals for kiln drying of softwood timber by applying mathematical models. **Maderas, Cienc. tecnol.**, 2004, vol.6, no.2, p.95-108.

PAPADOPOULOS, Antonios N.. Moisture adsorption isotherms of two esterified Greek hardwoods. **Holz Als Roh- Und Werkstoff**, Heidelberg, v. 63, p.123-128, 2005.

PEREZ, Patricio, ANANIAS, Rubén A y HERNANDEZ, Gonzalo. Estudio de la velocidad del secado de renovales de canelo *Drimys winteri*. **Maderas, Cienc. tecnol.**, 2005, vol.7, no.2, p.99-108.

PERRÉ, P.; DEGIOVANNI, A. Simulation par volumes finis des transferts couplés en milieux poreux anisotropes: séchage du bois à basse et à haute température. **International Journal Of Heat And Mass Transfer**, Orlando, Fl, v. 33, n. 11, p.2463-2478, nov. 1990.

PERRÉ, Patrick. How to get a relevant material model for wood drying simulation? In: COST ACTION E15 ADVANCES IN THE DRYING OF WOOD (1999-2003). **Proceedings 1st Workshop on State of the art for kiln drying**, 13-14 October, Edinburgh, 1999.

PERRÉ, PATRICK. The numerical simulation of drying: a mature tool available to the wood industry. In: COST ACTION E15 ADVANCES IN THE DRYING OF WOOD, 4th. **Proceedings 4th Workshop**

"Methods for Improving Drying Quality of Wood",
30-31 May 2002, Santiago de Compostela, 2002.

PERRÉ, Patrick; ZOHOUN, Sylvain; BRANDÃO, Alcir. Détermination de la diffusivité massique en regime permanent: résultats d'une campagne de mesure sur différentes essences tempérées et tropicales. In: SCIENCES ET INDUSTRIES DU BOIS. Colloque N.4, 1996, Nancy, FRANCE. **Anais...** Nancy, FRANCE, 1996, p.157-164.

PING, M.; LIANBAI, G. Water transfer of Masson pine lumber during high temperature drying. **Holz als Roh- und Werkstoff**. n. 61, p. 349-354, 2003.

REID, Robert C; PRAUSNITZ, John M; POLING, Bruce E. **The properties of gases and liquids**. 4. Ed. New York: McGraw-Hill Book, 1988. x, 741p, il. (Chemical engineering series).

RICE, R.W.; SHEPARD, Robert. The thermal conductivity of plantation grown white pine (*Pinus strobus*) and red pine (*Pinus resinosa*) at two moisture content levels. **Forest Products Journal**, Madison, Wi, v. 54, n. 1, p.92-95, 2004.

ROZAS MELLADO, Emmanuel Carlos. **Modelo de transferência de calor e massa na secagem de madeira serrada de *Pinus***. 2007. 155p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

SALIN, J.. Analysis and optimization of the conditioning phase in timber drying. **Drying Technology**, Drying Technology, v. 19, n. 8, p.1711-1724, 2001.

SANTOS, G. R. V., **Otimização da secagem da madeira de *Eucalyptus grandis* [Hill ex Maiden]**.

2002. 70p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeiras) - Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Madeiras, Universidade de São Paulo / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2002.

SEHLSTEDT-PERSSON, Margot. The effect of extractive content on moisture diffusion properties for Scots pine and Norway spruce. In: COST ACTION E15 ADVANCES IN THE DRYING OF WOOD (1999-2003). **Proceedings 3rd Workshop on SOFTWOOD DRYING TO SPECIFIC END-USES**, 11-13 June, Helsinki, 2001.

SIAU, J.F. **Transport processes in wood**. Berlin: Springer-Verlag, 1984. 245p.

SIMPSON, W. T.. Equilibrium moisture content prediction for wood. **Forest Products Journal**, Madison, v. 21, n. 5, p.48-49, 1971.

SIMPSON, W. T.; SAGOE, J. A. **Relative drying times of 650 tropical woods: Estimation by green moisture content, specific gravity, and green weight density**. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1991, 27 p. (Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-71)

SIMPSON, W.. Sorption theories applied to wood. **Wood And Fiber Science**, Madison, v. 12, n. 3, p.183-195, 1980.

SIMPSON, William T. Drying wood: a review - Part I. **Drying Technol.**, v. 2, n. 2, p.235-264, 1983a.

SIMPSON, William T. Drying wood: a review - Part II. **Drying Technol.**, v. 2, n. 3, p.353-368, 1983b.

SIMPSON, William T.; LIU, Jen Y. An optimization technique to determine red oak surface and internal moisture transfer coefficients during drying. **Wood and Fiber Science**. v.29, n.4, 1997, p. 312-318.

SIMPSON, William T.; LIU, Jen Y. Dependence of the water vapor diffusion coefficient of aspen (*Populus spec.*) on moisture content. **Wood Sci. Technol.**, v.26, 1991, p.9-21.

SIMPSON, William T.; VERRILL, Steve P. Estimating kiln schedules for tropical and temperate hardwoods using specific gravity. **Forest Prod. J.**, v.47, n.7/8, 1997, p.64-68.

SKAAR, C. **Water in wood**. New York: Syracuse University Press, 1972. 218p.

SOCIETY OF WOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY. **Structure of Wood**. Disponível em: <<http://www.swst.org/teach/set2/struct1.html>>. Acesso em: 20 set. 2009.

SOUZA, Maria Helena de; MAGLIANO, Mauro Mendonça; CAMARGOS, José Arlete Alves. **Madeiras tropicais brasileiras =: Brazilian tropical woods**. Brasília, D.F: Ministério de Meio Ambiente, 1997. 150p, il.

STANISH, M. A.; SCHAJER, G. S.; KAYIHAN, FERHAN. A mathematical model of drying for hygroscopic porous media. **AIChE Journal**. v. 32, n. 8, ago.1986.

SULEIMAN, B.M.; LARFELDT, J.; LECKNER, B.; GUSTAVSSON, M. Thermal conductivity of wood. **Wood Science and Technology**, v.33, n.6, p.465-473, 1999.

THEPPAYA, T.; PRASERTSAN, S.. Parameters influencing drying behavior of rubber wood (*Hevea brazilliensis*) as determined from desorption experiment. **Drying Technology**, Philadelphia, v. 20, n. 2, p.507-525, 2002.

TIME, Berit. **Hygroscopic moisture transport in wood**. Norwegian University of Science and Technology. Department of Building and Construction Engineering, 1998.

VERMAAS, H. F. Interaction of wood, water and stresses during drying: a review. **Southern African Forestry Journal**. n.181, p.25-32, 1998.

VIDAL BASTÍAS, Marcia; CLOUTIER, Alain. Evaluation of wood sorption models for high temperatures. **Maderas: Ciencia y tecnología**, Concepción, v. 7, n. 3, p.145-158, 2005. VIDAL; CLOUTIER, 2005

WANGAARD, Frederick F.; A GRANADOS, Luis. The effects of extractives on water-vapor sorption by wood. **Wood Science And Technology**, Heildelberg, v. 1, n. 4, p.253-277, 1967.

WELTY, James R., et al. **Fundamentals of momentum, heat and mass transfer**. 4th ed. New York : John Wiley, c2001. xii, 759 p, il.

WENGERT, E. M.; DENIG, J. Lumber drying: today and tomorrow. **Forest Products Journal**. v.45, n.5, p.22-30, 1995.

XIANJUN, Li et al. Nonisothermal moisture movement in wood. **Front. For. China**, Beijing, v. 3, n. , p.348-352, 2006.

XIANJUN, Li et al. Nonisothermal moisture movement in wood. **Journal Of Beijing Forestry**

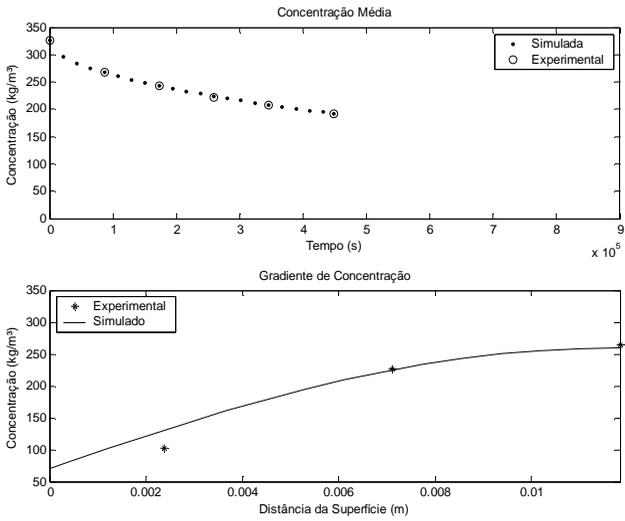
University, Beijing, v. 27, n. 2, p.96-100, 2005.

YOUNSI, R.; KOCAEFE, D.; KOCAEFE, Y. Three-dimensional simulation of heat and moisture transfer in wood, **Applied Thermal Engineering**, v 26, n 11-12, August 2006, p. 1274-1285.

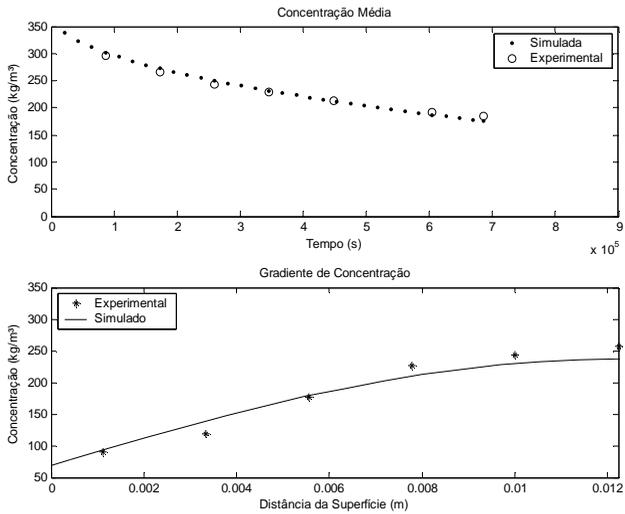
Apêndice A - Validação das Difusividades
Efetivas

Muirapiranga / T = 50°C / UR = 60%

1

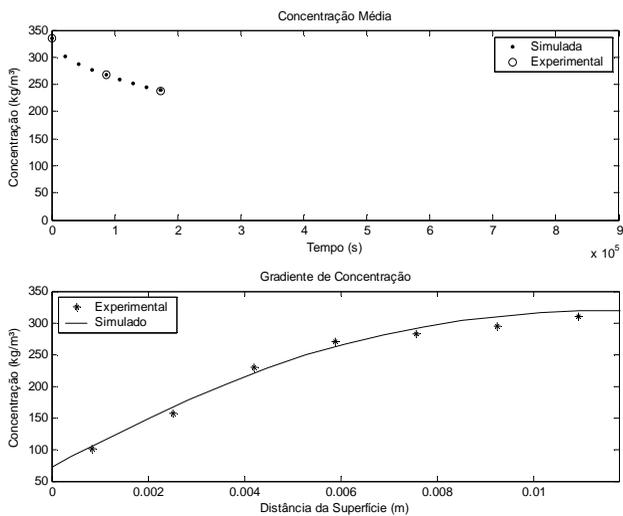


2

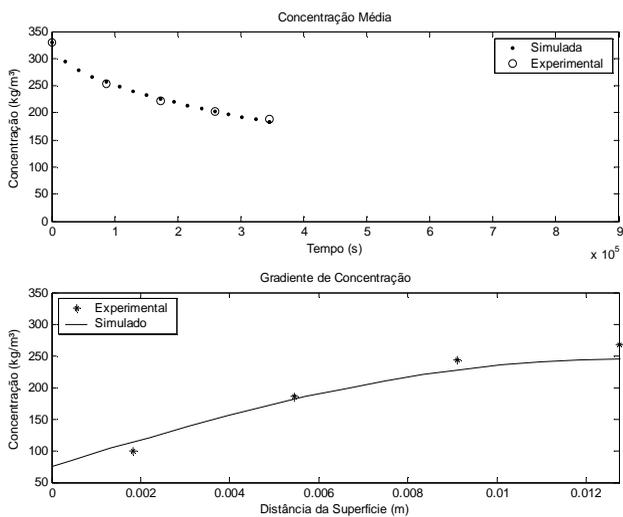


Muirapiranga / $T = 50^{\circ}\text{C}$ / $UR = 60\%$

3

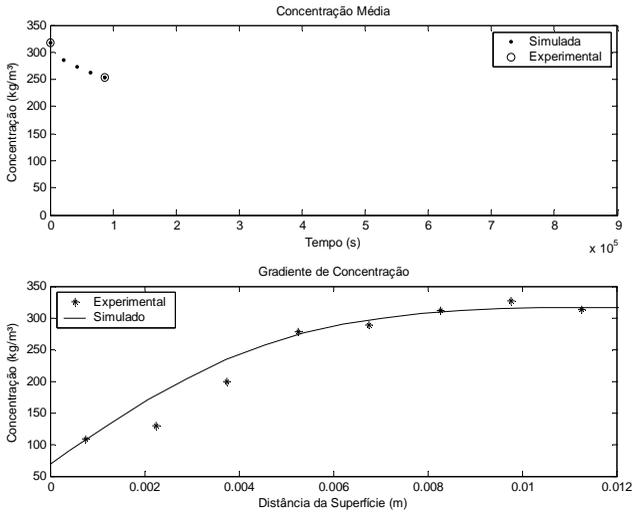


4

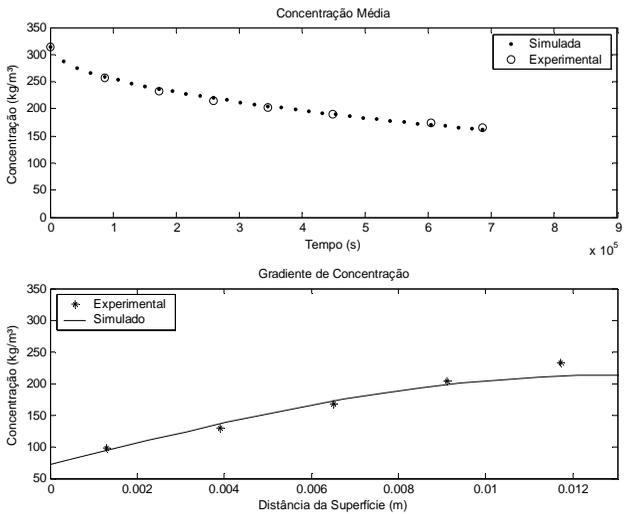


Muirapiranga / $T = 50^{\circ}\text{C}$ / $UR = 60\%$

5

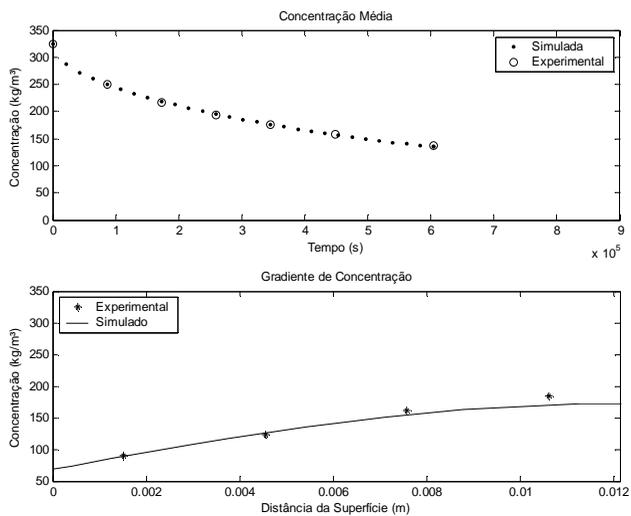


6



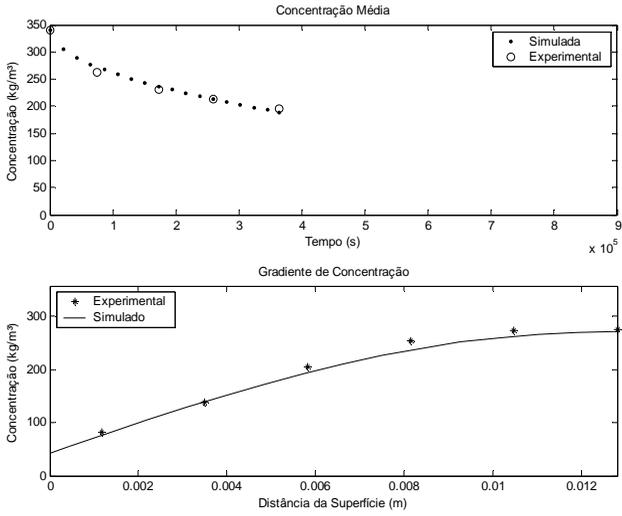
Muirapiranga / $T = 50^{\circ}\text{C}$ / $UR = 60\%$

7

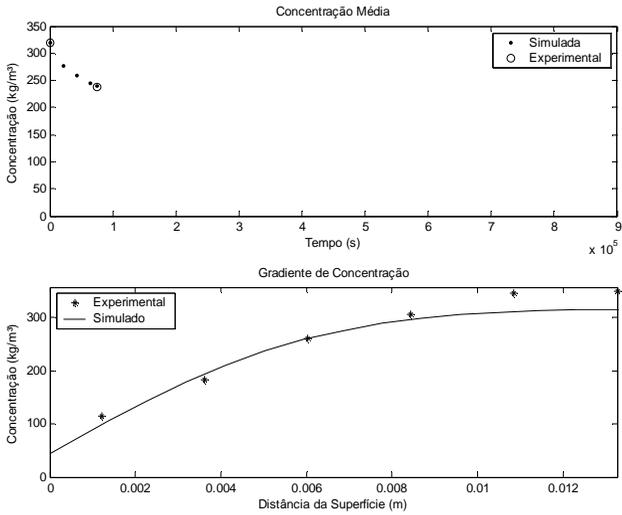


Muirapiranga / T = 50°C / UR = 20%

1

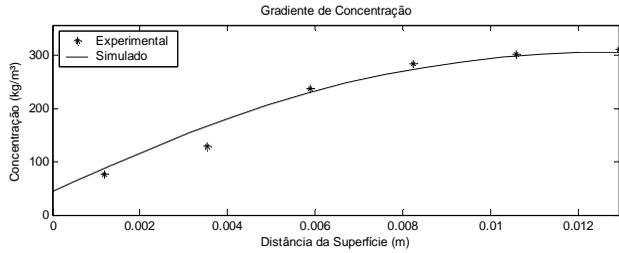
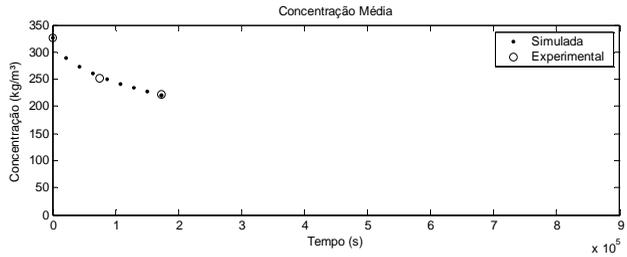


2

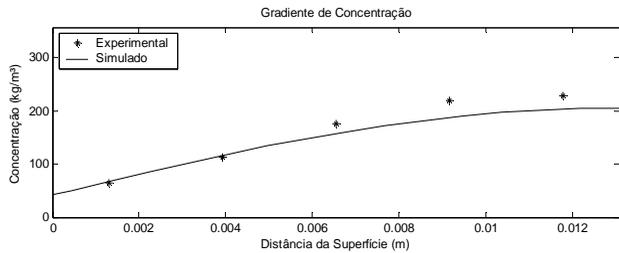
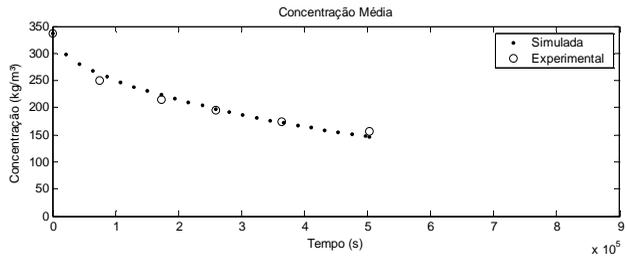


Muirapiranga / T = 50°C / UR = 20%

3

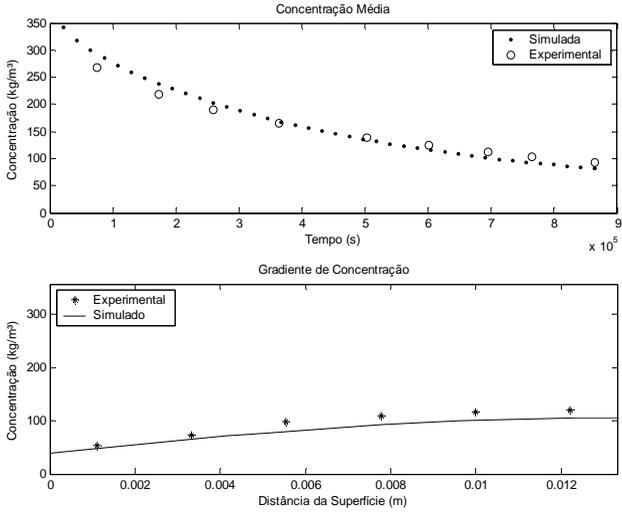


4

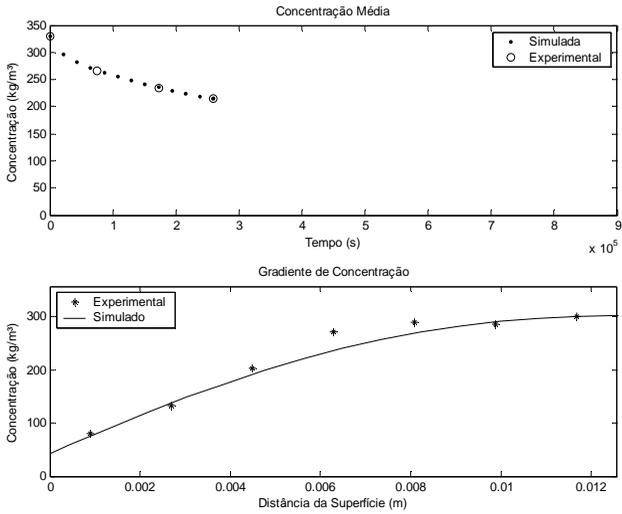


Muirapiranga / T = 50°C / UR = 20%

5

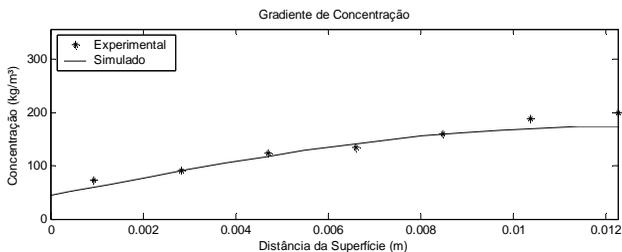
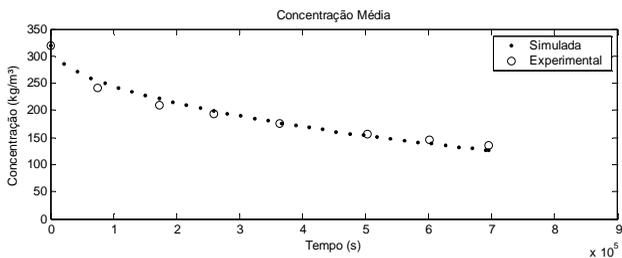


6

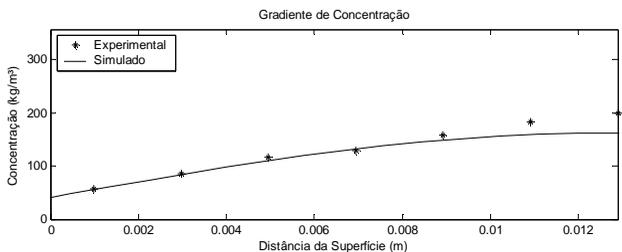
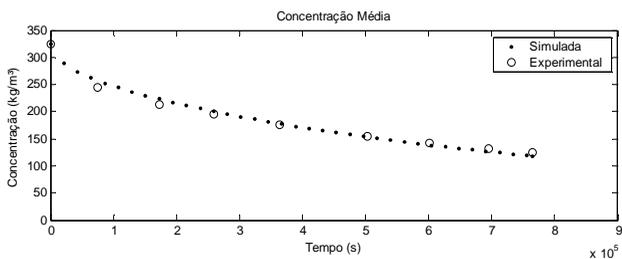


Muirapiranga / T = 50°C / UR = 20%

7

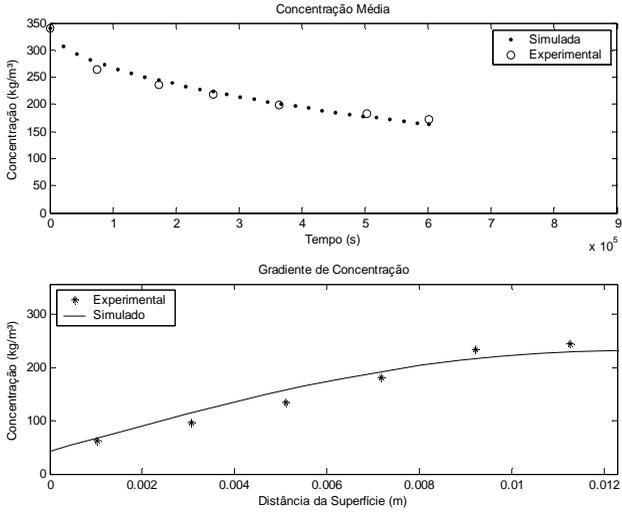


8

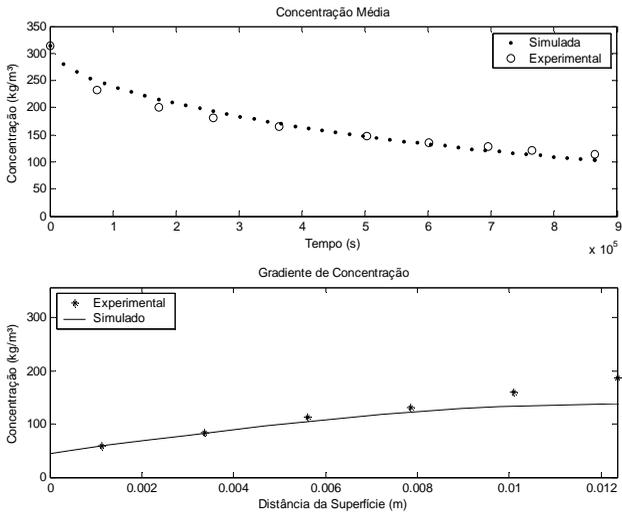


Muirapiranga / T = 50°C / UR = 20%

9

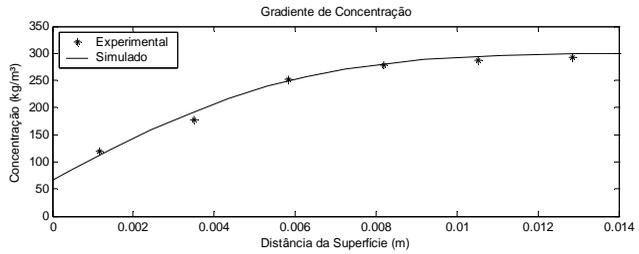
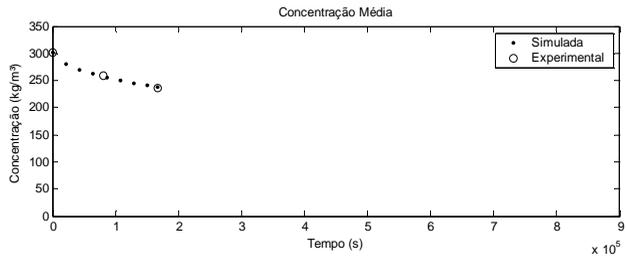


10

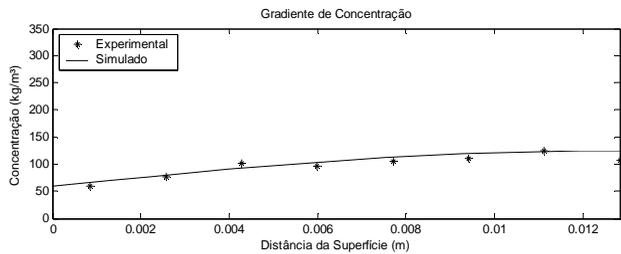
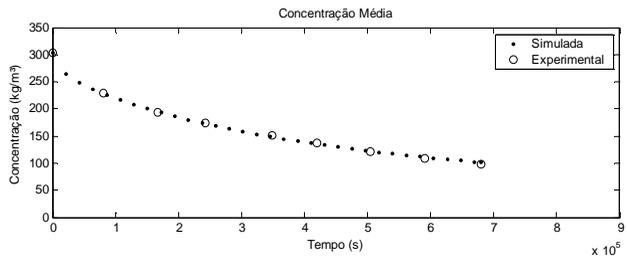


Muirapiranga / T = 70°C / UR = 60%

1

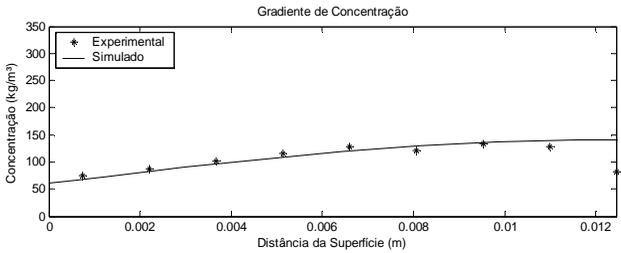
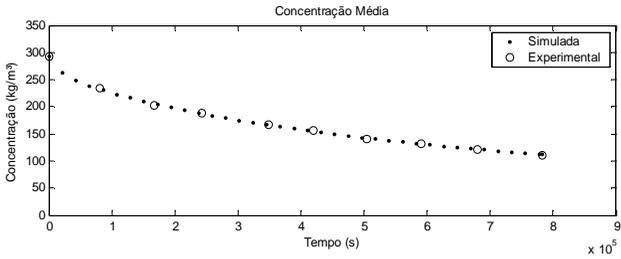


2

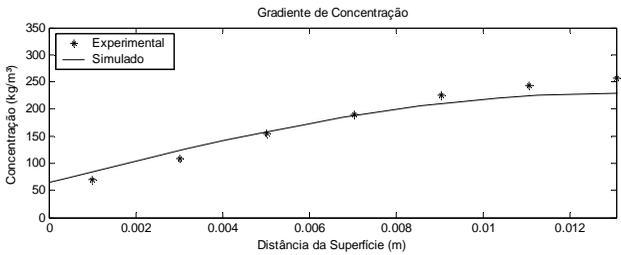
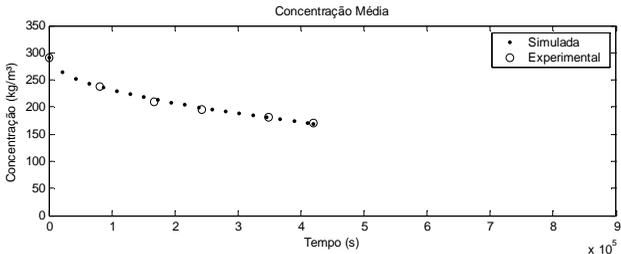


Muirapiranga / T = 70°C / UR = 60%

3

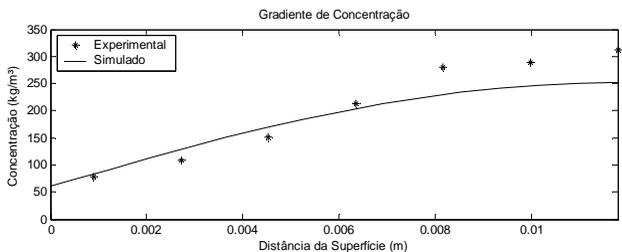
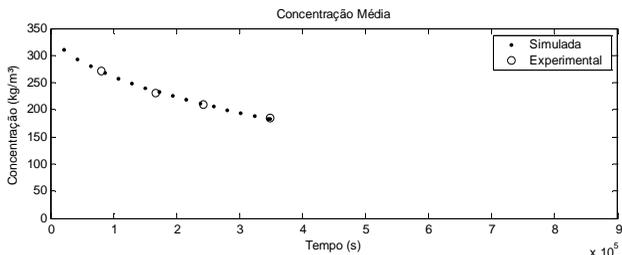


4

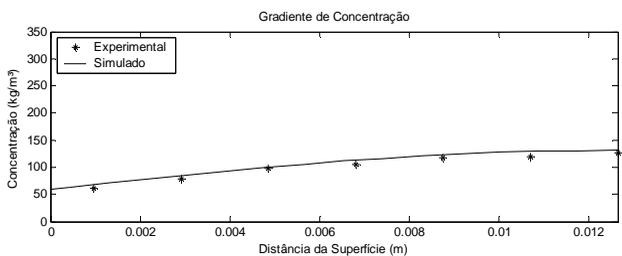
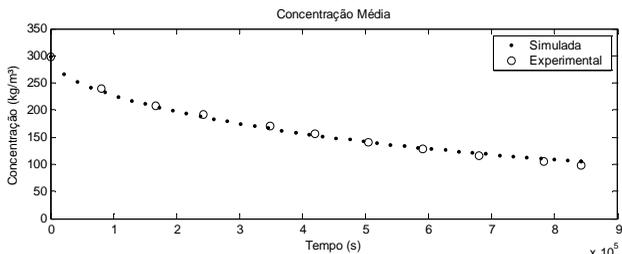


Muirapiranga / T = 70°C / UR = 60%

5

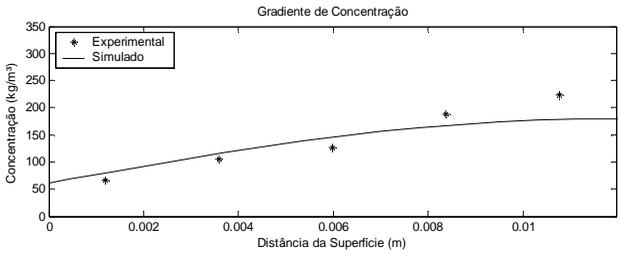
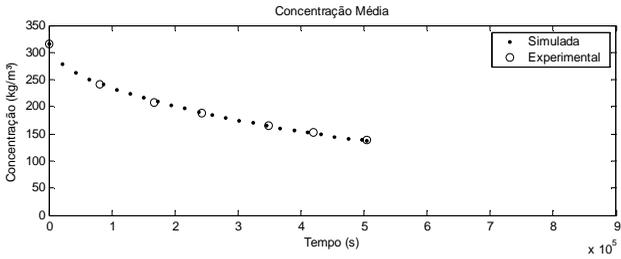


6

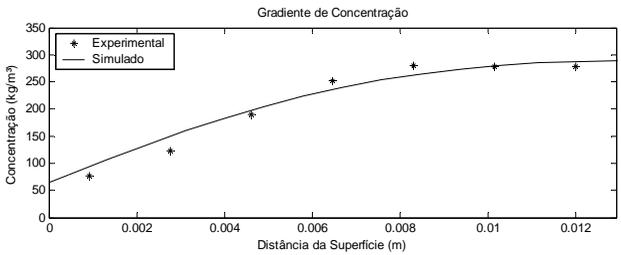
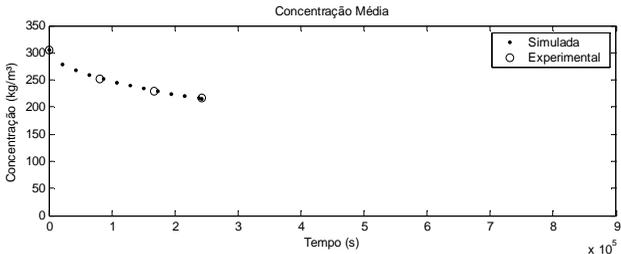


Muirapiranga / T = 70°C / UR = 60%

7

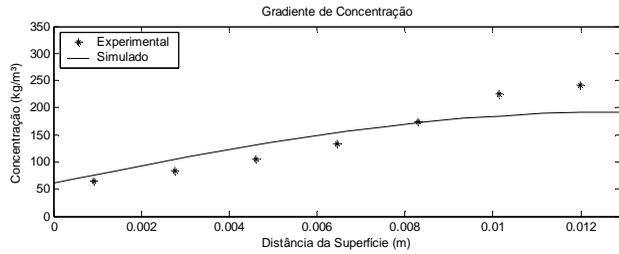
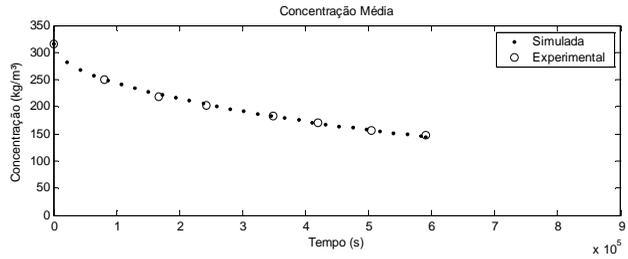


8

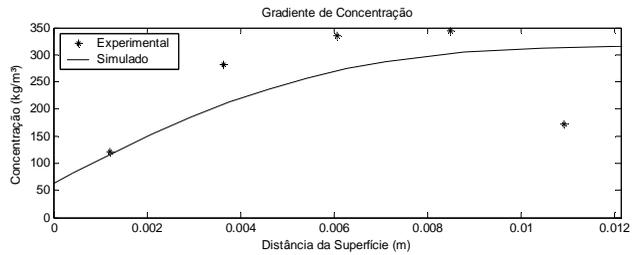
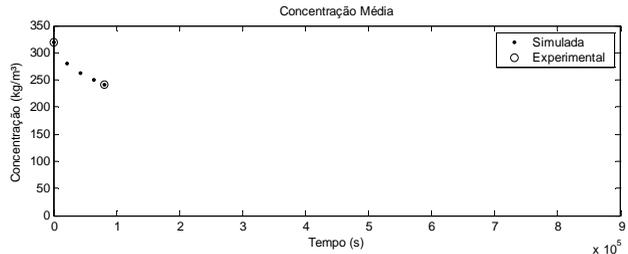


Muirapiranga / T = 70°C / UR = 60%

9

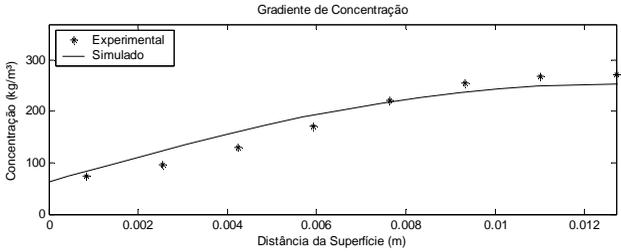
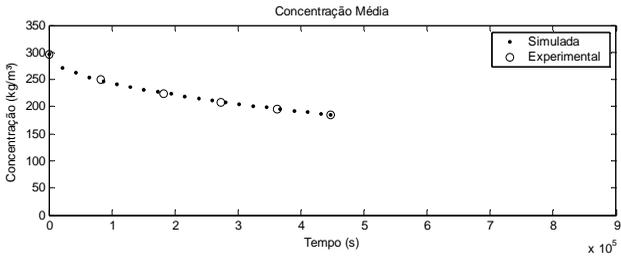


10

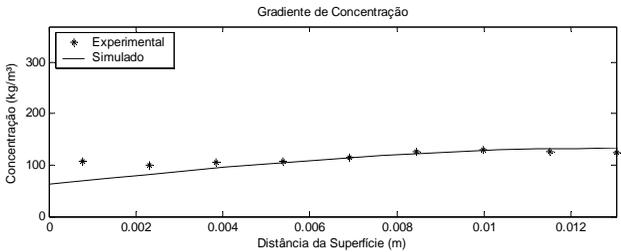
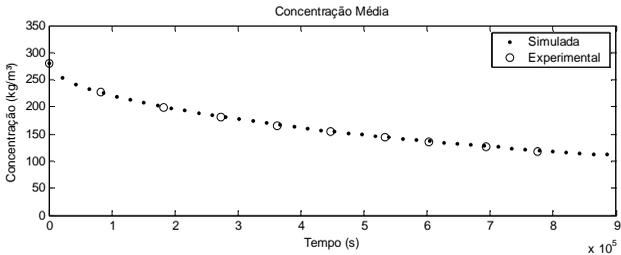


Muirapiranga / T = 70°C / UR = 60% - Carga 4

1

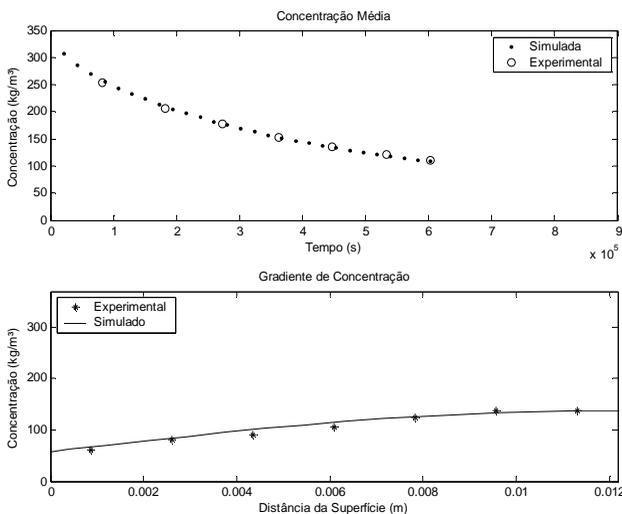


2

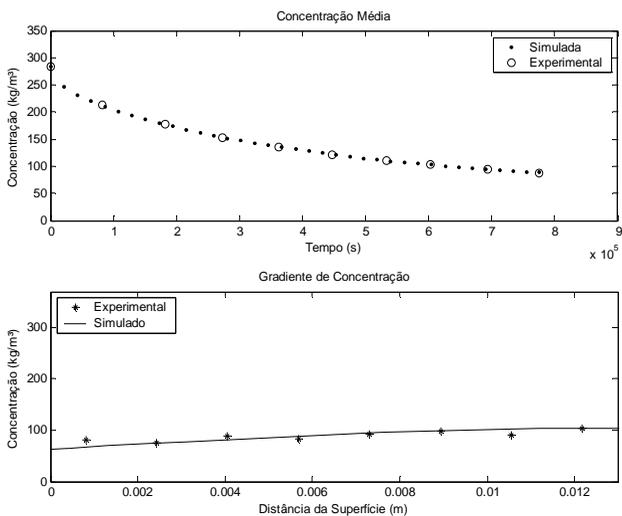


Muirapiranga / T = 70°C / UR = 60% - Carga 4

3

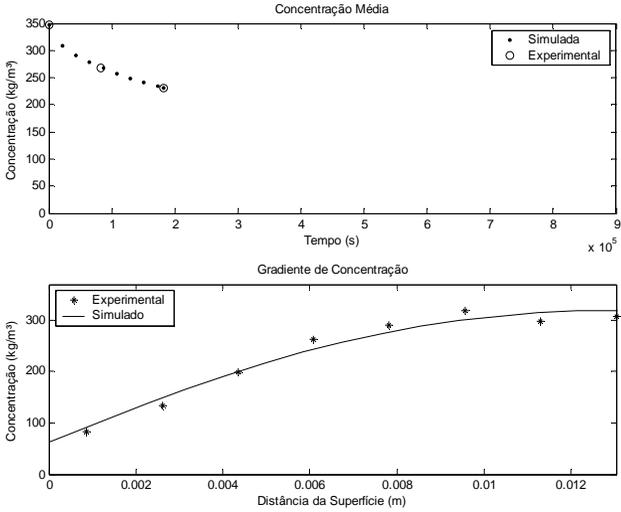


4

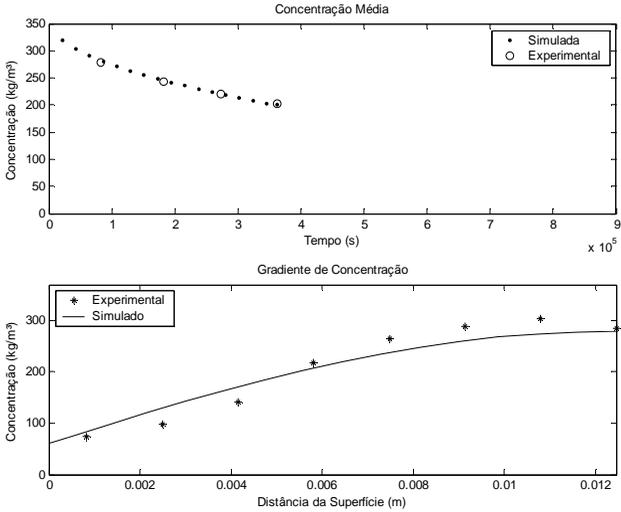


Muirapiranga / T = 70°C / UR = 60% - Carga 4

5

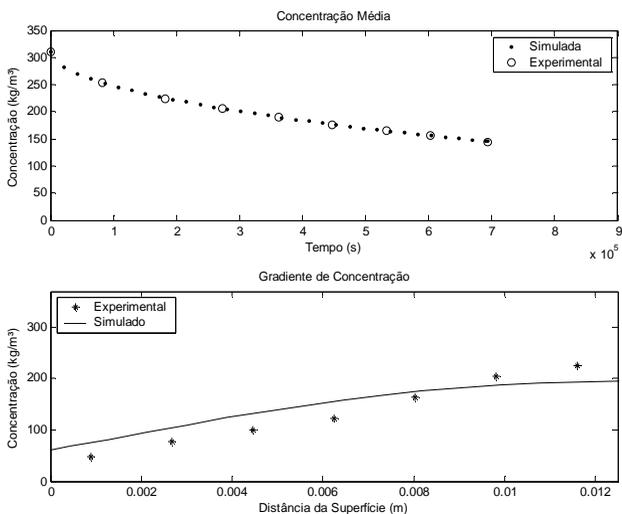


6

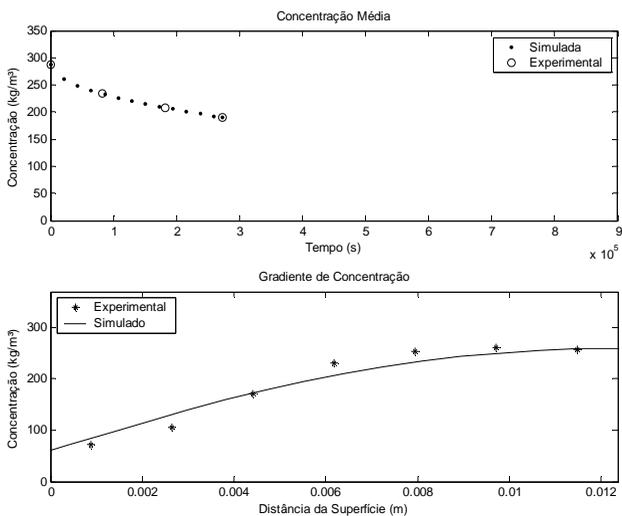


Muirapiranga / T = 70°C / UR = 60% - Carga 4

7

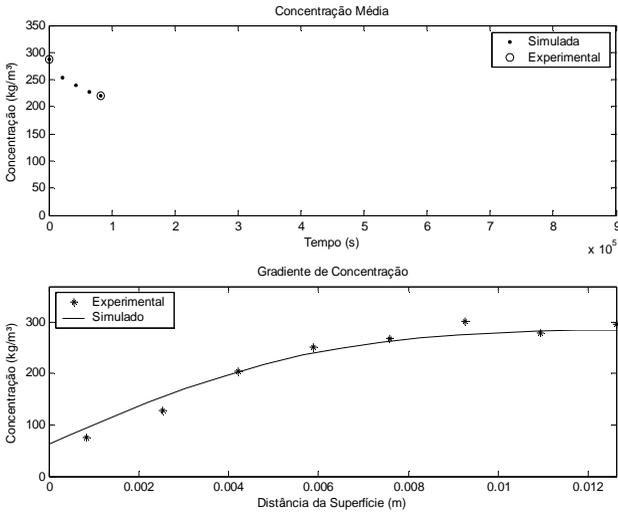


8

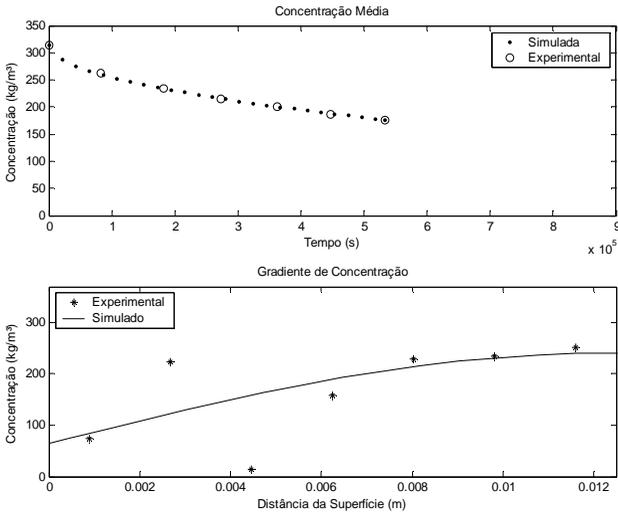


Muirapiranga / T = 70°C / UR = 60% - Carga 4

9

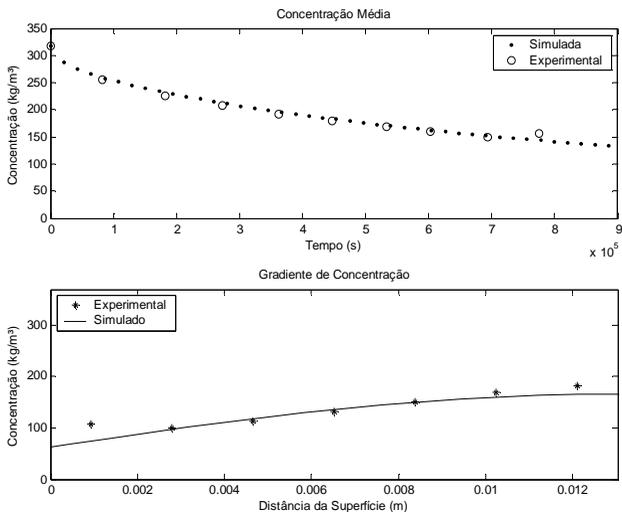


10



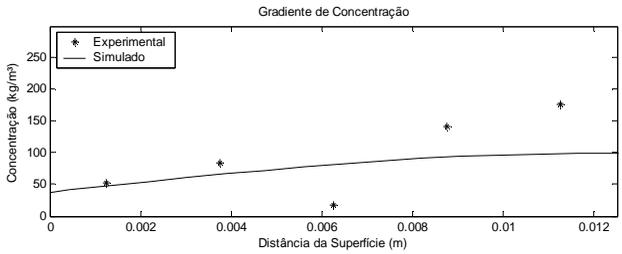
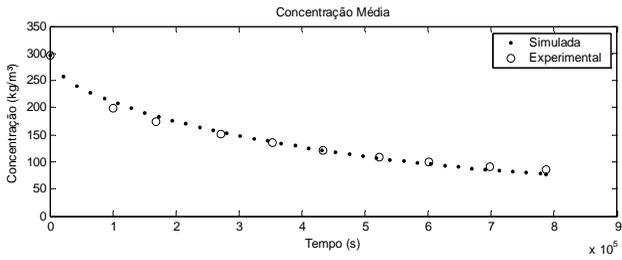
Muirapiranga / T = 70°C / UR = 60% - Carga 4

11

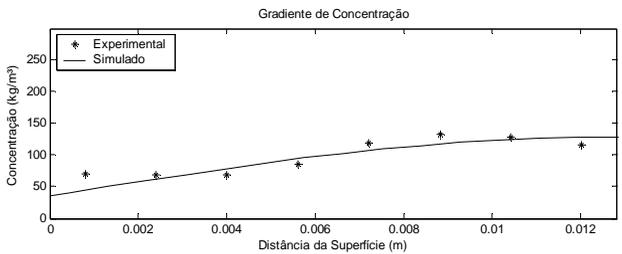
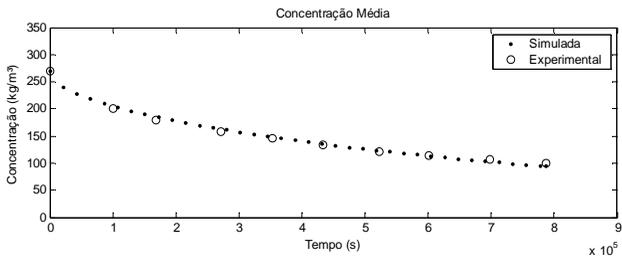


Muirapiranga / T = 70°C / UR = 20% - Carga 5

1

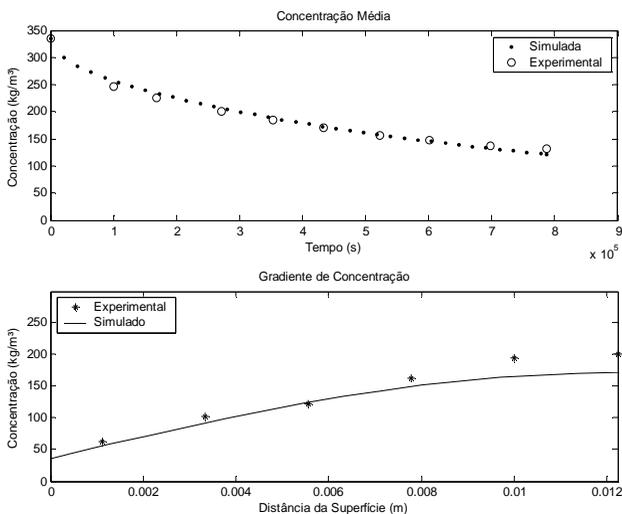


2

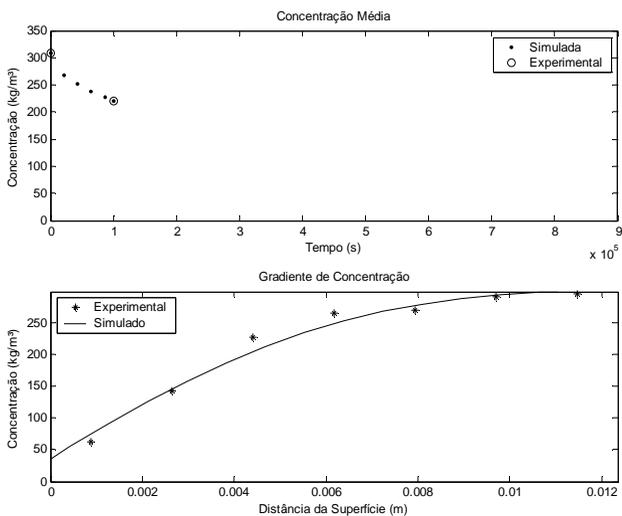


Muirapiranga / T = 70°C / UR = 20% - Carga 5

3

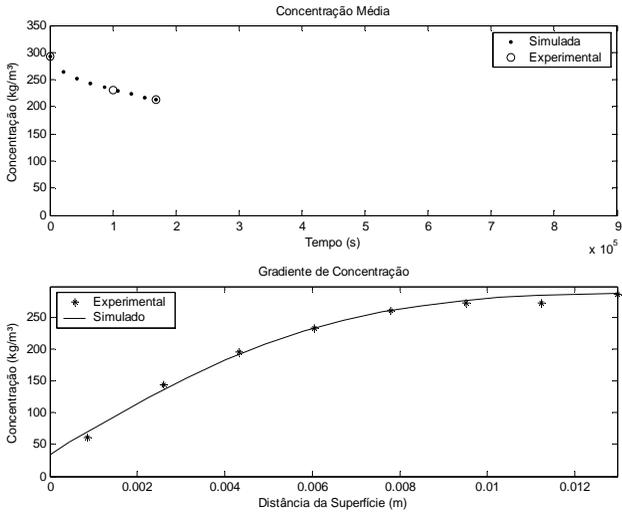


4

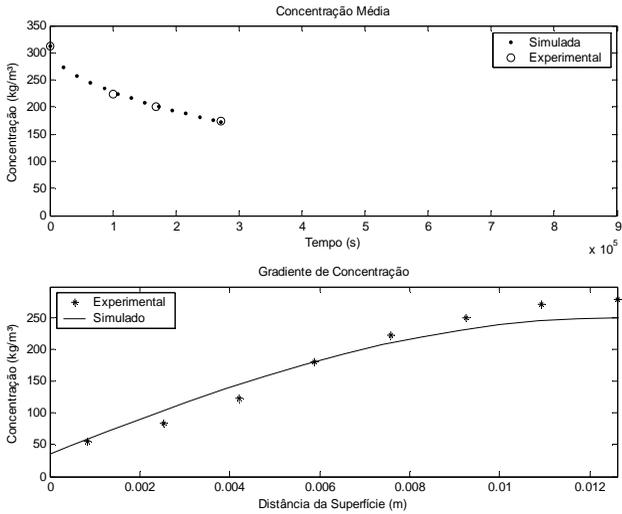


Muirapiranga / T = 70°C / UR = 20% - Carga 5

5

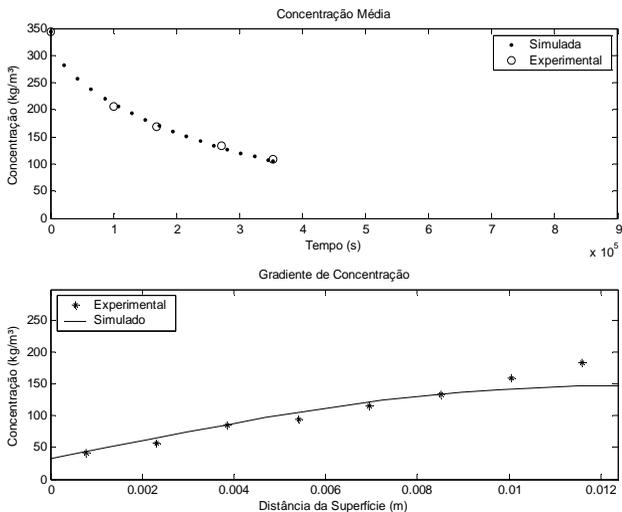


6

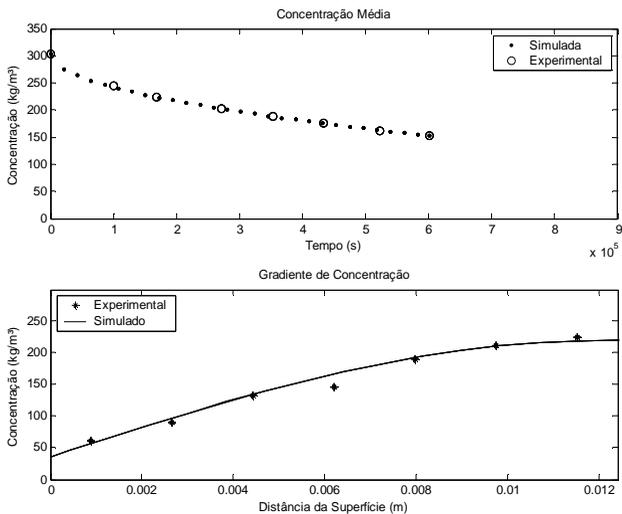


Muirapiranga / T = 70°C / UR = 20% - Carga 5

7

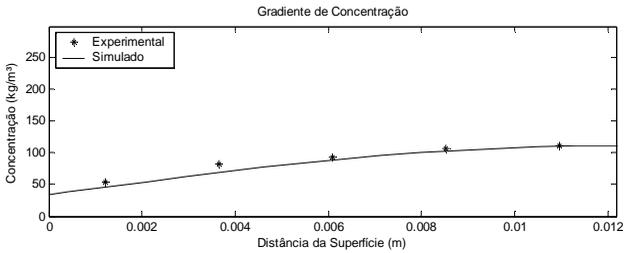
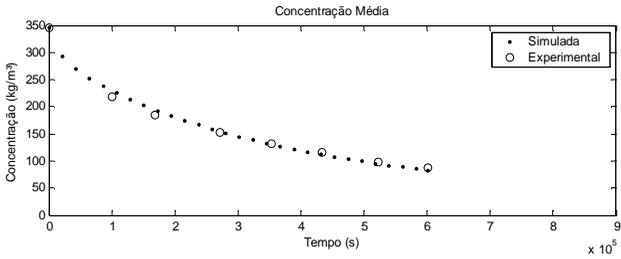


8

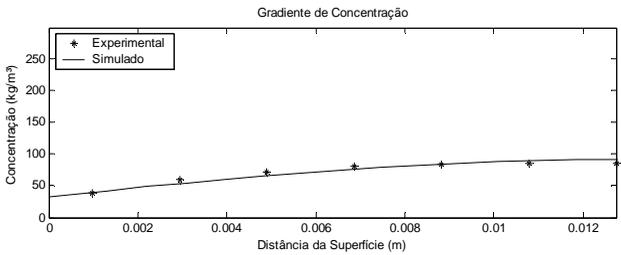
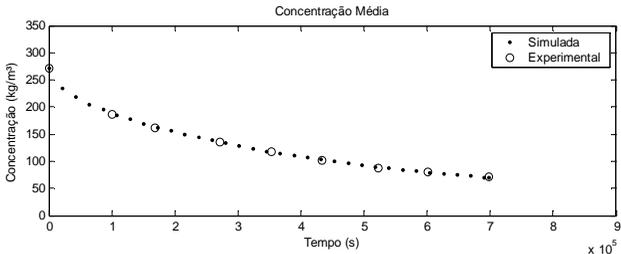


Muirapiranga / T = 70°C / UR = 20% - Carga 5

9

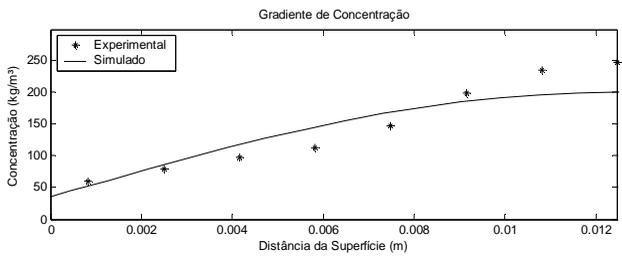
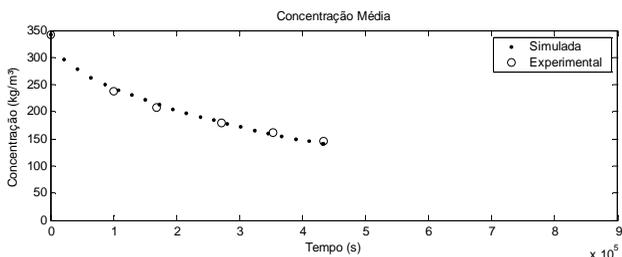


10



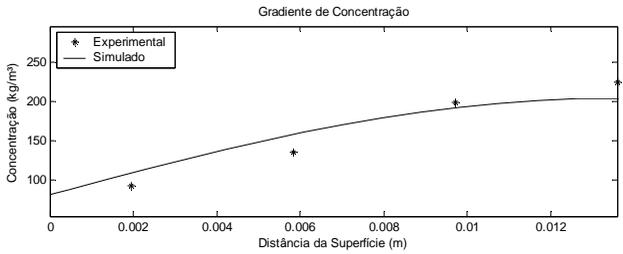
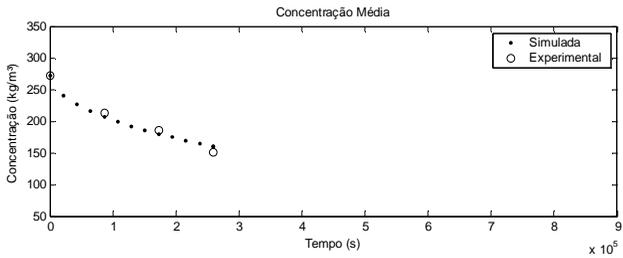
Muirapiranga / T = 70°C / UR = 20% - Carga 5

11

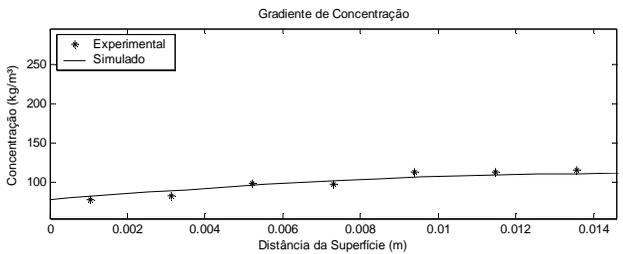
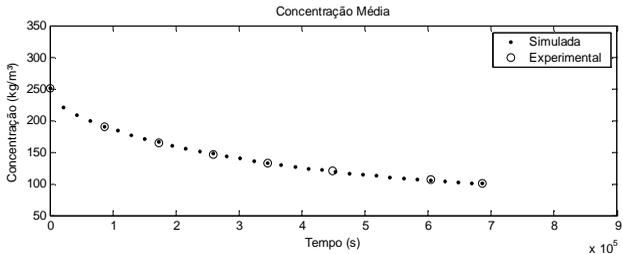


Timborana / T = 50°C / UR = 60% - Carga 1

1

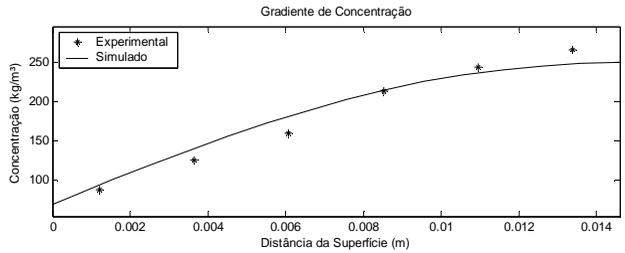
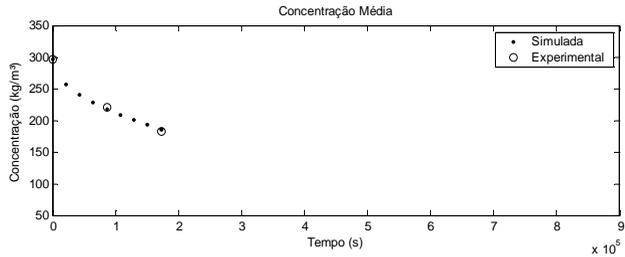


2

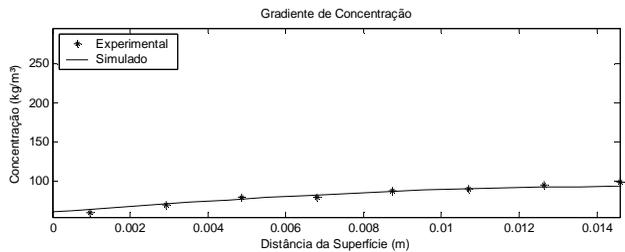
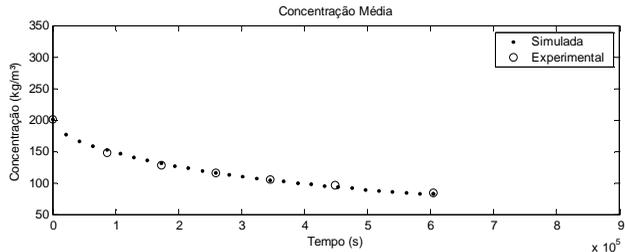


Timborana / T = 50°C / UR = 60% - Carga 1

3

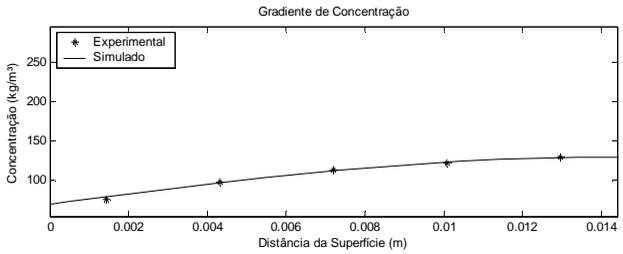
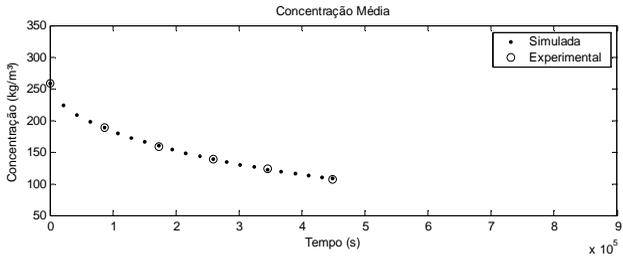


4

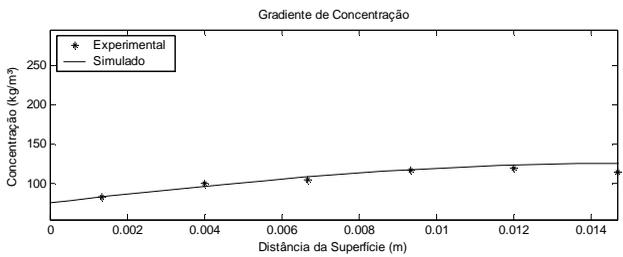
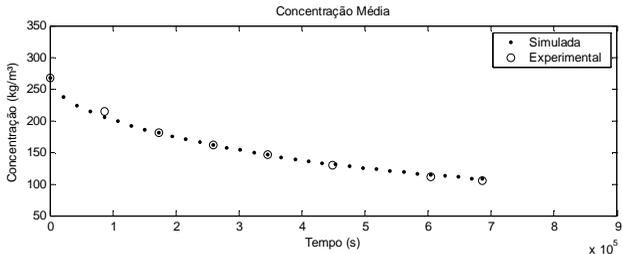


Timborana / T = 50°C / UR = 60% - Carga 1

5

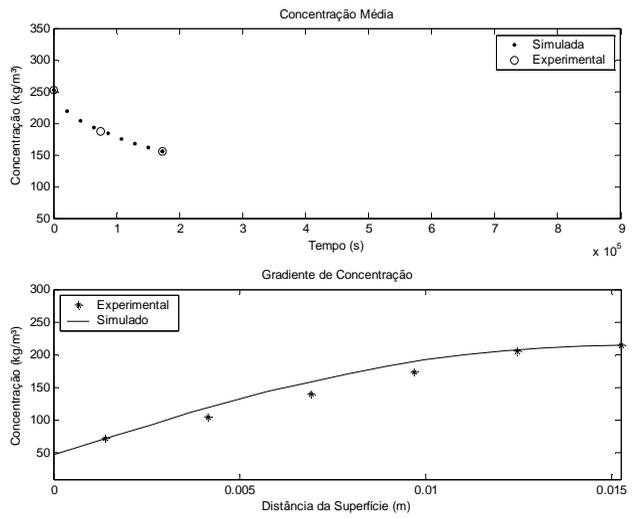


6

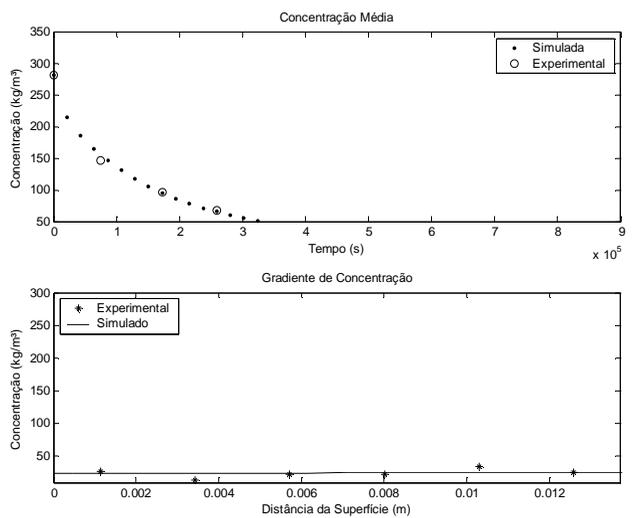


Timborana / T = 50°C / UR = 20% - Carga 2

1

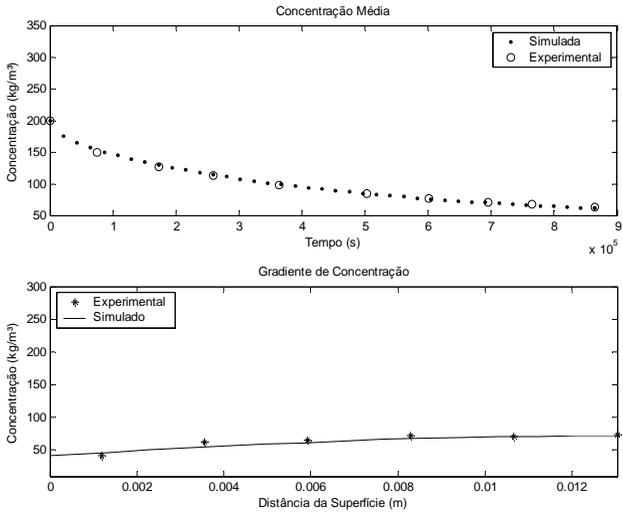


2

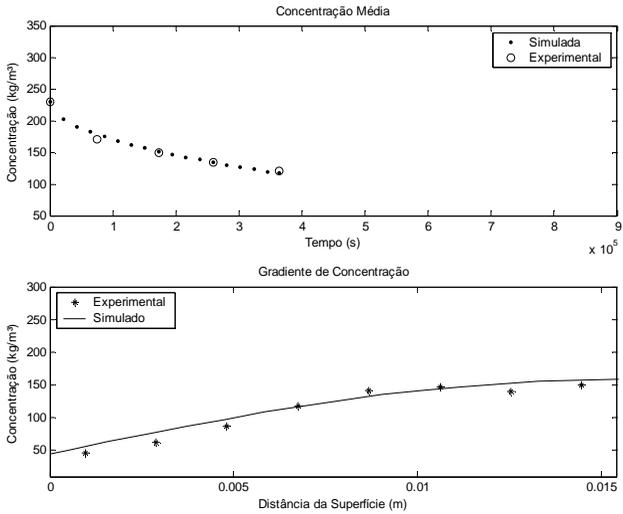


Timborana / T = 50°C / UR = 20% - Carga 2

3

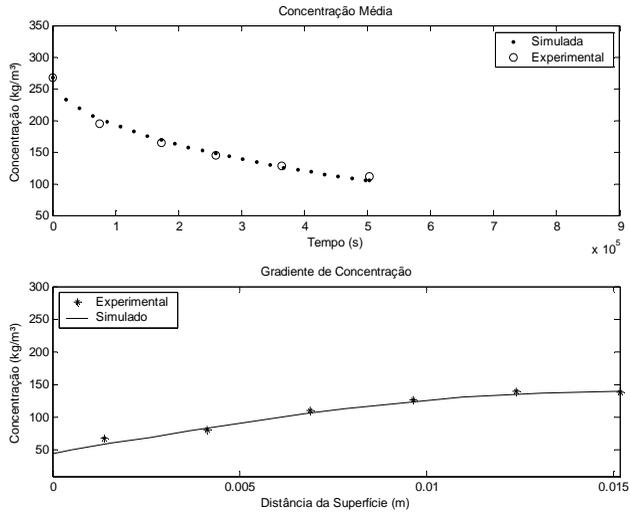


4

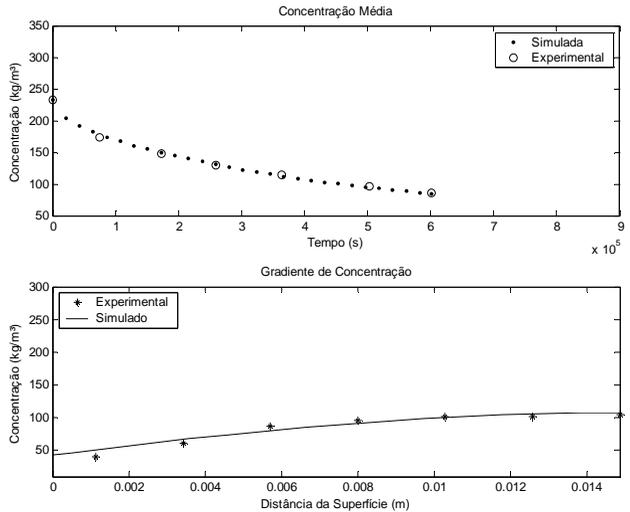


Timborana / T = 50°C / UR = 20% - Carga 2

5

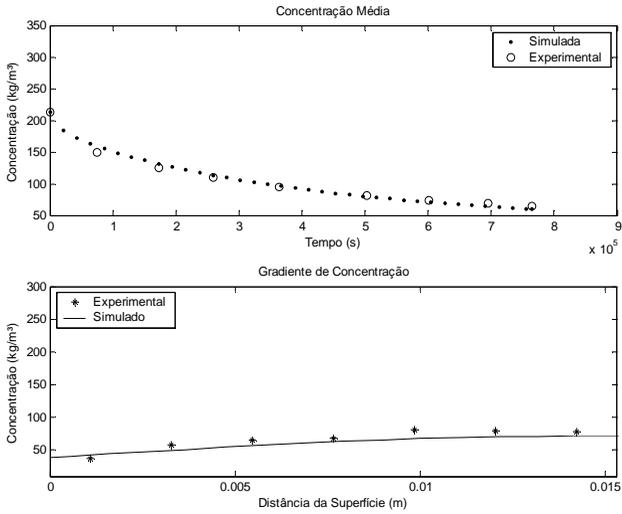


6

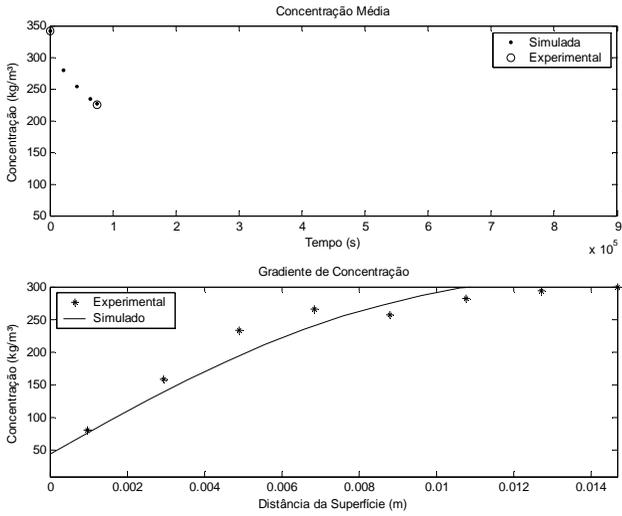


Timborana / T = 50°C / UR = 20% - Carga 2

7

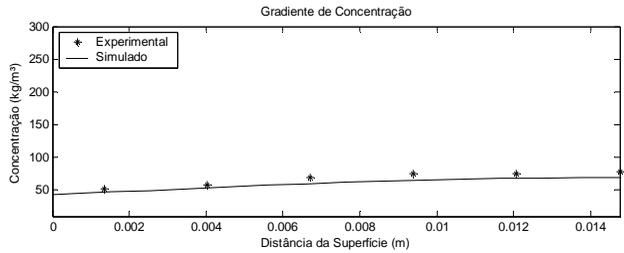
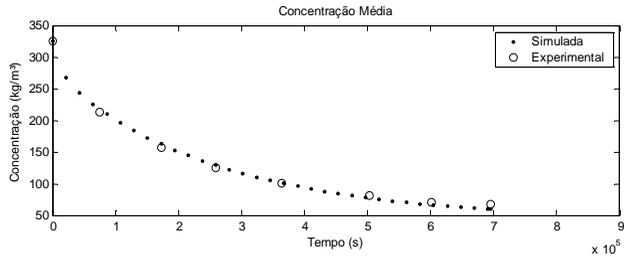


8

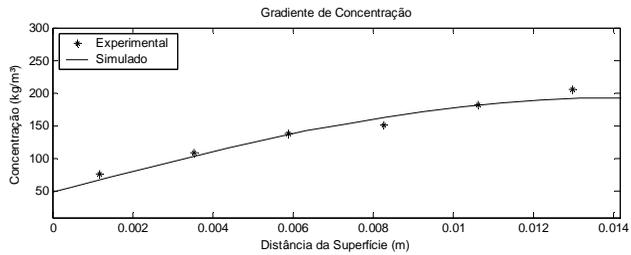
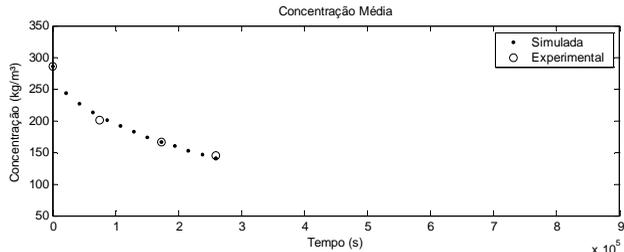


Timborana / T = 50°C / UR = 20% - Carga 2

9

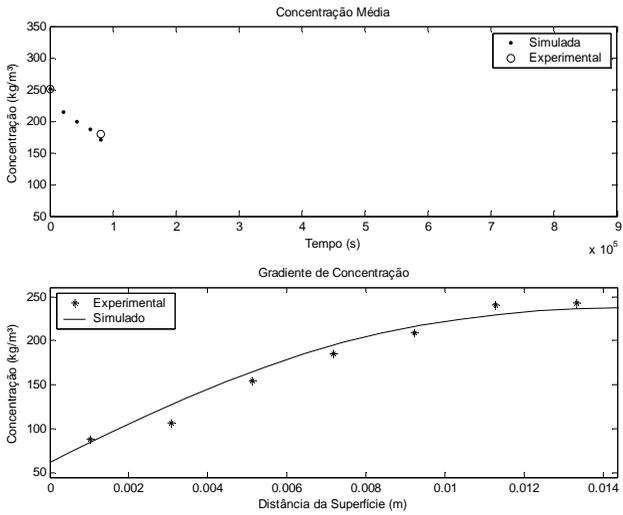


10

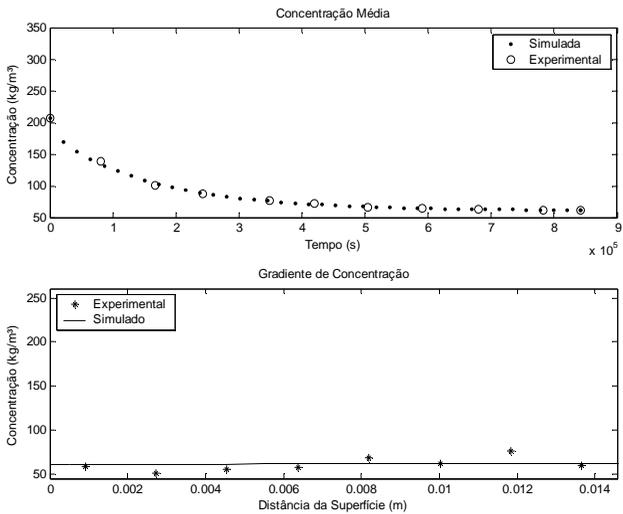


Timborana / T = 70°C / UR = 60% - Carga 3

1

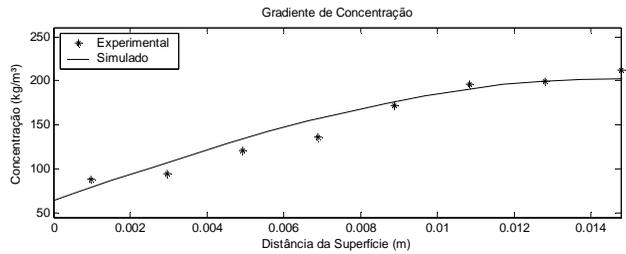
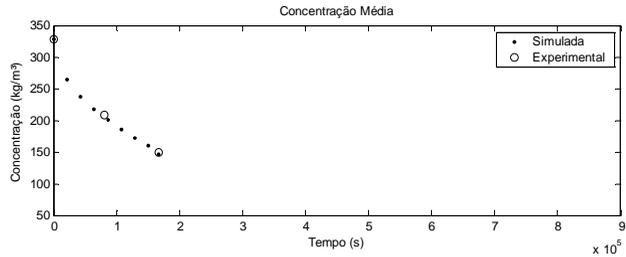


2

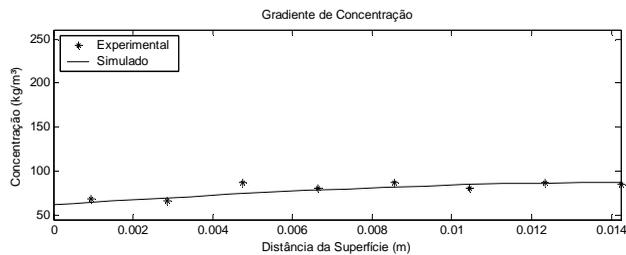
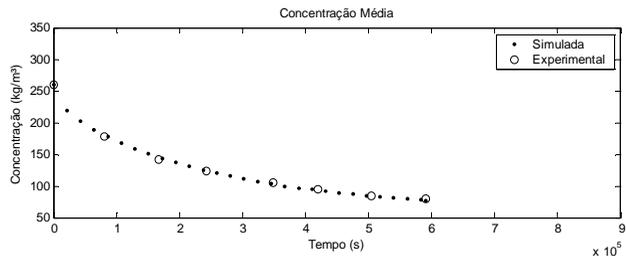


Timborana / T = 70°C / UR = 60% - Carga 3

3

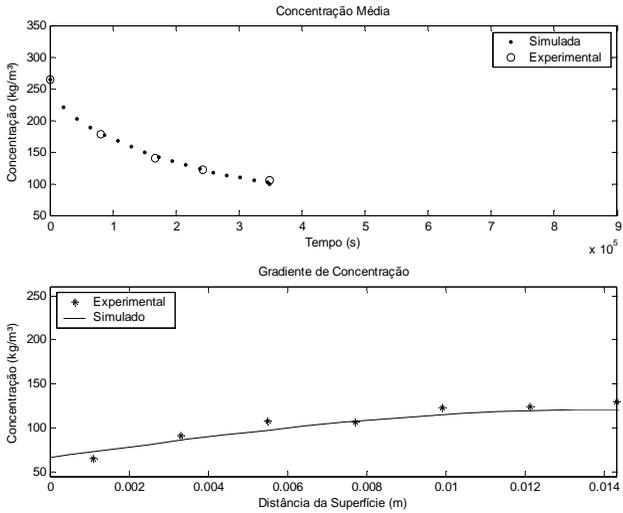


4

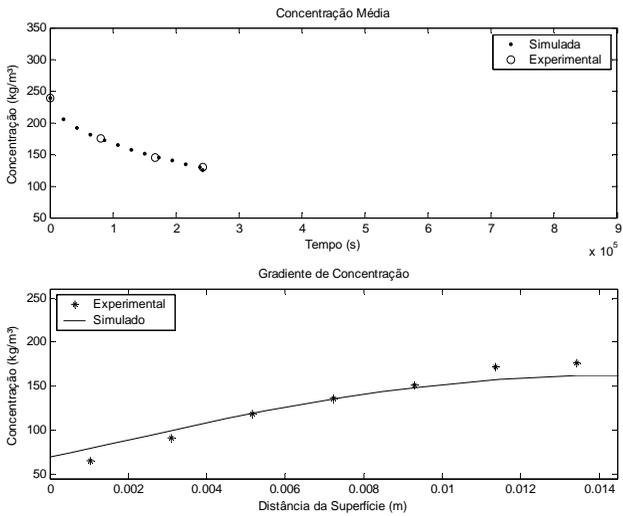


Timborana / T = 70°C / UR = 60% - Carga 3

5

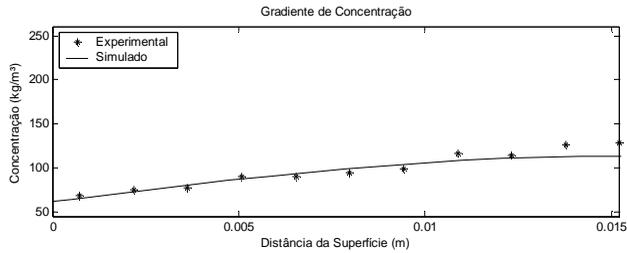
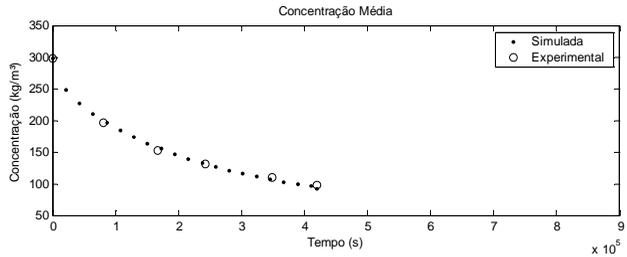


6

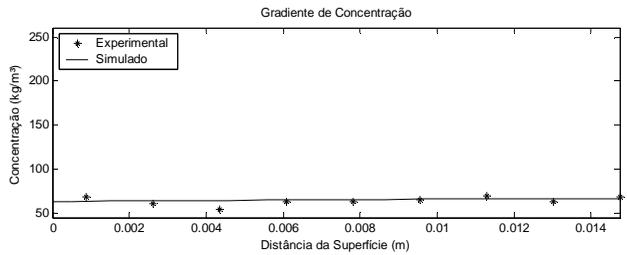
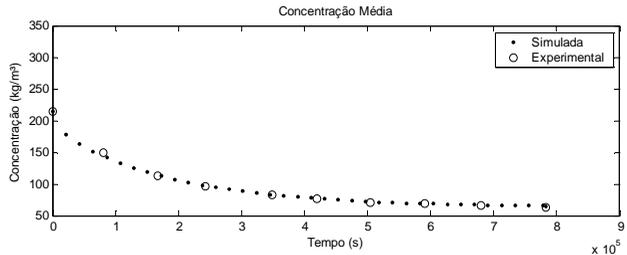


Timborana / T = 70°C / UR = 60% - Carga 3

7

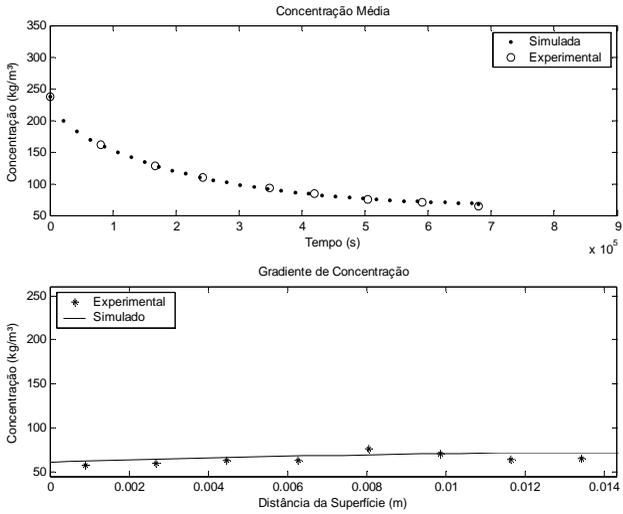


8

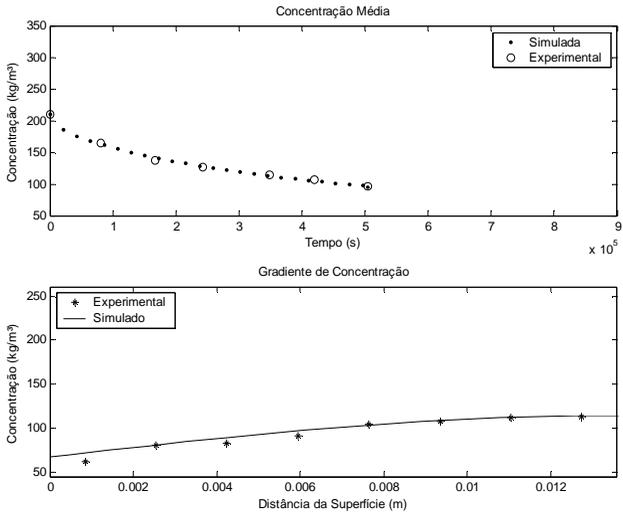


Timborana / T = 70°C / UR = 60% - Carga 3

9

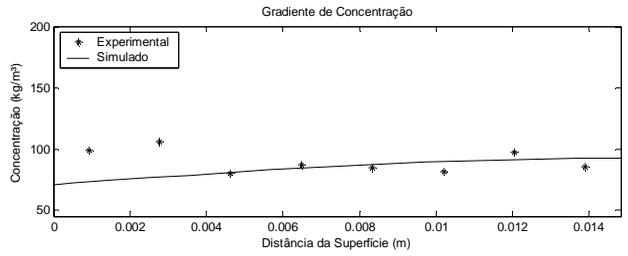
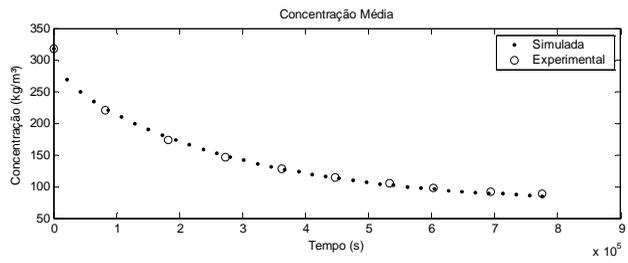


10

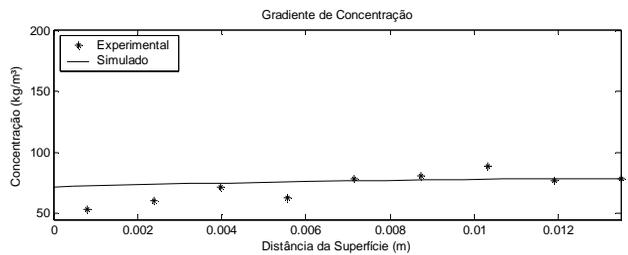
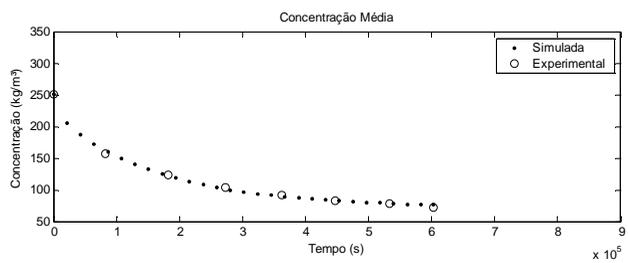


Timborana / T = 70°C / UR = 60% - Carga 4

1

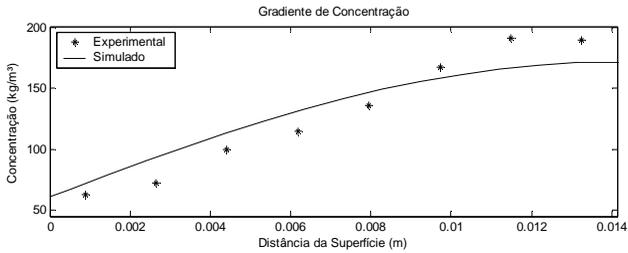
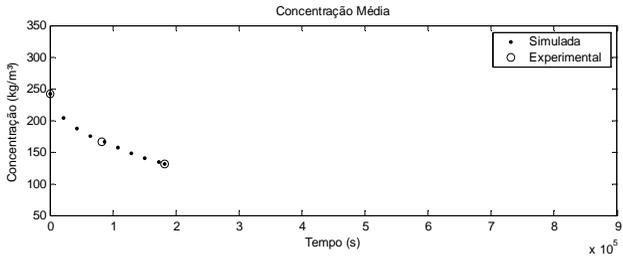


2

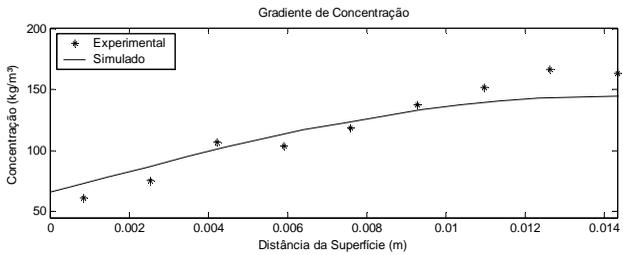
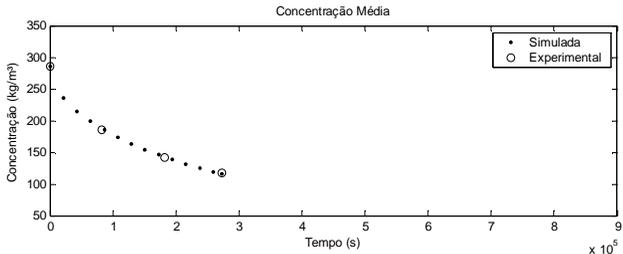


Timborana / T = 70°C / UR = 60% - Carga 4

3

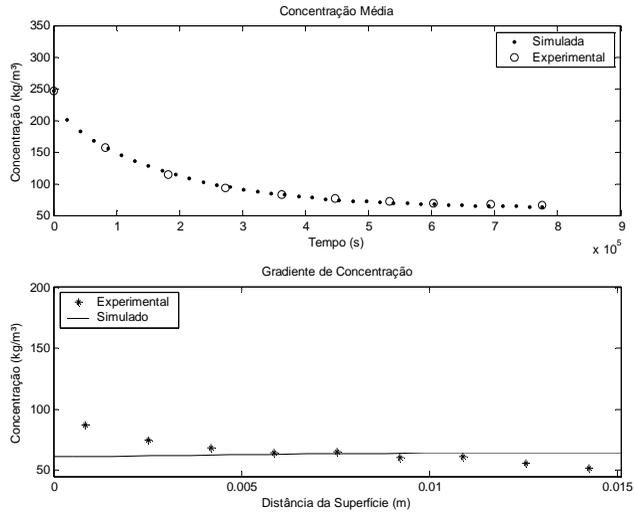


4

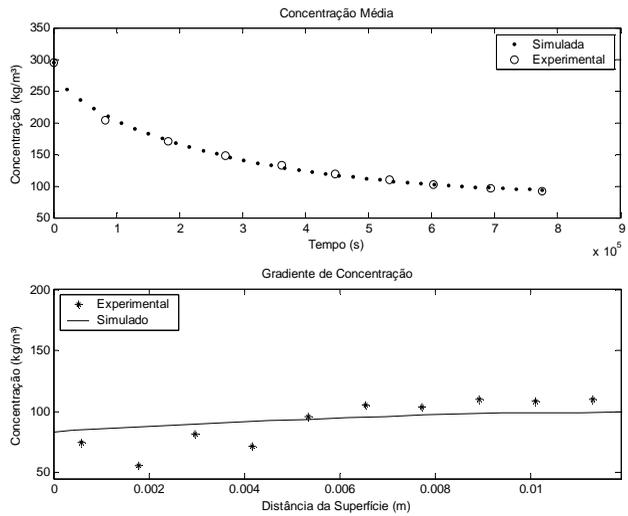


Timborana / T = 70°C / UR = 60% - Carga 4

5

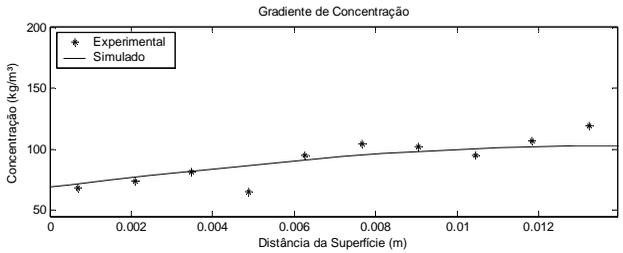
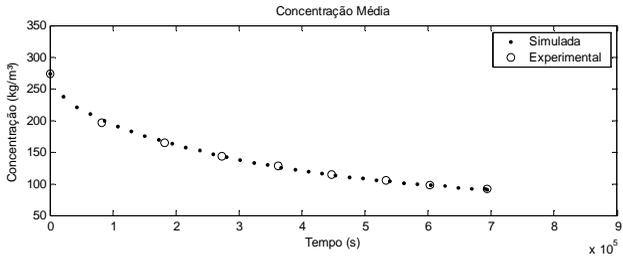


6

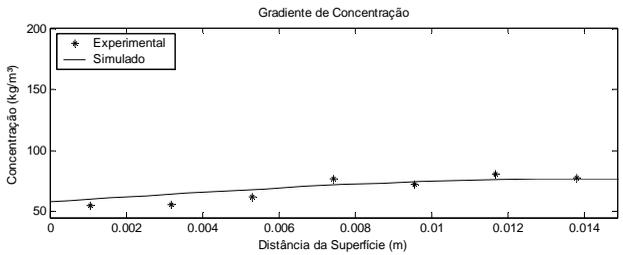
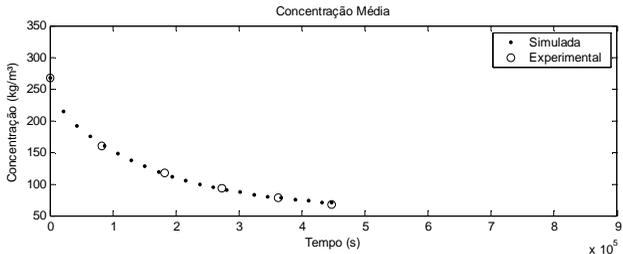


Timborana / T = 70°C / UR = 60% - Carga 4

7

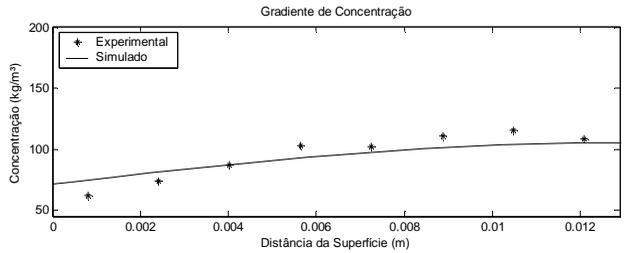
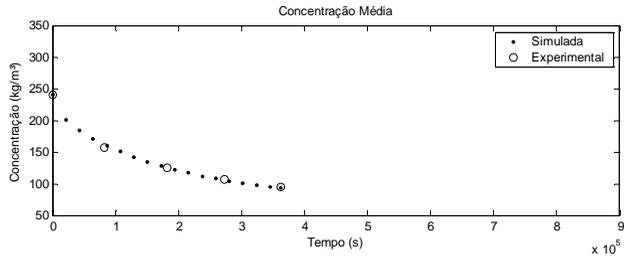


8

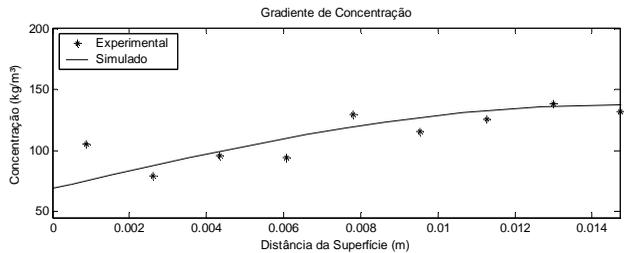
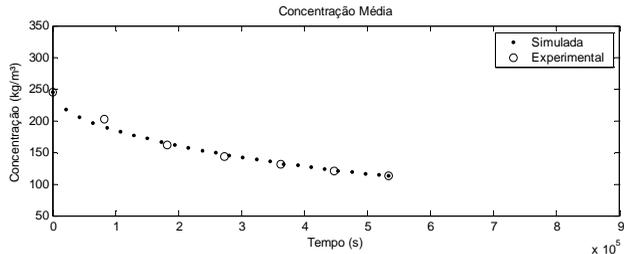


Timborana / T = 70°C / UR = 60% - Carga 4

9

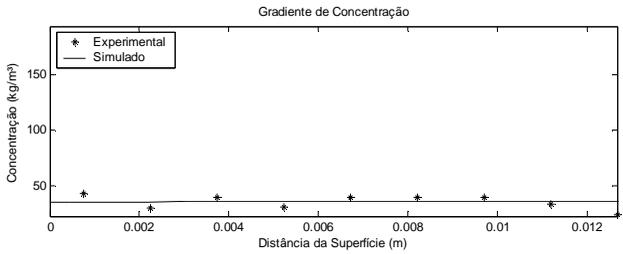
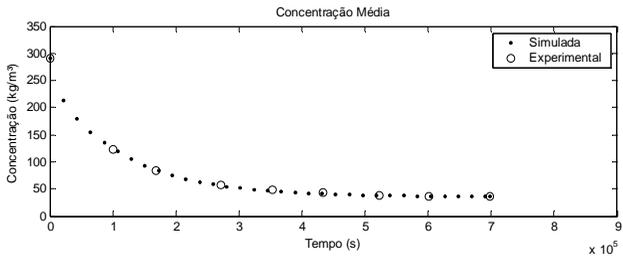


10

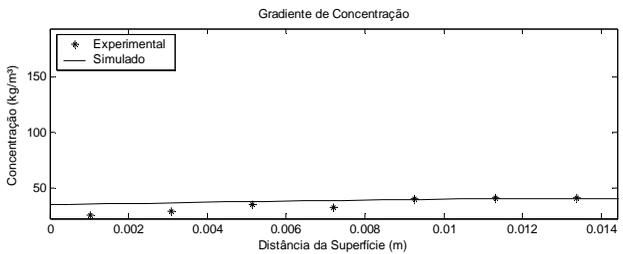
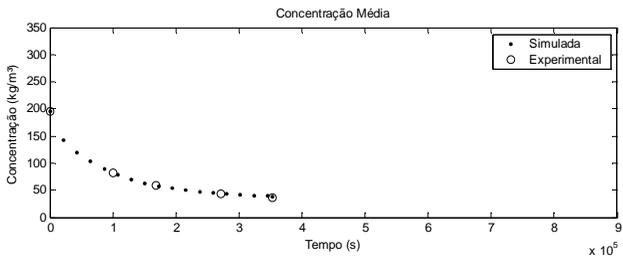


Timborana / T = 70°C / UR = 20% - Carga 5

1

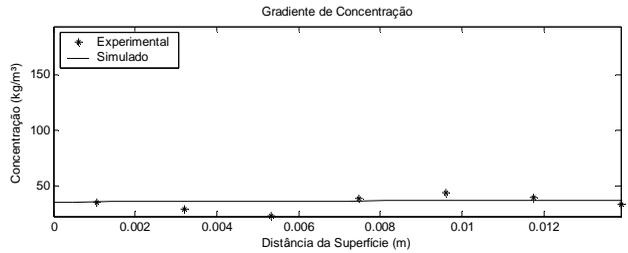
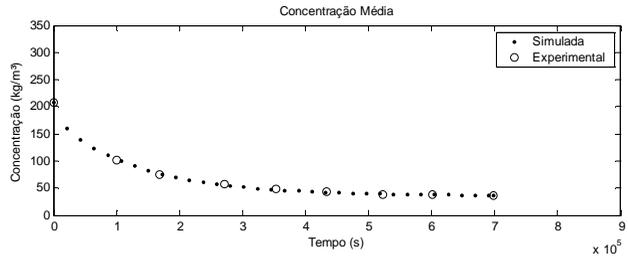


2

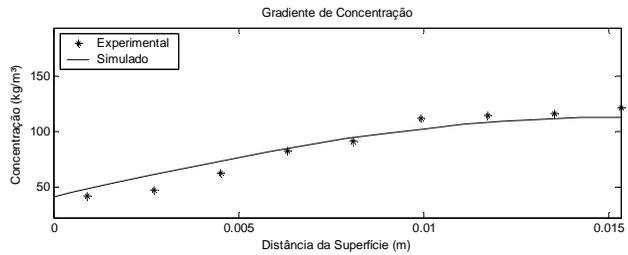
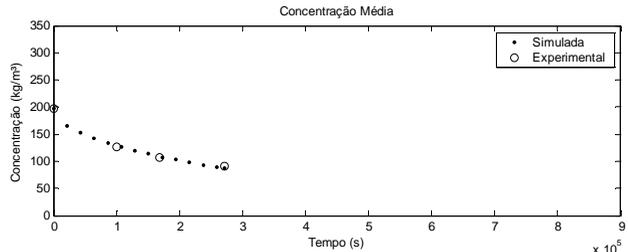


Timborana / T = 70°C / UR = 20% - Carga 5

3

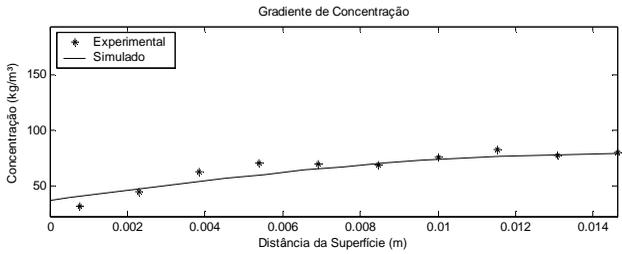
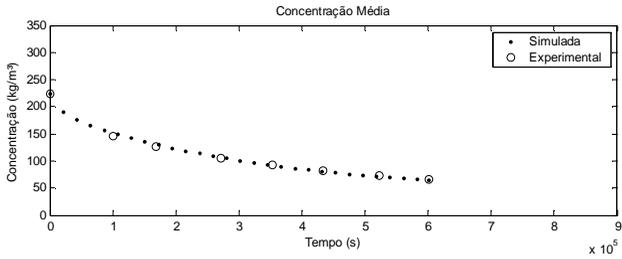


4

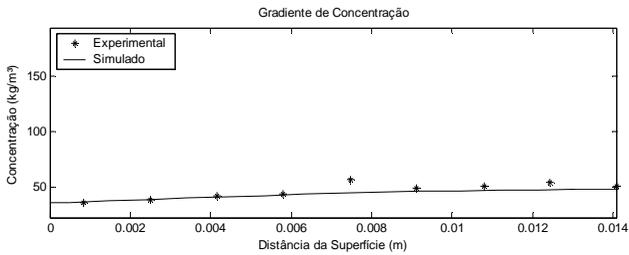
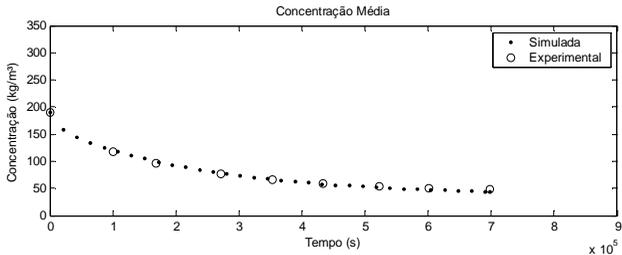


Timborana / T = 70°C / UR = 20% - Carga 5

5

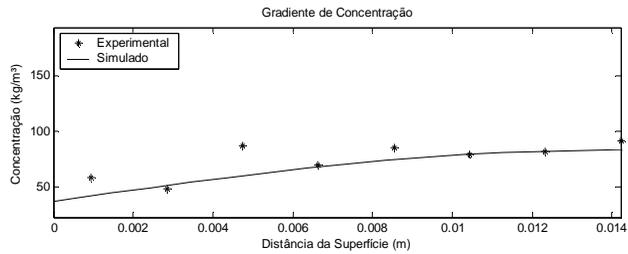
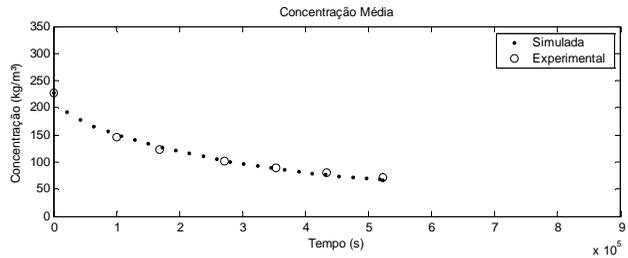


6

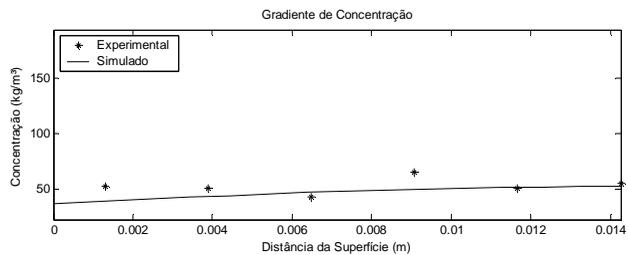
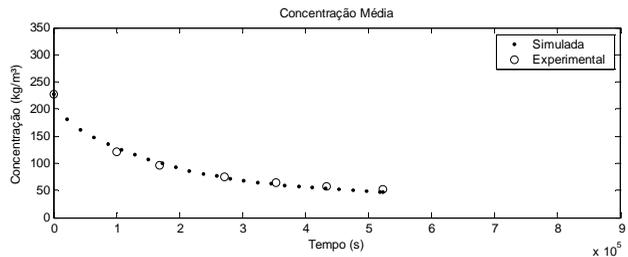


Timborana / T = 70°C / UR = 20% - Carga 5

7

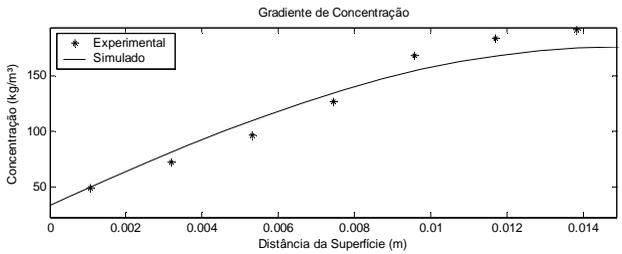
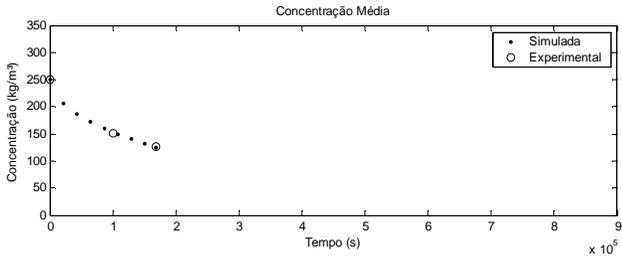


8

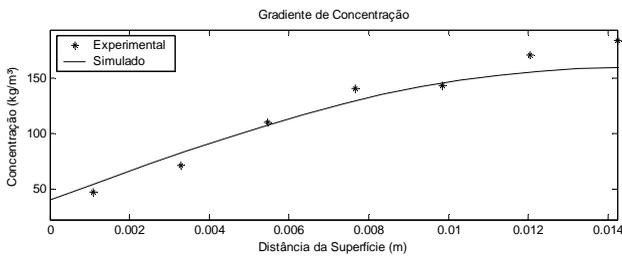
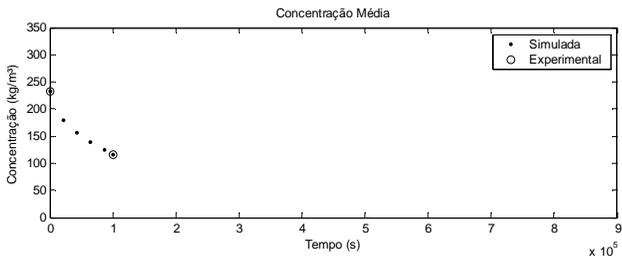


Timborana / T = 70°C / UR = 20% - Carga 5

9

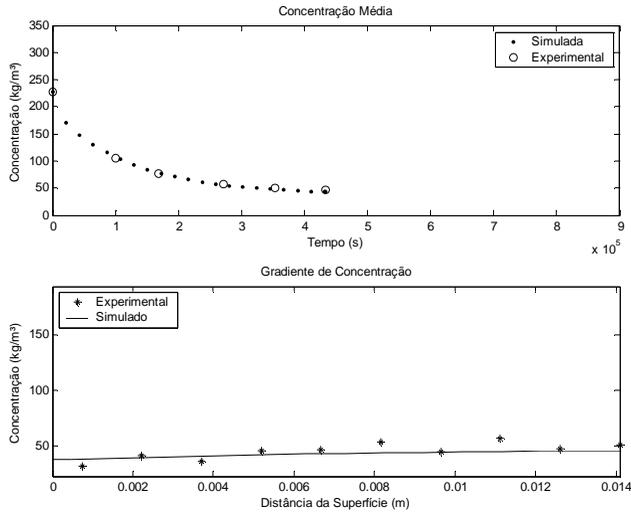


10

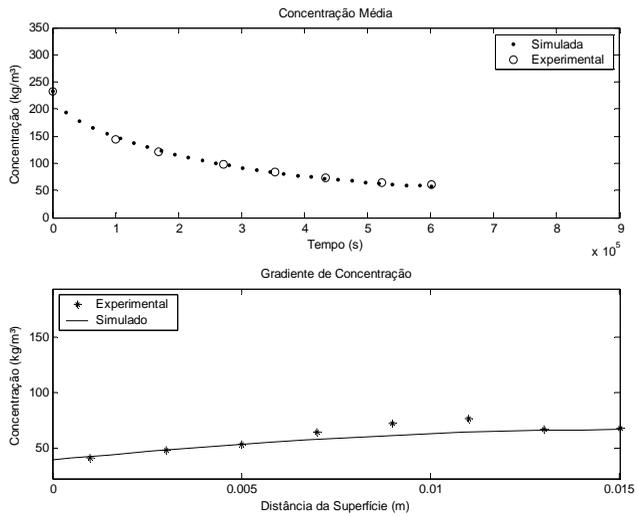


Timborana / T = 70°C / UR = 20% - Carga 5

11

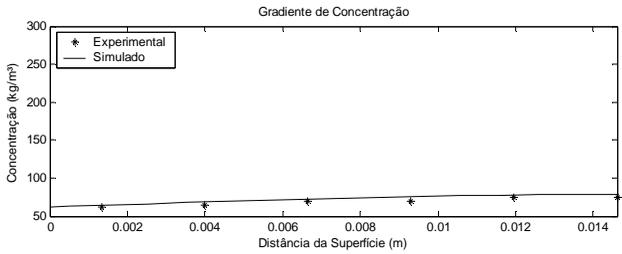
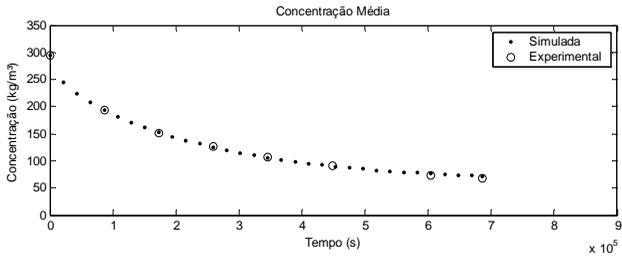


12

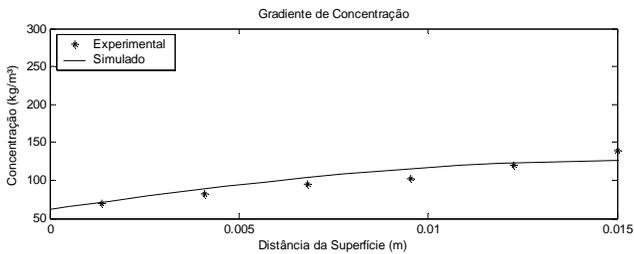
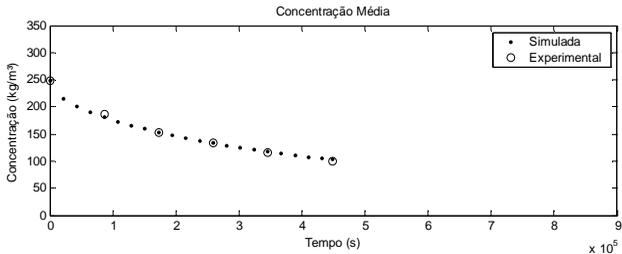


Andiroba / T = 50°C / UR = 60% - Carga 1

1

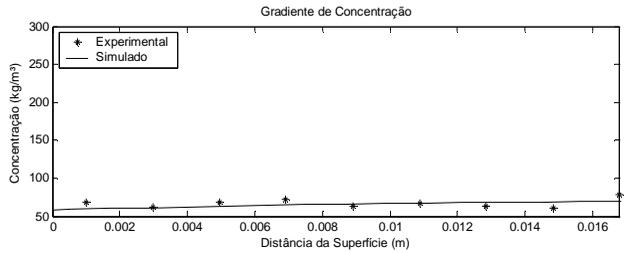
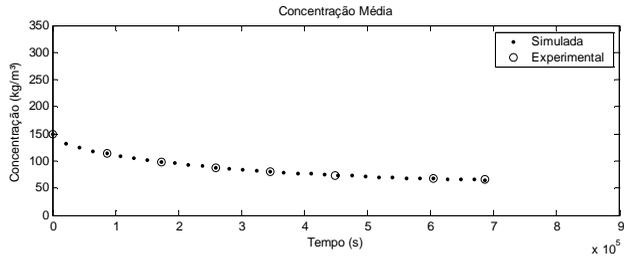


2

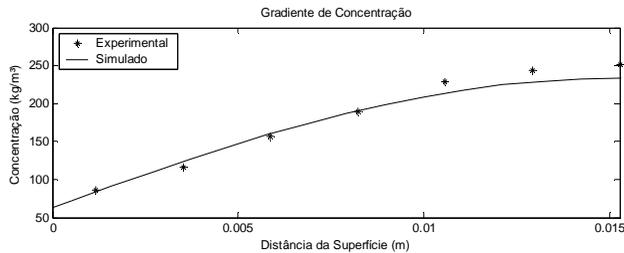
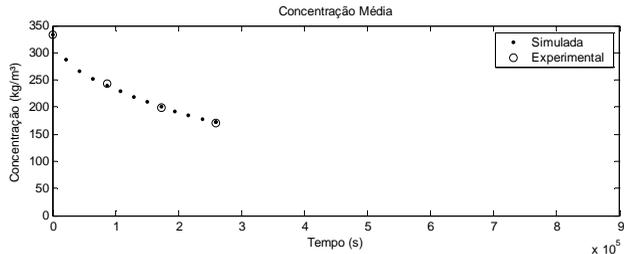


Andiroba / T = 50°C / UR = 60% - Carga 1

3

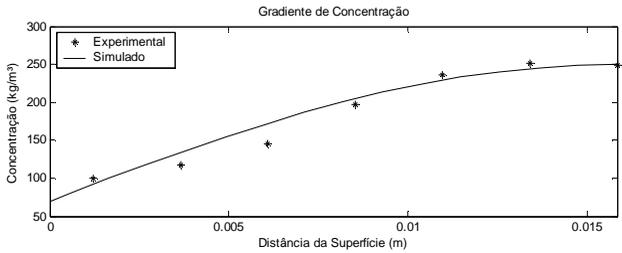
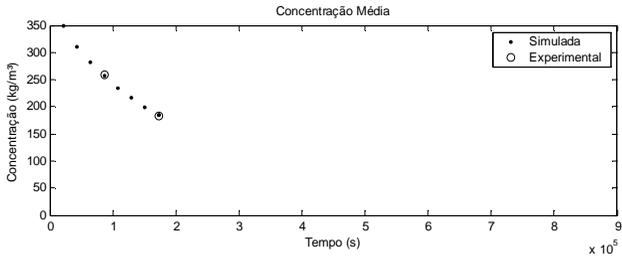


4

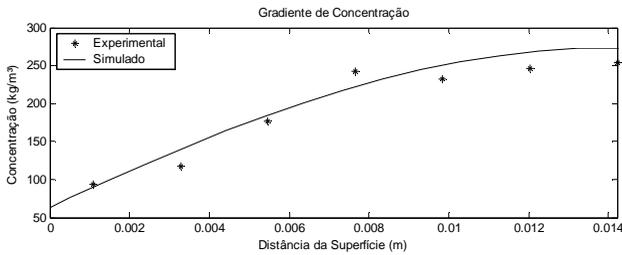
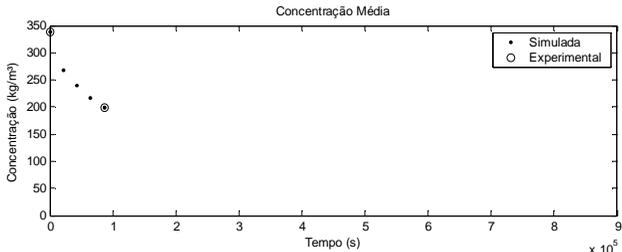


Andiroba / T = 50°C / UR = 60% - Carga 1

5

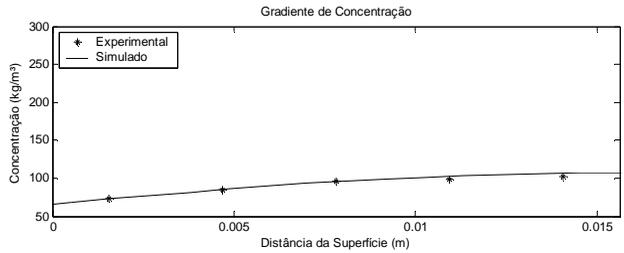
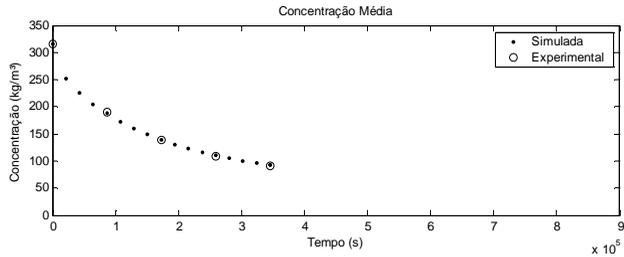


6

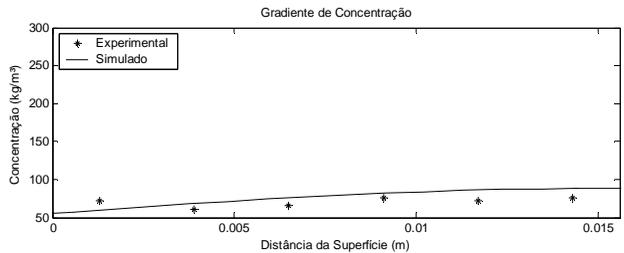
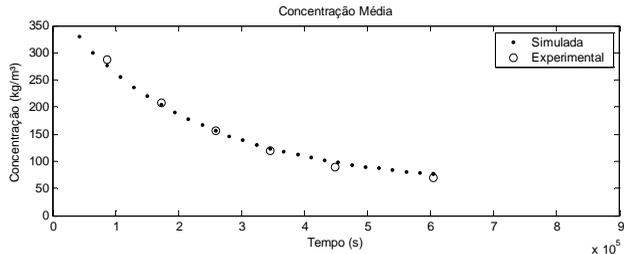


Andiroba / T = 50°C / UR = 60% - Carga 1

7

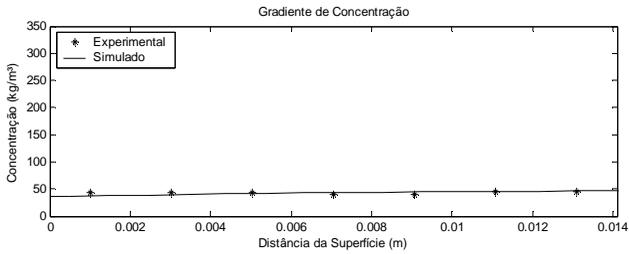
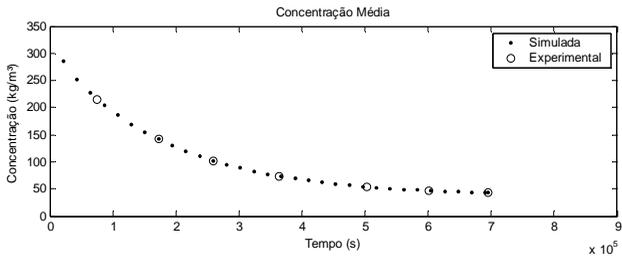


8

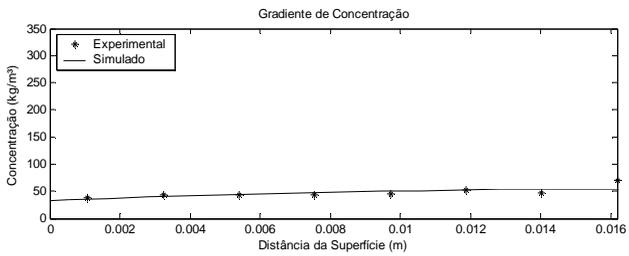
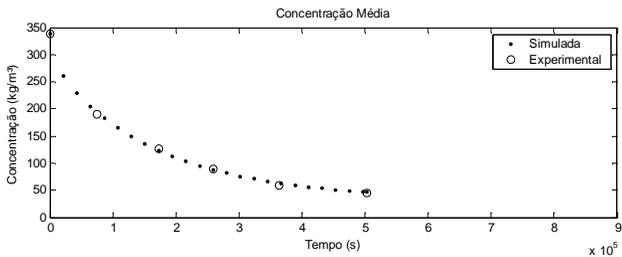


Andiroba / T = 50°C / UR = 20% - Carga 2

1

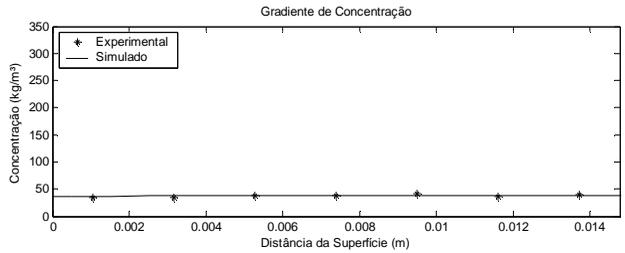
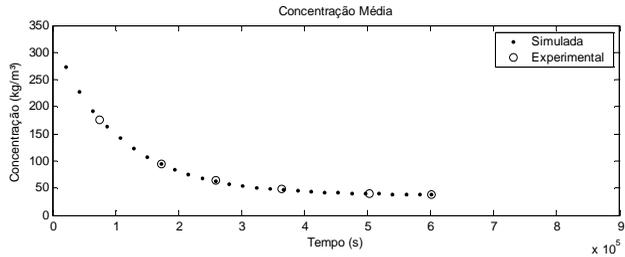


2

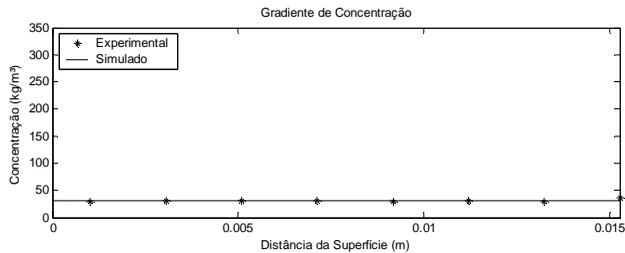
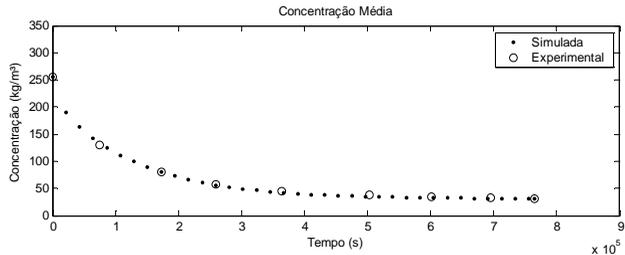


Andiroba / T = 50°C / UR = 20% - Carga 2

3

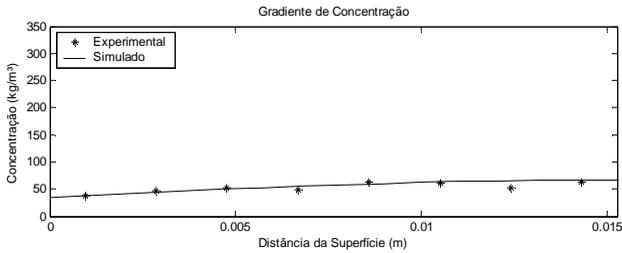
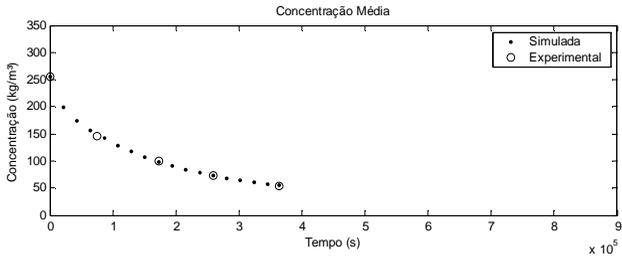


4

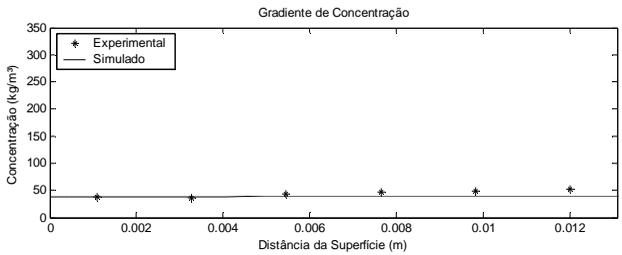
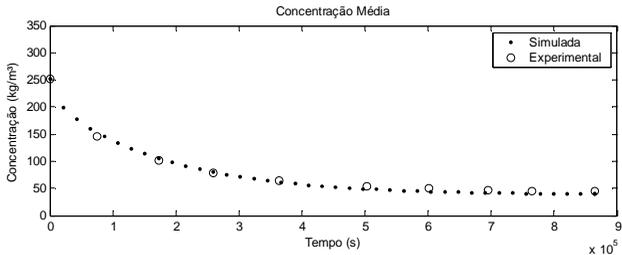


Andiroba / T = 50°C / UR = 20% - Carga 2

5

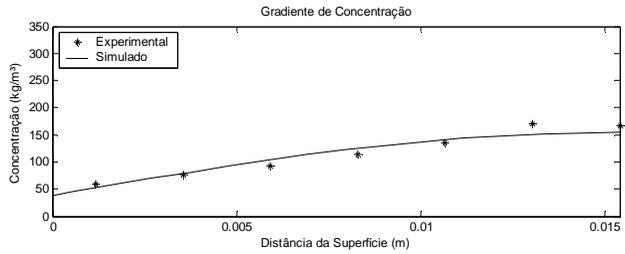
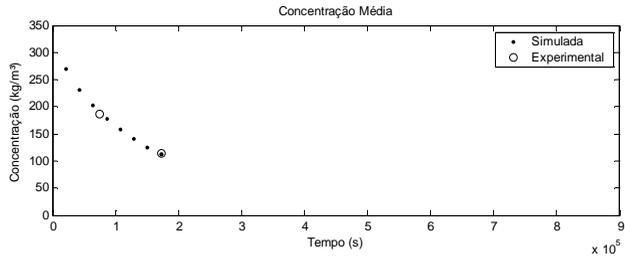


6

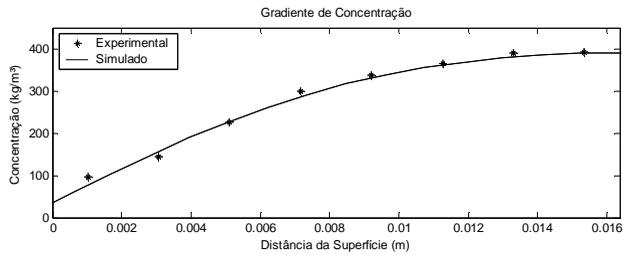
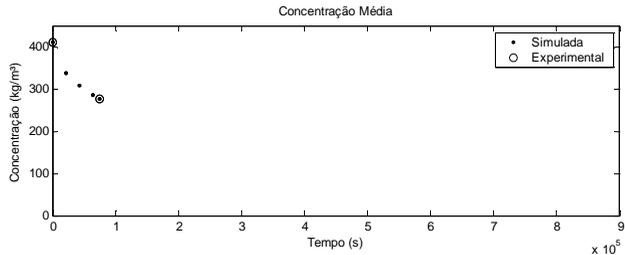


Andiroba / T = 50°C / UR = 20% - Carga 2

7

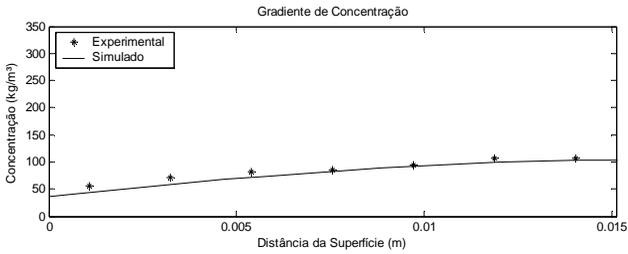
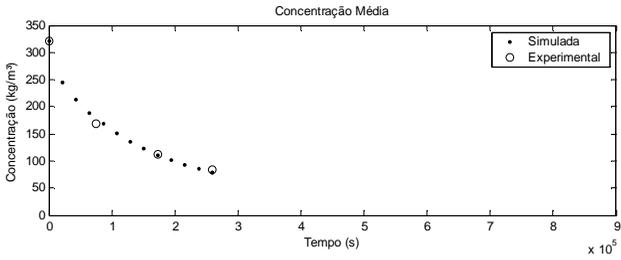


8



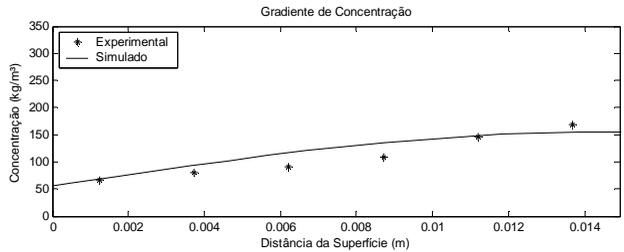
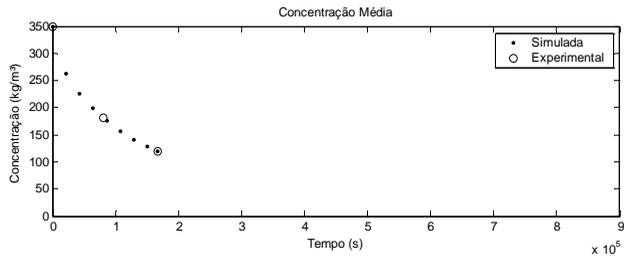
Andiroba / T = 50°C / UR = 20% - Carga 2

9

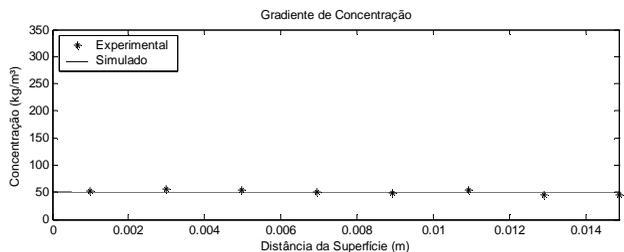
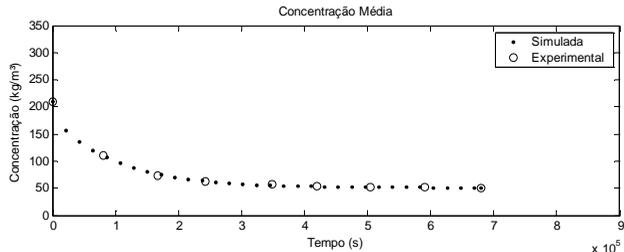


Andiroba / T = 70°C / UR = 60% - Carga 3

1

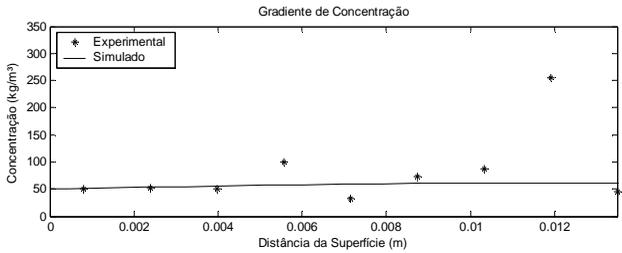
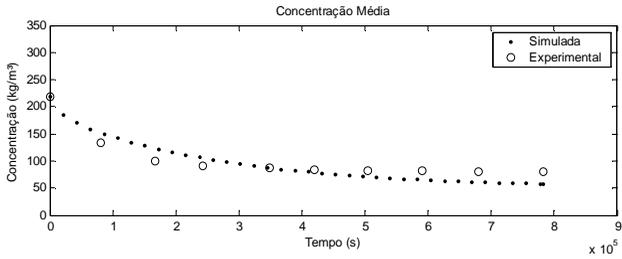


2

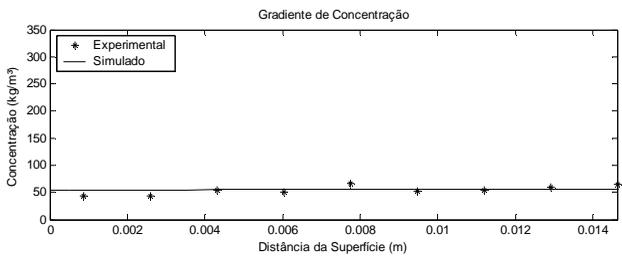
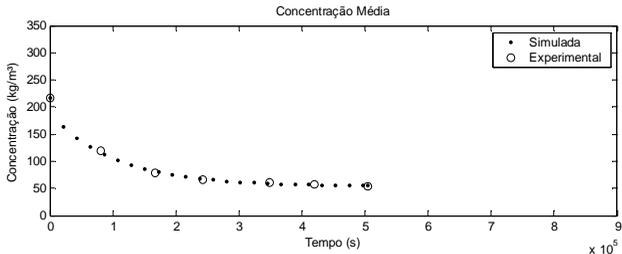


Andiroba / T = 70°C / UR = 60% - Carga 3

3

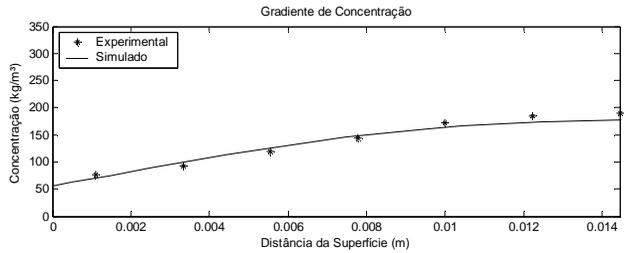
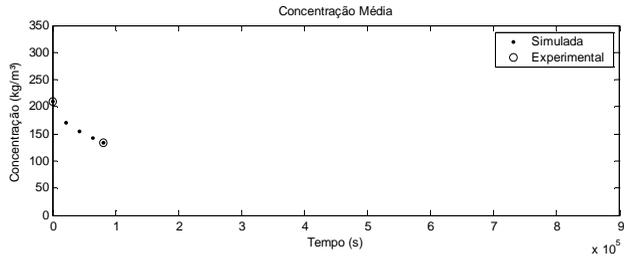


4

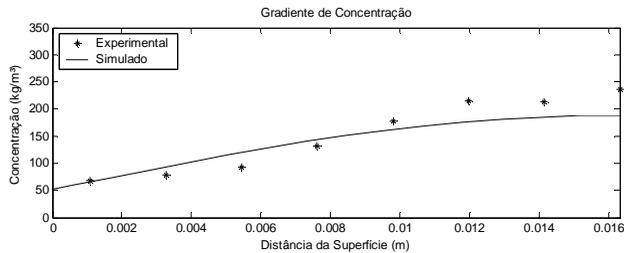
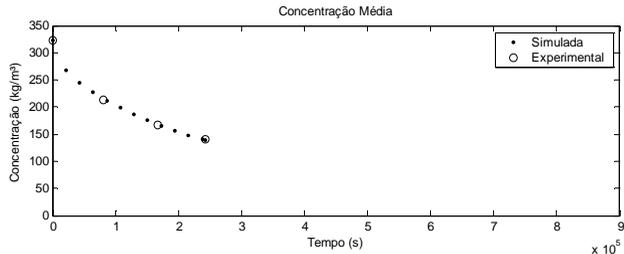


Andiroba / T = 70°C / UR = 60% - Carga 3

5

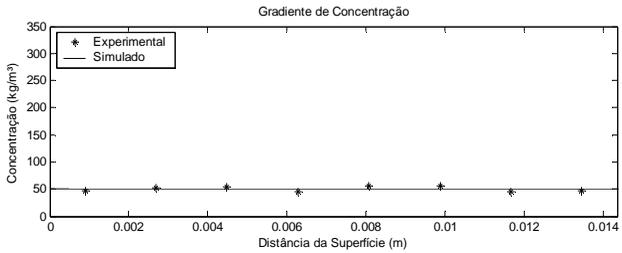
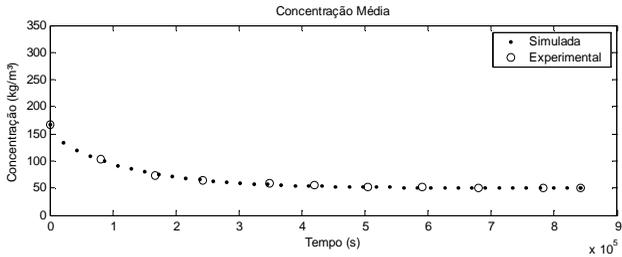


6

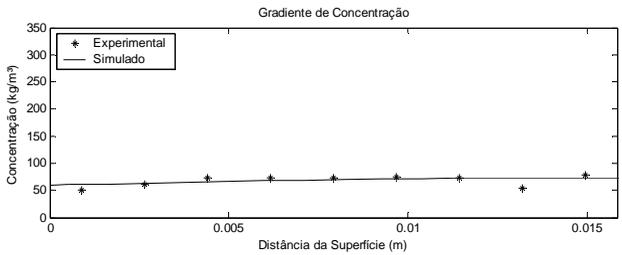
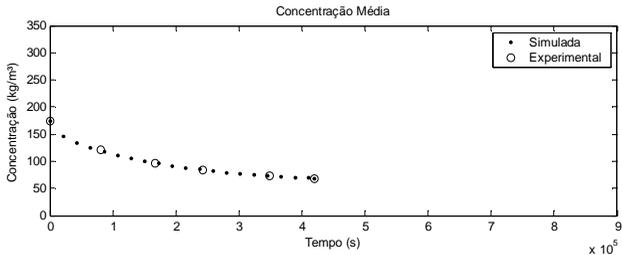


Andiroba / T = 70°C / UR = 60% - Carga 3

7

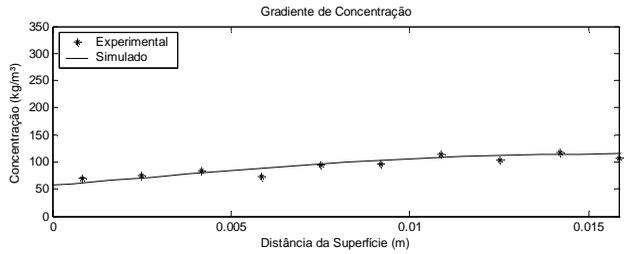
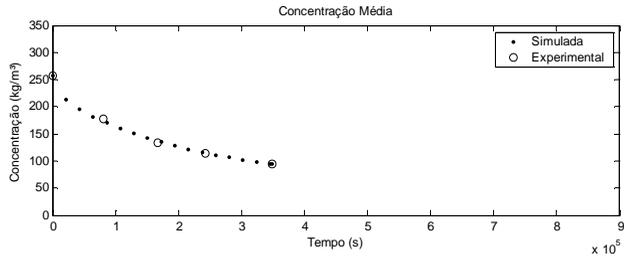


8

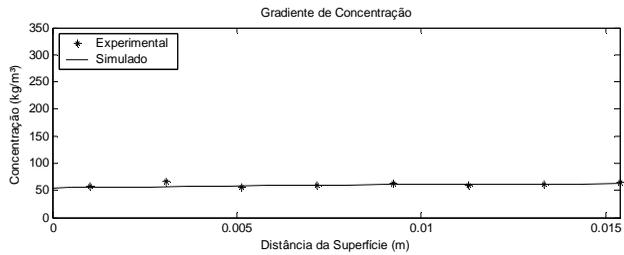
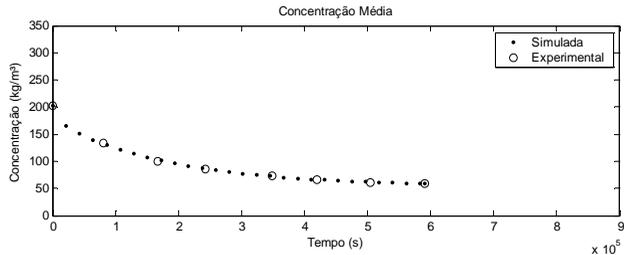


Andiroba / T = 70°C / UR = 60% - Carga 3

9

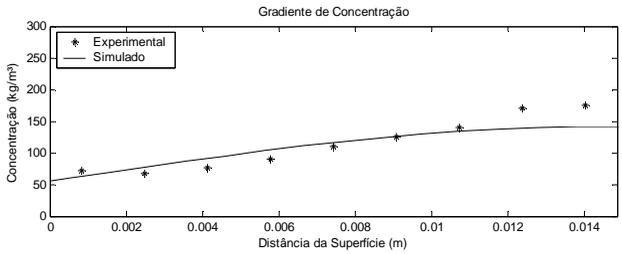
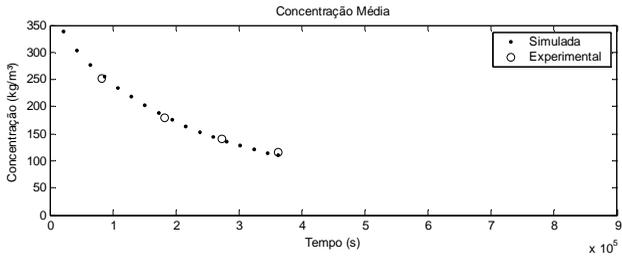


10

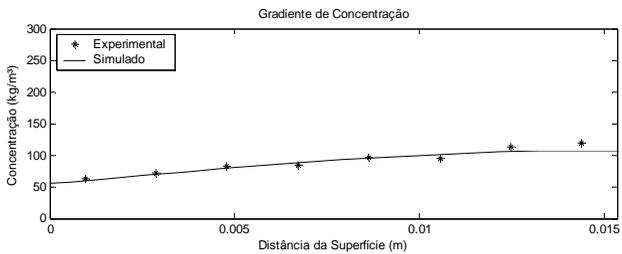
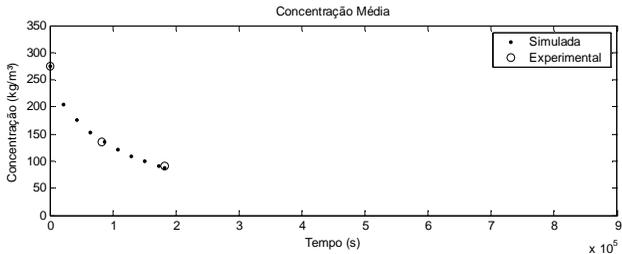


Andiroba / T = 70°C / UR = 60% - Carga 4

1

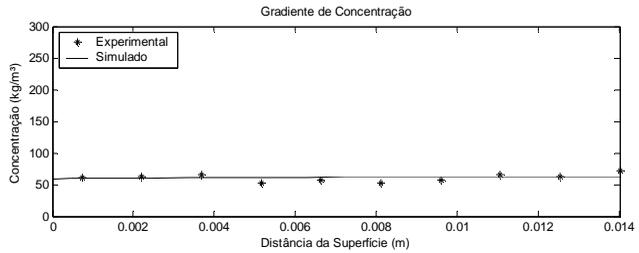
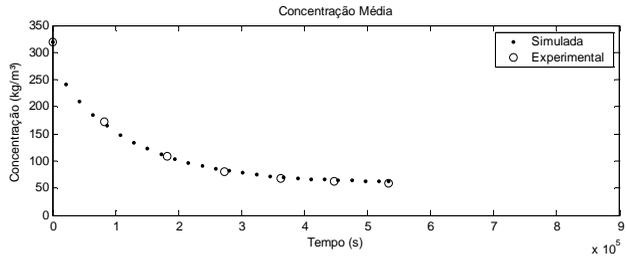


2

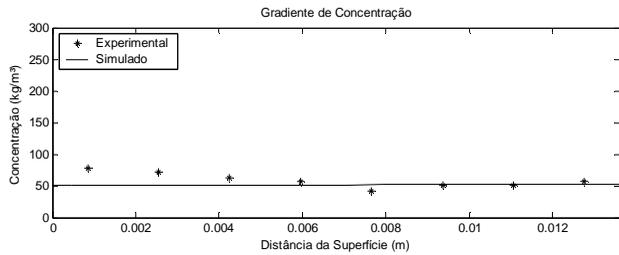
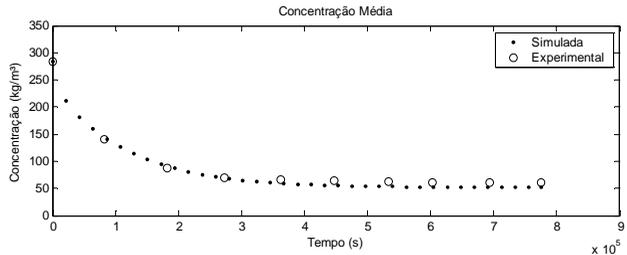


Andiroba / T = 70°C / UR = 60% - Carga 4

3

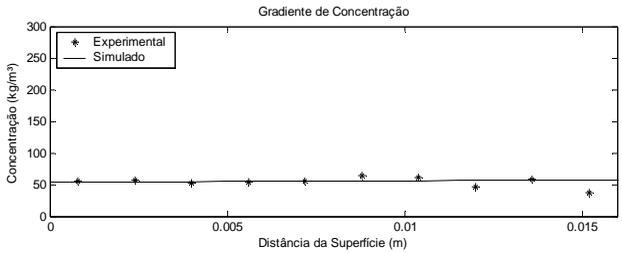
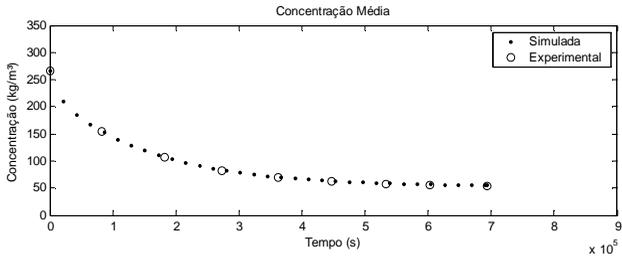


4

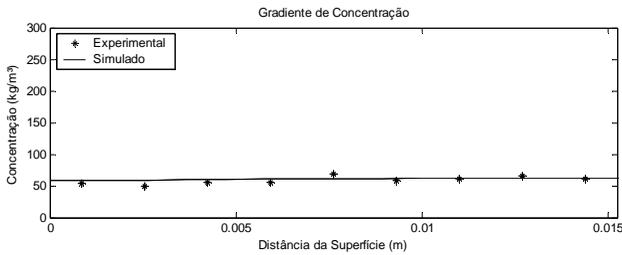
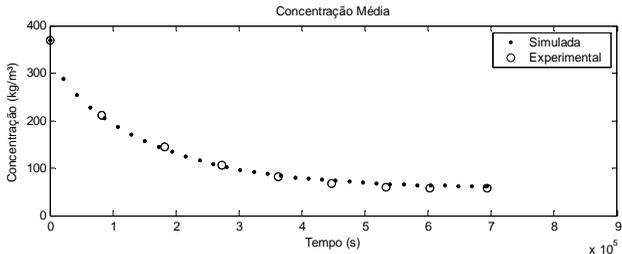


Andiroba / T = 70°C / UR = 60% - Carga 4

5

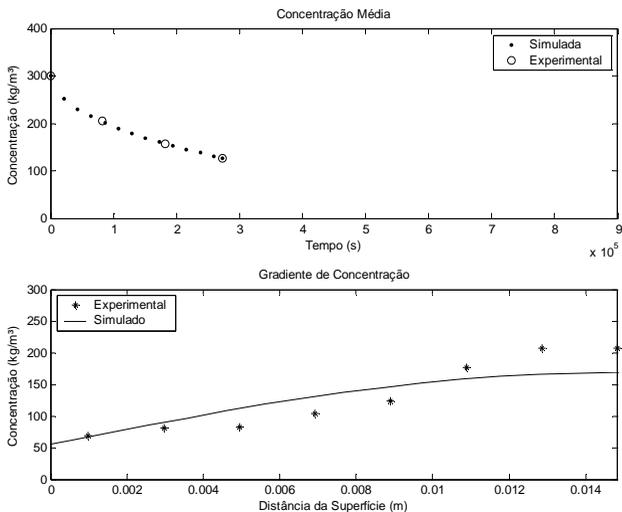


6

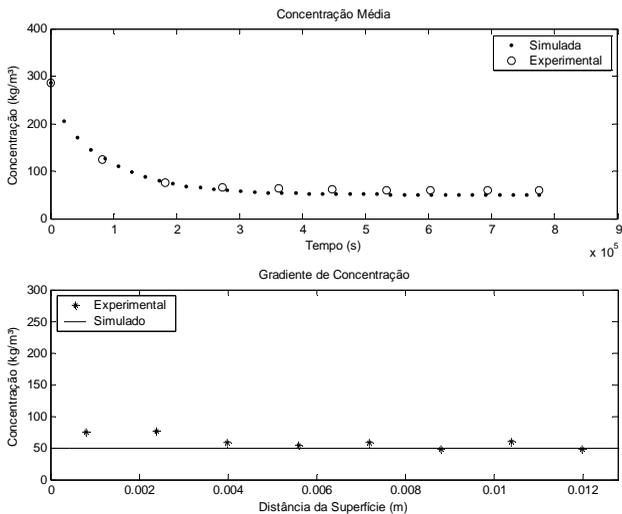


Andiroba / T = 70°C / UR = 60% - Carga 4

7

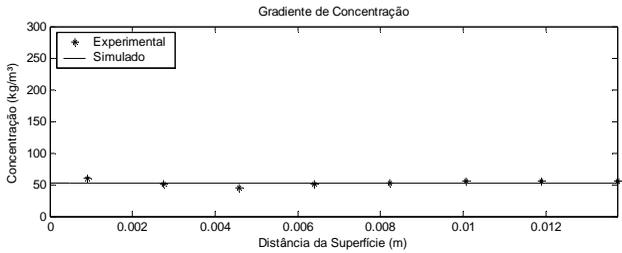
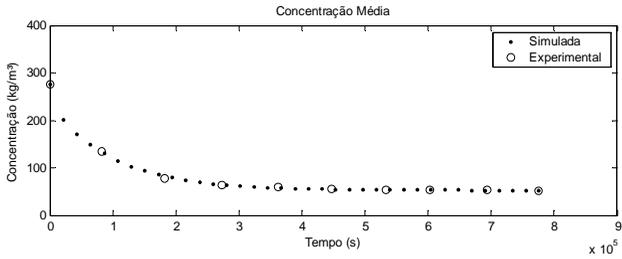


8

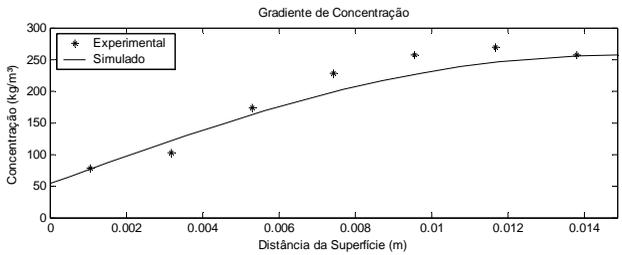
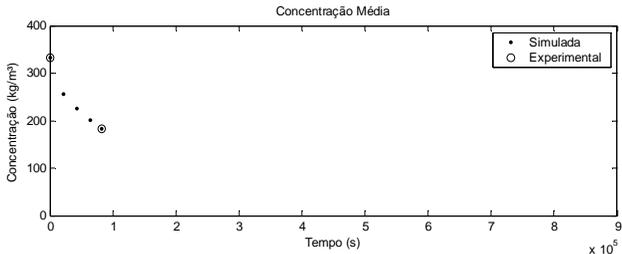


Andiroba / T = 70°C / UR = 60% - Carga 4

9

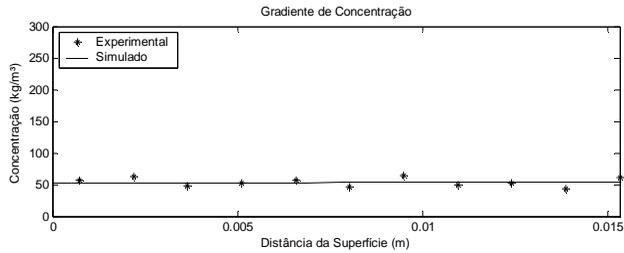
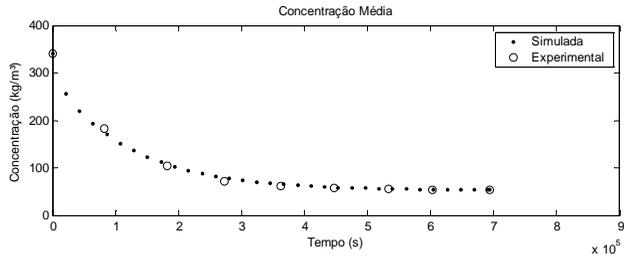


10

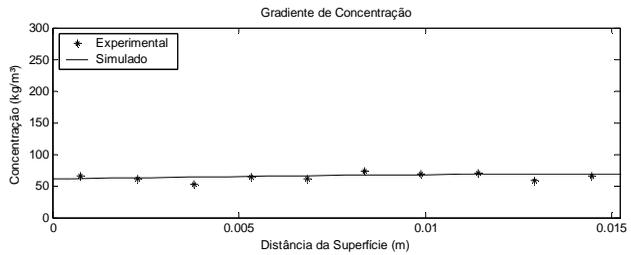
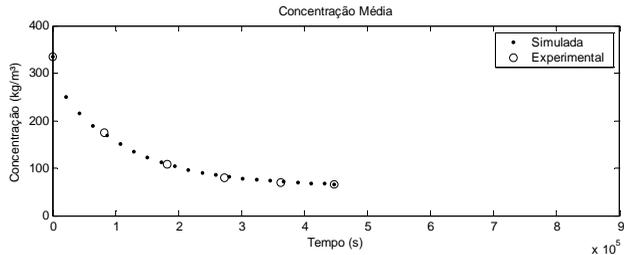


Andiroba / T = 70°C / UR = 60% - Carga 4

11

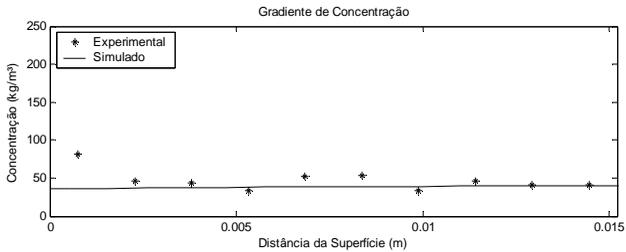
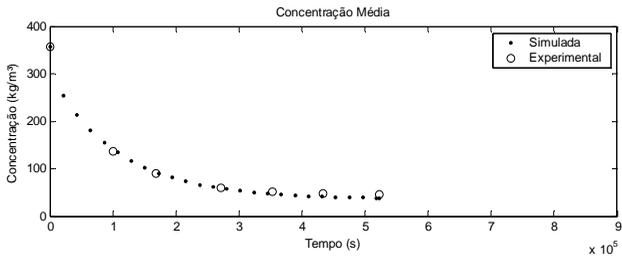


12

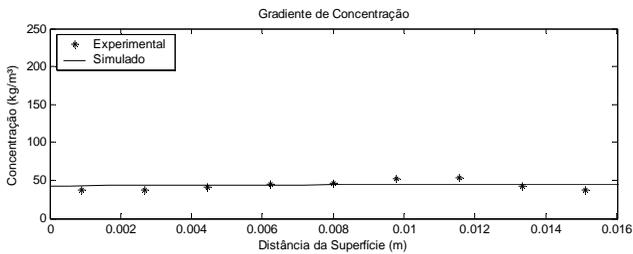
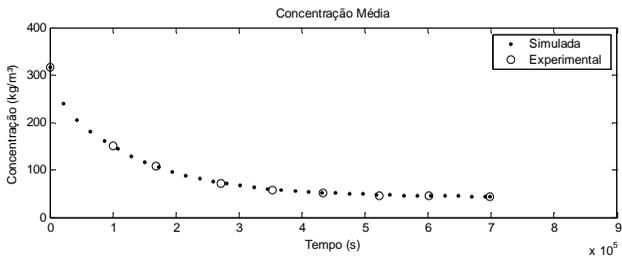


Andiroba / T = 70°C / UR = 20% - Carga 5

1

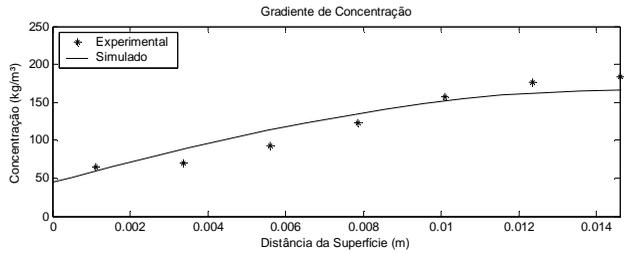
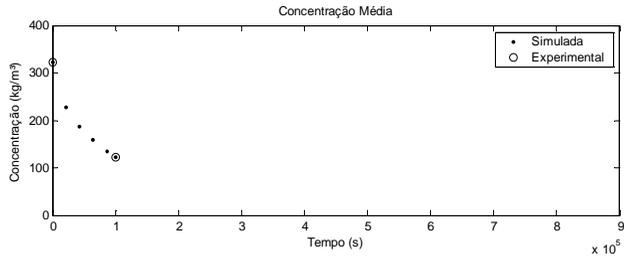


2

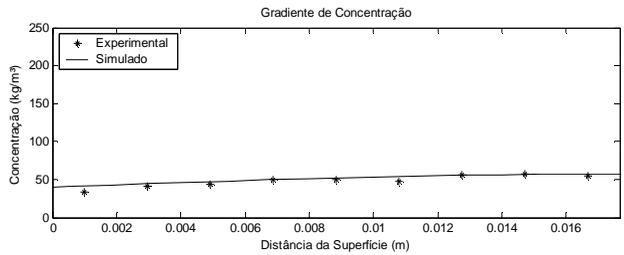
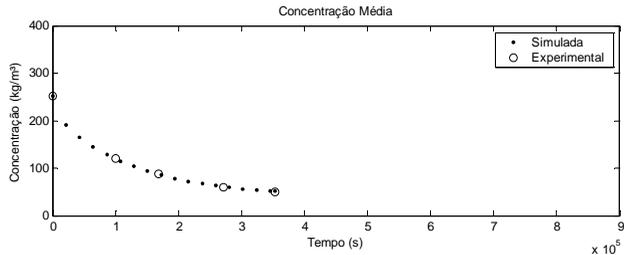


Andiroba / T = 70°C / UR = 20% - Carga 5

3

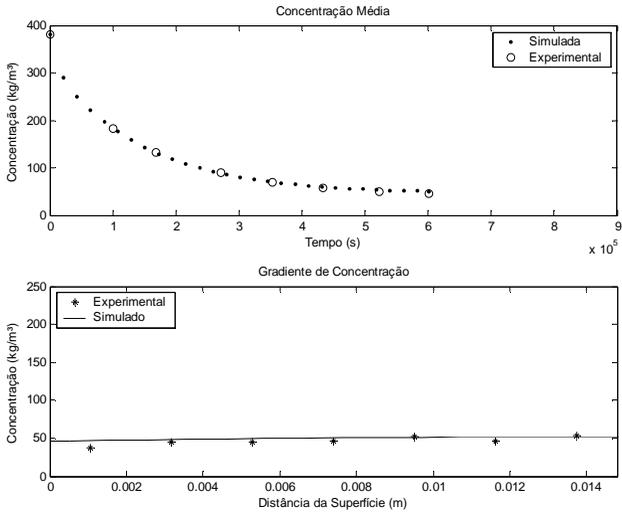


4

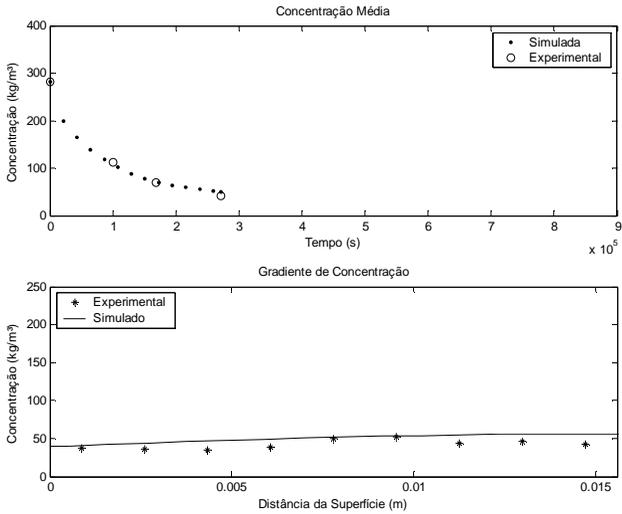


Andiroba / T = 70°C / UR = 20% - Carga 5

5

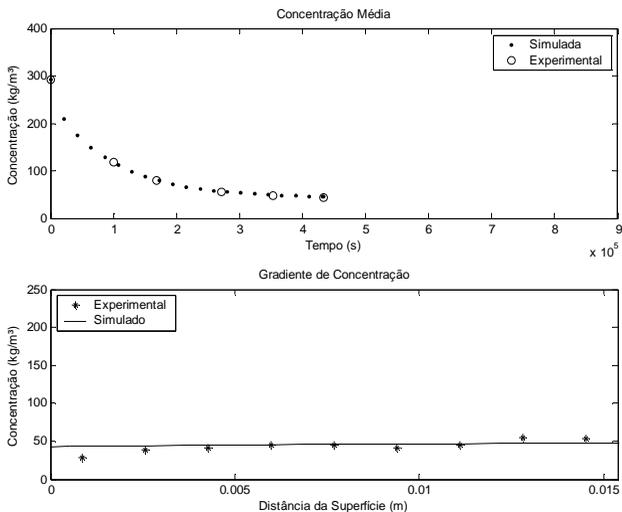


6

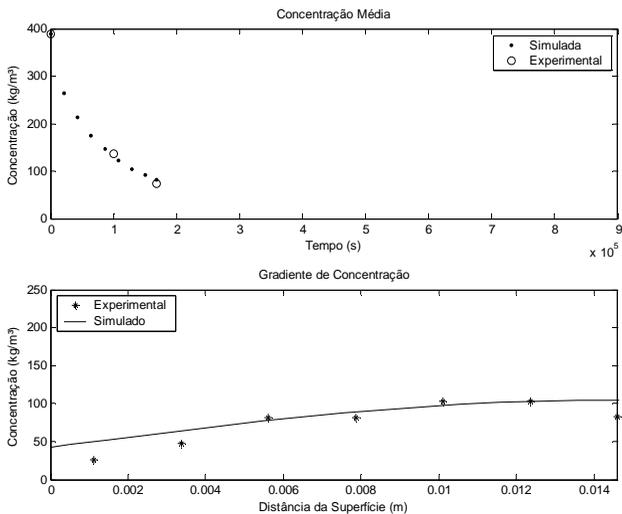


Andiroba / T = 70°C / UR = 20% - Carga 5

7

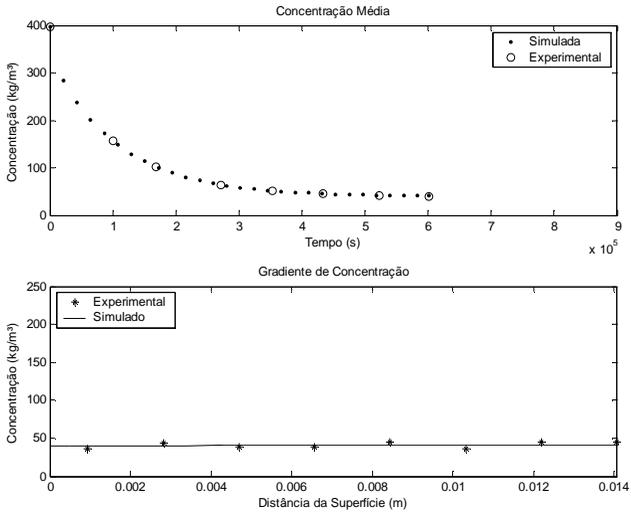


8

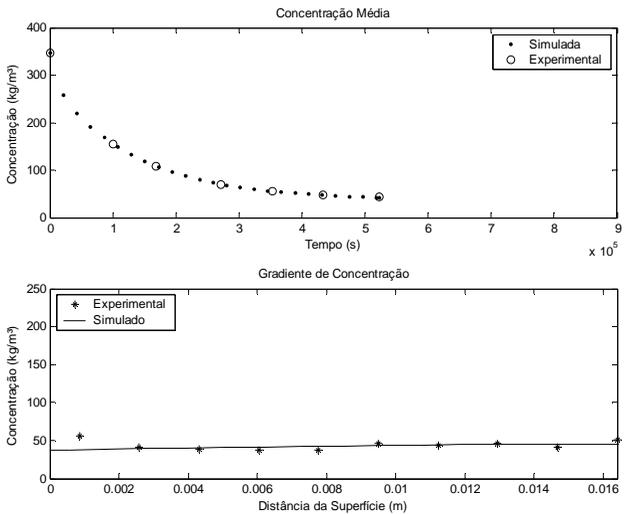


Andiroba / T = 70°C / UR = 20% - Carga 5

9



10



Andiroba / T = 70°C / UR = 20% - Carga 5

11

