

**EMMANUEL CARLOS ENRIQUE ROZAS MELLADO**

**MODELO DE TRANSFERENCIA DE CALOR E MASSA NA  
SECAGEM DE MADEIRA SERRADA DE PINUS**

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Florestal, no Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Tomaselli

**CURITIBA**

**2007**

A minha mãe

Pelo eterno amor que só mãe pode proporcionar

à minha adorada e amada Yasna

pelo amor e motivação incansável

aos meus filhos

Paz

Joaquín

Esteban

Christian

pelas alegrias proporcionadas

aos meus irmãos

Mario

Cristina

Marco

Sergio

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Ivan Tomaselli, pela orientação, amizade, estímulo e valiosas contribuições.

Ao Professor Oscar von Meien, pelas sugestões e incentivo nas etapas iniciais do estudo.

Ao Co-orientador Professor Moacir Kaminski, pela paciência, amizade e incansável apoio.

Ao Co-orientador Professor Everton Zanoelo, pela amizade e inesgotável apoio na análise numérica dos dados.

À Co-orientadora Professora Graciela Bolzon de Muñiz, pelo apoio e amizade durante os estudos.

À Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, pela aceitação no referido curso e apoio constante nos meus estudos.

À Universidad del Bío-Bío, que possibilitou a realização do Curso de Pós-Graduação.

À Facultad de Ingeniería e ao Departamento de Ingeniería en Maderas da Universidad del Bío-Bío, pelo apoio e incentivo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelos recursos financeiros outorgados para a realização desta Tese.

Ao Professor Márcio Pereira da Rocha, pela amizade, paciência e inesgotável apoio durante a realização do curso.

Ao Professor Jorge Monteiro de Matos, pela amizade e apoio na realização da coleta de dados.

Ao Professor Rudi Arno Seitz, pelo apoio e trabalho no corte das árvores.

Aos Professores Ricardo Klitzke e Umberto Klock, pelo apoio, compreensão e facilidade proporcionada durante a coleta dos dados.

À empresa Berneck Aglomerados S/A pelo material proporcionado, em especial ao Sr. Elias De Conti e ao Sr. Daniel Berneck.

Aos Funcionários da Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira, da Universidade Federal do Paraná, em especial à Tânia de Barros Baggio, pela amizade e ajuda na procura de referências e apresentação das mesmas.

Ao secretário do Curso de Pós-Graduação Sr. Reinaldo Mendes de Souza pela amizade e apoio durante o curso.

Aos Funcionários do Curso de Engenharia Florestal, em partícula aos Srs. Vitor Herrera, Ademir Cavalli e Antônio Perin, pelo auxílio na preparação do material.

A todos aqueles que emprestaram sua amizade e apoio durante a realização deste curso, em particular a Daniel Chies, David Teicheira de Araújo, Agrinaldo Rodrigues de Lima e Carla Camargo Corrêa.

Às pessoas que, de uma ou de outra forma, colaboraram para a realização deste trabalho e tiveram seus nomes aqui omitidos.

MUITO OBRIGADO

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	VIII
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	XI
<b>RESUMO</b> .....	XII
<b>ABSTRACT</b> .....	XIII
<b>RESUMEN</b> .....	XIV
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
OBJETIVOS.....	2
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	3
2.1 SECAGEM DA MADEIRA.....	3
2.1.1 Tipos de Água Existente na Madeira.....	3
2.1.2 Movimento de Água Capilar.....	4
2.1.3 Movimento de Água de Impregnação.....	6
2.1.4 Cinética da Secagem da Madeira.....	14
2.2 MODELAGEM NA SECAGEM DA MADEIRA.....	18
2.2.1 Modelo Difusivo.....	19
2.2.2 Modelo de Transporte.....	24
2.2.3 Modelo Difusivo e Modelo de Transporte.....	28
2.2.4 Forças Conductoras.....	33
2.3 PERFIS DE UMIDADE.....	36
2.4 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DO AR.....	39
2.4.1 Pressão de Vapor Saturado e Parcial da Água.....	39
2.4.2 Umidade Absoluta.....	40
2.4.3 Fração Molar dos Componentes.....	40
2.4.4 Viscosidade do Ar.....	41
2.4.5 Viscosidade do Vapor de Água.....	42
2.4.6 Viscosidade da Mistura Ar-Vapor de Água.....	42
2.4.7 Calor Específico do Ar.....	43
2.4.8 Calor Específico do Vapor de Água.....	43
2.4.9 Calor Específico da Mistura Ar-Vapor de Água.....	44

2.4.10	Densidade da Mistura Ar-Vapor de Água.....	44
2.4.11	Viscosidade Cinemática da Mistura Ar-Vapor de Água.....	45
2.4.12	Condutividade Térmica do Ar.....	45
2.4.13	Condutividade Térmica do Vapor de Água.....	45
2.4.14	Condutividade Térmica da Mistura Ar-Vapor de Água.....	46
2.4.15	Difusividade Térmica da Mistura Ar-Vapor de Água.....	46
2.5	PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA MADEIRA.....	47
2.5.1	Condutividade Térmica.....	47
2.5.2	Calor Específico.....	48
2.5.3	Difusividade Térmica.....	48
2.6	NÚMEROS ADIMENSIONAIS.....	49
2.6.1	Número de Prandtl.....	49
2.6.2	Número de Reynolds.....	49
2.6.3	Número de Biot.....	50
2.6.4	Número de Fourier.....	50
2.6.5	Número de Schmidt.....	51
2.7	MODELOS EMPÍRICOS PARA ESTIMATIVA DE COEFICIENTES CONVECTIVOS.....	52
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>62</b>
3.1	COLETA E PREPARAÇÃO DO MATERIAL.....	62
3.2	EQUIPAMENTO.....	63
3.3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	64
3.3.1	Determinação dos Coeficientes Convectivos de Calor e Massa.....	65
3.3.2	Secagem em Estufa Piloto.....	71
3.3.3	Modelo Difusivo Aplicado.....	75
3.3.4	Determinação da Temperatura Interna.....	78
3.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	83
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>84</b>
4.1	COEFICIENTES CONVECTIVOS DE CALOR E MASSA.....	84
4.1.1	Coeficiente Convectivo de Calor.....	84

4.1.2	Coeficiente Convectivo de Massa.....	86
4.2	TESTES EM ESTUFA PILOTO.....	87
4.2.1	Tempo de Secagem.....	88
4.2.2	Temperatura Interna.....	91
4.2.3	Efeito da Umidade no Coeficiente de Difusão Efetivo.....	93
4.2.4	Variação do Coeficiente de Difusão Efetivo com a Temperatura.....	97
4.2	MODELAGEM.....	98
4.3.1	Modelagem do Gradiente de Umidade.....	98
4.3.2	Modelagem da Perda de Umidade.....	104
4.3.3	Modelagem da Transferência de Calor.....	109
4.4	APLICAÇÃO DO MODELO.....	117
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>123</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>125</b>
	ANEXOS.....	138

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 -	VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO EFETIVO ( $D_{ef}$ ) COM O TEOR DE UMIDADE EM DIFERENTES TEMPERATURAS.....	10
FIGURA 2 -	DIAGRAMA DAS DIVERSAS FASES DA SECAGEM CONVENCIONAL.....	15
FIGURA 3 -	EXEMPLOS EXTREMOS DE MOVIMENTO DE UMIDADE UNIDIRECIONAL SEGUNDO HAWLEY (1931). AS SUPERFÍCIES SÃO –a E a .....	38
FIGURA 4 -	COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA PREDITOS VERSUS TEMPERATURA DO AR (LÍNHA). VALORES EXPERIMENTAIS $\Delta=2-4\text{m/s}$ ; $\text{?}=5-6\text{m/s}$ ; $\times=7-8\text{m/s}$ .....	61
FIGURA 5 -	COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR PREDITOS VERSUS TEMPERATURA DO AR (LÍNHA). VALORES EXPERIMENTAIS $\Delta=2-4\text{m/s}$ ; $\text{?}=5-6\text{m/s}$ ; $\times=7-8\text{m/s}$ .....	61
FIGURA 6 -	RETIRADA DE AMOSTRAS (745mm) PARA OS ENSAIOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR E COEFICIENTES CONVECTIVOS, E SEÇÕES PARA DENSIDADE E TEOR DE UMIDADE (25mm) .....	62
FIGURA 7 -	RETIRADA DE AMOSTRA (745mm) PARA OS ENSAIOS DE SECAGEM E SEÇÕES PARA DENSIDADE E TEOR DE UMIDADE (25mm).....	63
FIGURA 8 -	CÂMARA DE SECAGEM E TERMO-ANEMÔMETRO UTILIZADO NO ESTUDO.....	64
FIGURA 9 -	AQUECIMENTO DAS AMOSTRAS CONTROLE À TEMPERATURA DE BULBO ÚMIDO EM BANHO MARIA.....	66
FIGURA 10 -	LOCALIZAÇÃO DAS AMOSTRAS NA PILHA DE MADEIRA UTILIZADA PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS.....	72
FIGURA 11 -	OBTENÇÃO DAS LÂMINAS PARA A DETERMINAÇÃO DO PERFIL DE UMIDADE DAS TÁBUAS.....	74

FIGURA 12 -	POSIÇÃO DOS TERMOPARES PARA A DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA INTERNA DA MADEIRA.....	75
FIGURA 13 -	DOMÍNIO DE INTEGRAÇÃO DA UMIDADE. $\omega_0$ =VALORES DEFINIDOS PELAS CONDIÇÕES DE CONTORNO; X=VALORES CALCULADOS ATRAVÉS DA SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO (68).....	78
FIGURA 14 -	CÂMARA DE SECAGEM E DISTRIBUIÇÃO DA CARGA DE MADEIRA DURANTE OS ENSAIOS.....	79
FIGURA 15 -	DISPOSIÇÃO DOS TERMOPARES NA TÁBUA.....	80
FIGURA 16 -	FLUXO DE CALOR E AR SOBRE UMA TÁBUA DE ESPESSURA 2L .....	81
FIGURA 17 -	CURVAS DE SECAGEM PARA MADEIRA DE <i>PINUS ELLIOTTII</i> PARA AS TEMPERATURAS TESTADAS.....	89
FIGURA 18 -	GRADIENTE DE TEMPERATURA NO INTERIOR DA MADEIRA A 40°C.....	91
FIGURA 19 -	GRADIENTE DE TEMPERATURA NO INTERIOR DA MADEIRA A 60°C.....	92
FIGURA 20 -	GRADIENTE DE TEMPERATURA NO INTERIOR DA MADEIRA A 80°C.....	92
FIGURA 21 -	EFEITO DA UMIDADE NO COEFICIENTE DE DIFUSÃO EFETIVO.....	95
FIGURA 22 -	EFEITO DA TEMPERATURA NO COEFICIENTE DE DIFUSÃO EFETIVO.....	97
FIGURA 23 -	DADOS EXPERIMENTAIS E DO MODELO DIFUSIVO PARA O GRADIENTE DE UMIDADE (TEMPERATURA DE 40°C).....	99
FIGURA 24 -	DADOS EXPERIMENTAIS E DO MODELO DIFUSIVO PARA O GRADIENTE DE UMIDADE (TEMPERATURA DE 60°C).....	100
FIGURA 25 -	DADOS EXPERIMENTAIS E DO MODELO DIFUSIVO PARA O GRADIENTE DE UMIDADE (TEMPERATURA DE 80°C).....	101

FIGURA 26 -	CURVAS DE PERDA DE UMIDADE MÉDIA: COMPARAÇÃO ENTRE O MODELO DIFUSIVO E OS VALORES EXPERIMENTAIS.....	105
FIGURA 27 -	TEOR DE UMIDADE AO LONGO DO PROCESSO DE SECAGEM DETERMINADO POR MEIO DE DUAS METODOLOGIAS.....	106
FIGURA 28 -	CORRELAÇÃO ENTRE O TEOR DE UMIDADE MÉDIO DA TÁBUA ( $TU_T$ ) E DAS LÂMINAS ( $TU_L$ ) PARA AS TEMPERATURAS TESTADAS.....	108
FIGURA 29 -	TEMPERATURA NO CENTRO DA TÁBUA PARA MADEIRA COM UM TEOR DE UMIDADE MÉDIO DE 70,6% (PRÓXIMO A MEDULA).....	110
FIGURA 30 -	TEMPERATURA NO CENTRO DA TÁBUA PARA MADEIRA COM UM TEOR DE UMIDADE MÉDIO DE 125,7% (PRÓXIMO A CASCA).....	111
FIGURA 31 -	EFEITO DA VELOCIDADE DO AR NA TEMPERATURA NO CENTRO DA PEÇA PARA O TEOR DE UMIDADE INICIAL MÉDIO DE 70,6%.....	115
FIGURA 32 -	EFEITO DA VELOCIDADE DO AR NA TEMPERATURA NO CENTRO DA PEÇA PARA O TEOR DE UMIDADE INICIAL MÉDIO DE 125,7%.....	116
FIGURA 33 -	PERFIL DE UMIDADE NO MOMENTO DO APARECIMENTO DAS RACHADURAS NA TEMPERATURA 60°C.....	118
FIGURA 34 -	PERFIL DE UMIDADE NO MOMENTO DO APARECIMENTO DAS RACHADURAS NA TEMPERATURA 80°C.....	119

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	EQUAÇÕES E POTENCIAIS PARA EXPLICAR O MOVIMENTO DE UMIDADE NA MADEIRA.....	34
TABELA 2 -	COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR ( $h_c$ ) E MASSA ( $k_m$ ) CONVECTIVOS.....	53
TABELA 3 -	ENSAIOS REALIZADOS PARA OS DIFERENTES EXPERIMENTOS.....	65
TABELA 4 -	CONDIÇÕES DE SECAGEM NO INTERIOR DA CÂMARA.....	66
TABELA 5 -	CONDIÇÕES DE AQUECIMENTO NO INTERIOR DA CÂMARA.....	79
TABELA 6 -	COEFICIENTES CONVECTIVOS DE CALOR DETERMINADOS NESTE ESTUDO E POR OUTROS AUTORES .....	85
TABELA 7 -	COEFICIENTES CONVECTIVOS DE CALOR DETERMINADOS NESTE ESTUDO E SEGUNDO CHILTON-COLBURN.....	86
TABELA 8 -	COEFICIENTES CONVECTIVOS DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA DETERMINADOS NESTE ESTUDO E SEGUNDO CHILTON-COLBURN.....	87
TABELA 9 -	TEOR DE UMIDADE INICIAL, FINAL E TEMPO DE SECAGEM PARA AS TEMPERATURAS TESTADAS.....	88
TABELA 10 -	COEFICIENTE DE DIFUSÃO EFETIVO PARA AS TEMPERATURAS DE SECAGEM TESTADAS.....	94
TABELA 11 -	COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO PARA AS CURVAS DE SECAGEM OBTIDAS POR MEIO DO MODELO E OS VALORES EXPERIMENTAIS.....	105
TABELA 12 -	TEMPERATURA E TEMPO TOTAL DE AQUECIMENTO NO INTERIOR DA MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA</i> L.....	113
TABELA 13 -	TEOR DE UMIDADE MÉDIO DAS AMOSTRAS COM RACHADURAS SUPERFICIAIS .....	121

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo o uso de modelos para melhorar o controle do processo de secagem de madeira serrada, tomando como base a Lei de Fourier para modelar o fluxo de calor e a 2ª Lei de Fick para o fluxo de massa. Para a avaliação do modelo de Fourier foram utilizadas tábuas de *Pinus taeda* L. de 46mm de espessura, submetidas às temperaturas de bulbo seco de 40°C, 60°C e 80°C e velocidades do ar de 3,5, 4,7 e 6,8 m/s. Em todos os ensaios a umidade relativa foi mantida em 100%. No caso da aplicação da 2ª Lei de Fick foram utilizadas tábuas de *Pinus elliottii* Engelm de 36mm de espessura, submetidas as mesmas temperaturas, no entanto com uma velocidade do ar de 3,0m/s e uma umidade relativa de 40%.

Os resultados dos ensaios indicaram que a relação de Chilton-Colburn permite determinar os coeficientes convectivos de calor e massa. O coeficiente convectivo de calor pode ser determinado do número de Nusselt, considerando um fluxo ao longo de um duto de seção retangular baseado no diâmetro hidráulico. O coeficiente de difusão aumentou com a temperatura e diminuiu com o teor de umidade da madeira.

A solução do modelo de Fourier representou melhor o comportamento experimental dos dados quando o valor de Biot tendendo ao infinito é considerado. Isto indica que a resistência à transferência de calor do material é bem superior que a convecção de calor do fluido na superfície.

Com base nos resultados obtidos concluiu-se, que o modelo de Fourier permite estimar com boa precisão a temperatura no centro da madeira e que o modelo difusivo, baseado na segunda Lei de Fick, permite predizer os gradientes de umidade e a taxa de perda de umidade, durante o processo de secagem. Os resultados também indicam que o gradiente de umidade das peças gerado pelo modelo pode ser utilizado na prática para ajustar o processo de secagem de madeira serrada e, com base nisto, mitigar rachaduras superficiais. Este aspecto em particular pode ser explorado em mais detalhes em estudos futuros.

**Palavra chave:** Madeira – Secagem; *Pinus taeda* L.; *Pinus elliottii* Engelm.

## ABSTRACT

This study was designed to develop a model to improve the control of drying process of sawnwood. The model is based on the Fourier Law, in dealing with heat transfer, and on the second Fick Law for the mass transfer. When developing the model based on the Fourier *Pinus taeda* L. boards, 36 mm thick, were used. For this experiment it was used temperatures of 40°C, 60°C e 80°C, and air velocities of 3.5, 4.7 and 6.8 m/s. In all trials the relative humidity was maintained at 100%. In dealing the experiments for the application of the second Fick Law 36mm thick boards of *Pinus elliottii* Engelm were used, and the same temperatures of the previous experiment were used. In this case air velocity was 3.0 m/s and the relative humidity was 40%.

The results obtained pointed out that the Chilton- Colburn relations allows to obtain the convective values for mass and heat. The heat convective coefficient can be determined from the Nusselt number, considering the flow in a rectangular section based on a hydraulic diameter. The diffusion coefficient increase with temperature and decrease with the moisture content of the boards.

The solution of the Fourier model presented a better result when the Biot value tending to infinite is considered. This points out that the limitation of heat transfer of the material is more important than the convection of heat from the air to the surface.

Based on the results of this study can be concluded that the model based on the Fourier Law is a good tool to estimate internal temperature of the boards, and that the diffusion model (based on the second Fick Law) is appropriated to define the moisture gradient and to estimate the moisture contend reduction during drying. The results also pointed out that moisture gradient generated by the model has practical application, and can be used to adjust the wood drying process, and mitigate superficial checks a common defect when drying lumber. The practical applications of the model can be further explored in future studies.

Key word: Wood - Drying; *Pinus taeda* L.; *Pinus elliottii* Engelm.

## RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo el uso de modelos para mejorar el control del proceso de secado de madera aserrada, tomando como base la Lei de Fourier para modelar el flujo de calor y la 2ª Lei de Fick para el flujo de masa. Para evaluar el modelo de Fourier fueron utilizadas tablas de *Pinus taeda* L. de 46mm de espesor, sometidas a las temperaturas de bulbo seco de 40°C, 60°C y 80°C y velocidades del aire de 3,5, 4,7 e 6,8 m/s. En todos los ensayos la humedad relativa fue mantenida en 100%. En la aplicación de la 2ª Lei de Fick fueron utilizadas tablas de *Pinus elliottii* Engelm de 36mm de espesor, sometidas a las mismas temperaturas, sin embargo con una velocidad del aire de 3,0m/s y una humedad relativa de 40%.

Los resultados de los ensayos indicaron que la relación de Chilton-Colburn permite determinar los coeficientes convectivos de calor y masa. El coeficiente convectivo de calor puede ser determinado del número de Nusselt, considerando un flujo a lo largo de un ducto de sección rectangular basado en el diámetro hidráulico. El coeficiente de difusión efectivo aumenta con la temperatura y disminuye con el contenido de humedad de la madera.

La solución del modelo de Fourier representó mejor el comportamiento experimental de los datos cuando el valor de Biot tiende a infinito. Esto indica que la resistencia a la transferencia de calor del material es bien superior que la convección de calor del fluido en la superficie.

Con base en los resultados obtenidos se concluye, que el modelo de Fourier permite estimar con buena precisión la temperatura en el centro de la madera y que el modelo difusivo (2ª Lei de Fick) permite predecir los gradientes de humedad y la tasa de pérdida de humedad, durante el proceso de secado. Los resultados también indican que el gradiente de humedad de las piezas generado por el modelo pueden ser utilizados en la práctica para ajustar el proceso de secado de la madera aserrada, y con esto reducir las rajaduras superficiales. Este aspecto en particular puede ser explorado en mas detalle en estudios futuros.

**Palabra clave:** Secado - Madera; *Pinus taeda* L.; *Pinus elliottii* Engelm.

## 1 INTRODUÇÃO

A secagem é um dos processos mais importantes para a indústria madeireira. A madeira, para a maior parte de seus usos necessita ser seca. Este processo demanda grandes investimentos e um consumo elevado de energia, resultando em custos altos. Isto explica o grande interesse em se buscar formas eficientes de secar a madeira. O objetivo dos pesquisadores é sempre reduzir o teor de umidade o mais rápido possível, sem provocar defeitos que possam afetar o uso final da madeira.

Para melhorar a secagem é necessário ter um perfeito entendimento dos processos físicos envolvidos na transferência simultânea de calor e de massa. Durante a secagem da madeira, calor é transferido para a superfície e da superfície para o centro da peça. A resistência ao calor na superfície é representada pelo coeficiente convectivo de calor, e a resistência à condução do calor para o interior da madeira, pela condutividade térmica da madeira.

A transferência de calor traz como consequência a perda de umidade, com o movimento de água do centro para a superfície, através de mecanismos de capilaridade e difusão; e da superfície da madeira para o ar pela evaporação. A resistência para a evaporação da água depende do coeficiente convectivo de massa e da difusão no interior da madeira.

A utilização de modelos matemáticos para simular a secagem da madeira é uma das alternativas adotadas para melhorar os programas de secagem, permitindo diminuir os custos, a energia, o tempo e os defeitos de secagem. Modelos que descrevem adequadamente os processos de transferência de calor e de massa serviram de base para estudar processos industriais complexos, facilitar os ensaios experimentais e explicar os mecanismos físicos que estão envolvidos.

O modelo de difusão foi uma primeira tentativa para descrever e quantificar a secagem da madeira. Posteriormente, foram desenvolvidos os modelos que consideraram o transporte simultâneo de calor e massa. As maiores vantagens de se usar modelos matemáticos são: a sensibilidade dos modelos ao mudar os parâmetros de secagem; a solução pode ser generalizada para diferentes espécies e a relação entre a madeira, a água e a temperatura podem ser mais bem analisadas.

Neste estudo utilizou-se o modelo difusivo por ser um modelo simples para a determinação do coeficiente de difusão efetivo, que considera o movimento de umidade acima e abaixo do ponto de saturação das fibras, o gradiente de umidade e a curva de perda de umidade durante o processo de secagem convencional. O modelo de Fourier foi utilizado para prever o tempo de aquecimento da madeira durante o processo de aquecimento.

Os seguintes objetivos foram estabelecidos para o estudo:

**a.- Objetivo geral**

Contribuir para o conhecimento dos processos de transferência de calor e massa durante a secagem artificial de madeira serrada.

**b.- Objetivos específicos**

Avaliar e validar a aplicabilidade de modelos matemáticos para melhorar o entendimento sobre o processo de secagem artificial de madeira serrada, considerando como base:

- A Lei de Fourier para prever o tempo de aquecimento.
- A Lei de Fick para determinar o coeficiente de difusão efetivo e prever os gradientes de umidade e a curva de perda de umidade.

O estudo foi baseado em madeira de *Pinus* e, para atender os objetivos estabelecidos, as seguintes atividades foram desenvolvidas:

- Determinação dos coeficientes convectivos de calor e massa.
- Determinação da temperatura interna e do gradiente de umidade durante o processo de secagem em diferentes condições.
- Avaliação da adequação dos modelos de transferência de massa e calor para estimar temperaturas internas, gradientes de umidade e taxa de secagem.
- Análise de aplicação do modelo nos gradientes de umidade, quando ocorrem as rachaduras superficiais na madeira serrada.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 SECAGEM DA MADEIRA

A madeira é um material higroscópico que mantém relações dinâmicas com a água do meio ambiente, em função do seu próprio teor de umidade, da umidade relativa e da umidade do ambiente, podendo ceder ou adquirir água ao meio. Na madeira, de uma forma bastante simplificada, pode-se considerar que a água se desloca das regiões de alto para as de baixo teor de umidade. Na forma líquida e como vapor, movimenta-se pelas aberturas naturais da madeira e através das paredes celulares. Basicamente a secagem da madeira consiste na remoção da umidade de sua superfície, ao mesmo tempo em que ocorre o movimento da água do interior para esta superfície. Do ponto de vista físico, a secagem pode ser definida como um balanço entre a transferência de calor do ar para a superfície da madeira e a transferência de massa do interior para a superfície e desta para a corrente de ar.

#### 2.1.1 Tipos de Água Existente na Madeira

Existem dois tipos de água na madeira: água livre ou capilar, localizada nos lumes celulares e espaços intercelulares, retidas por forças capilares, e água de impregnação ou higroscópica, que se encontra nos espaços submicroscópicos da parede celular, ligada por forças físico-químicas.

No processo de secagem, a primeira água a ser removida é a água livre contida nas cavidades celulares (lumes das células), que se encontra retida por forças capilares, que são apreciavelmente menores do que as forças que mantêm a água de impregnação existente na parede celular (SKAAR, 1972). A retirada da água capilar ocasiona apenas uma perda de peso na madeira, isto ocorre quando a madeira se encontra a teores de umidade superiores ao ponto de saturação das fibras (PSF) (KOLLMANN, 1959), o ponto em que os lumes celulares da madeira estão vazios e apenas as paredes celulares possuem água.

Segundo SKAAR (1972), o ponto de saturação das fibras varia normalmente entre 25 e 35% de umidade em relação ao peso seco do material, com um valor médio

de 28%. O ponto de saturação das fibras é de grande importância prática, uma vez que as variações dimensionais da madeira se manifestam apenas abaixo deste.

A água de impregnação encontra-se nos espaços submicroscópicos da parede celular e a sua saída afeta a maioria das propriedades físicas e mecânicas da madeira. Por esta razão, variações no teor de umidade abaixo do PSF têm grande importância na utilização da madeira. A água de impregnação dentro do intervalo de 6 a 28% é adsorvida em camadas polimoleculares ligadas por forças elétricas polares (KOLLMANN, 1959). Abaixo deste teor de umidade (0 a 6%), encontra-se a água de adsorção físico-química, aderida às interfaces entre as moléculas de celulose e hemicelulose por forças de valências secundárias (Van der Waals e pontes de hidrogênio).

### 2.1.2 Movimento de Água Capilar

O movimento da água capilar, também denominado movimento de umidade acima do ponto de saturação das fibras, é o mecanismo de transporte predominante baseado na ação da força capilar e segue a lei de Hagen-Poiseuille (KOLLMANN; CÔTE, 1968; PLUMB *et al.* 1984). Este movimento capilar envolve, durante a secagem, o deslocamento da água (ou outro líquido) pelo ar, na estrutura porosa da madeira.

Num capilar cheio, o movimento da água capilar é produzido pelas diferenças em tensão devido às forças existentes na superfície do menisco dentro do capilar. Esta tensão “**T**”, num menisco balanceado dentro de um capilar de raio, “**r**” pode ser determinada através da equação 1.

Esta equação não considera as diferenças na pressão do ar existente dentro do capilar (KOLLMANN; CÔTE, 1968).

$$TC = H \times r = \frac{2s}{r \times r} r = \frac{2s}{r} \quad 1$$

Onde:

*TC*: tensão capilar ( $\text{g/cm}^2$ )

*H*: altura a que o líquido sobe no capilar (cm)

*r*: densidade do líquido ( $\text{g/cm}^3$ )

*S*: tensão superficial do líquido ( $\text{g/cm}$ )

*r*: raio do capilar (cm).

Estabelece-se por esta equação que a tensão capilar é diretamente proporcional à tensão superficial da interfase ar-água e inversamente proporcional ao raio da curvatura.

SIAU (1971) considera o fluxo através dos capilares como uma função do raio do capilar à quarta potência. As leis que modelam as forças capilares consideram ainda que quanto maior o raio do capilar, maior é a tração da coluna de água no mesmo e, em consequência disso, menor é a tensão capilar, o que resulta numa redução do fluxo.

O fluxo capilar é aproximadamente 50 vezes maior no sentido longitudinal que no sentido transversal (radial e tangencial). Nesta direção existe um menor número de pontuações e uma menor presença de substâncias que possam obstruir a livre passagem da água.

De acordo com BRAMHALL e WELLWOOD (1976) o fator mais importante que afeta o fluxo capilar é a permeabilidade da madeira, sendo este fluxo inversamente proporcional a esta propriedade física. Não obstante, o fluxo de massa não é um componente significativo no movimento total da umidade em madeiras pouco permeáveis (BRAMHALL, 1976b).

No entanto, a temperatura da madeira também afetaria este movimento, pois, nas altas temperaturas a viscosidade da água é reduzida, provocando um movimento mais rápido da água capilar. Segundo SIAU (1971) o fator limitante durante a secagem da madeira é freqüentemente a remoção da água capilar retida em forma líquida nas cavidades celulares. Baixas temperaturas devem ser freqüentemente utilizadas durante as etapas iniciais da secagem devido ao risco de defeitos associados à remoção rápida da água a altas temperaturas, tais como rachaduras superficiais, empenamentos ou colapso em madeiras propensas a este defeito.

De acordo com SPOLEK e PLUMB (1981), o movimento da água livre na direção tangencial pode ocorrer por dois possíveis caminhos: a água livre pode se mover do lenho inicial para o tardio, ou diretamente a superfície através do lenho inicial. Entretanto, no transporte radial, a água livre tem que se movimentar através das regiões do lenho inicial e lenho tardio.

### 2.1.3 Movimento de Água de Impregnação

O movimento da água higroscópica corresponde à perda de água abaixo do ponto de saturação das fibras, que é geralmente considerado como um fenômeno de difusão. De acordo com BRAMHALL (1976b), o processo de difusão é muito importante na secagem de todas as madeiras (permeáveis e pouco permeáveis). Em espécies pouco permeáveis, onde o fluxo capilar é dificultado, a secagem ocorre predominantemente por difusão. Este fenômeno, de modo geral, é um processo que envolve o movimento espontâneo de um material para outro, desde uma zona de maior concentração para uma de menor concentração, num esforço de alcançar o equilíbrio, permitindo assim reduzir o gradiente de umidade.

No caso da madeira, a difusão pode envolver o movimento de um gás ou vapor entre os espaços celulares, ou de um líquido através da parede celular da madeira (STAMM, 1964).

A diferença entre o movimento capilar e o de difusão é que este último é um processo lento (RASMUSSEN, 1961) e considerado complexo, porque ocorre simultaneamente difusão de vapor através das cavidades celulares, e difusão de água higroscópica nas paredes celulares da madeira (KOLLMANN; CÔTE, 1968; DROIN *et al.* 1988a).

Segundo BRAMHALL *et al.* (1978), o movimento de difusão pode ocorrer por três caminhos diferentes, dependendo do estado e o local em que se encontra a água na madeira. Este movimento pode ser por difusão de vapor, difusão de água higroscópica e como uma combinação de ambos.

A água no estado de vapor movimenta-se através do fenômeno de difusão. Neste processo, as moléculas de vapor de água movimentam-se de forma

desorganizada em todas as direções, desde uma região de alta concentração para uma região de baixa concentração, diminuindo assim o gradiente de concentração existente entre elas. A velocidade deste movimento é proporcional ao gradiente de pressão de vapor existente entre as duas regiões. Este gradiente de pressão de vapor faz com que o vapor de água movimente-se através das cavidades celulares, das câmaras de pontoações, da abertura da membrana e dos espaços intercelulares (CECH; PFAFF, 1977).

O movimento por difusão de água higroscópica através das paredes celulares é devido à existência de um gradiente de umidade entre duas regiões. Este gradiente de umidade entre as paredes mais externas e internas das células se desenvolve à medida que a umidade começa a evaporar das paredes das células próximas à superfície da peça de madeira, absorvendo estas últimas por estarem mais secas, a umidade das paredes mais úmidas, resultando num fluxo de água das células internas da madeira para as externas.

O gradiente de pressão de vapor entre estas duas regiões também é responsável pela concretização deste mecanismo. No entanto, a difusão da água higroscópica é um processo sensivelmente mais lento que o processo de difusão de vapor.

Durante a secagem da madeira, tanto a difusão de água higroscópica como a difusão de vapor de água, ocorrem simultaneamente. Ao ser deslocada desde o centro da madeira até a superfície, grande parte desta umidade passa através das paredes celulares pelo processo de difusão da água higroscópica, que evapora dentro das cavidades celulares e passa por sua vez através do lume pelo mecanismo de difusão de vapor. Na continuidade da sua migração para a sua superfície, a água no estado de vapor nos lumes é adsorvida por outra parede celular, passando através dela por difusão de água higroscópica, e assim sucessivamente, até atingir a superfície da peça.

De acordo com YAO (1966), alguns dos fatores que influenciam a difusão de umidade são os métodos de medição, teor de umidade, densidade, estrutura da madeira e temperatura. Este autor indica que os valores do coeficiente de difusão são aproximadamente 10% maior na desorção que na absorção.

De acordo com HART (1966) citado por GALVÃO e JANKOWSKY (1985), a difusão de vapor de água é de 10 a 1.000 vezes maior que a difusão da água higroscópica nas paredes celulares. Entretanto, a difusão de vapor de água em temperaturas abaixo do ponto de ebulição tem menor contribuição no processo de secagem devido ao pequeno número de aberturas que ligam as células entre si. Dessa forma, apesar da facilidade de difusão do vapor de água através das aberturas naturais da madeira, a maior parte deste movimento para o total de água movimentada pode ser desprezada nas condições normais de secagem.

Segundo LANGRISH e WALKER (1993), quando a madeira está verde, o coeficiente de difusão de vapor nos lumes é em torno de 10 vezes maior que o movimento da água nas paredes celulares. Não obstante, quando a madeira está em 5% do teor de umidade, o coeficiente de difusão do vapor nos lumes é da ordem de 1.000 vezes maior que a água na parede celular. A diferença é menor quando o teor de umidade da parede celular aproxima-se do PSF e maior quando se aproxima de 0%, já que a parede celular oferece maior resistência à difusão que os lumes.

É evidente que a difusão transversal é essencialmente determinada pelo movimento da umidade através da parede e pela espessura da parede atravessada por unidade de distância (densidade da madeira). Segundo CHOONG (1965), SIAU (1971), AVRAMIDIS e SIAU (1987), o coeficiente de difusão transversal aumenta com o teor de umidade da madeira em todas as temperaturas, enquanto o coeficiente de difusão longitudinal diminui com o aumento do teor de umidade em todas as temperaturas. Os efeitos do teor de umidade na difusão radial são muito pronunciados, mas no coeficiente tangencial permanecem essencialmente constantes com o teor de umidade (SKAAR, 1958 citado por DROIN *et al.* 1988a).

ROSEN (1976), trabalhando com madeira de alburno de *Liriodendron tulipifera* L, concluiu que uma relação exponencial do tipo  $D=1,71 \times 10^{-4} \exp[-0,133M]$  (D em  $\text{cm}^2/\text{s}$  e M em %), pode ser usada para descrever a dependência do coeficiente de difusão longitudinal durante a absorção abaixo do ponto de saturação das fibras.

Segundo BRAMHALL (1979a), o coeficiente de difusão aumenta em forma exponencial em relação ao teor de umidade. Da mesma forma para KIRK *et al.* (1985),

o coeficiente de difusão médio aumenta exponencialmente com o teor de umidade no intervalo higroscópico, entretanto acima deste intervalo o coeficiente de difusão é provavelmente constante.

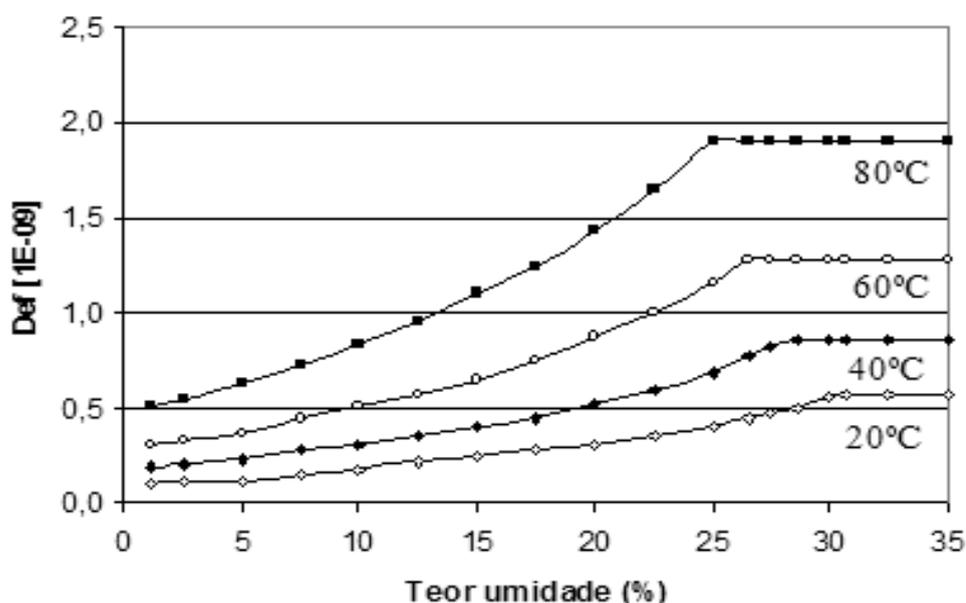
DROIN-JOSSERAND *et al.* (1989) considerou a difusividade dependendo do teor de umidade numa forma exponencial, sendo que o valor do coeficiente de difusão tangencial é igual ao radial ( $D=1,5 \times 10^{-6} \exp[0,0228M]$ ).

SIMPSON e LIU (1991) concluíram que o coeficiente de difusão aumenta com o teor de umidade no intervalo entre 0 e 18% e pode ser descrito como uma função exponencial. Posteriormente, SIMPSON (1993) encontrou que o coeficiente de difusão aumenta aproximadamente em forma exponencial com o teor de umidade entre 6 e 30%, a 43°C.

De acordo com SIMPSON e LIU (1997), o coeficiente de difusão depende do teor de umidade, aumentando com o acréscimo deste e tende a ser constante a partir do PSF. Da mesma forma para HUKKA (1999) o coeficiente de difusão efetivo aumenta com o teor de umidade até o PSF e deste ponto permanece constante para as diferentes temperaturas (Figura 1). Entretanto, LIU *et al.* (2001), encontraram que o coeficiente de difusão aumenta com o acréscimo da temperatura abaixo do PSF, elevando-se drasticamente entre o teor de umidade de 5% a 10%, e, aumenta levemente deste último valor até o teor de umidade de 35%.

YEO *et al.* (2002b), que realizaram ensaios de secagem com três espécies de madeira diferentes (*Quercus rubra* L., *Pinus spp.* e *Acer saccharum*) a uma temperatura de 30°C e uma umidade relativa 25%. Estes autores também encontraram resultados semelhantes dependendo da espécie e da direção considerada (longitudinal, radial ou tangencial). Eles identificaram que o coeficiente de difusão longitudinal para as três espécies permanece constante desde o teor de umidade máximo (madeira verde) até 30% e posteriormente diminui até o teor de umidade de equilíbrio. Quando a madeira apresenta acima do PSF um coeficiente de difusão constante, indica que o movimento de umidade é por ação capilar. O coeficiente de difusão na direção transversal para cada espécie, exceto para a direção radial da madeira de *Acer saccharum*, decresce desde verde (acima de 100%) até o teor de umidade de equilíbrio.

FIGURA 1 - VARIACÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO EFETIVO ( $D_{ef}$ ) COM O TEOR DE UMIDADE EM DIFERENTES TEMPERATURAS



FONTE: Adaptado de HUKKA (1999).

Entretanto, CHOONG e SKAAR (1972); AVRAMIDIS e SIAU (1987); DRION *et al.* (1988a); MOUNJI *et al.* (1991); SÖDERSTRÖM e SALIN (1993); CHEN *et al.* (1994 e 1995); SIAU e AVRAMIDIS (1996); LIU e SIMPSON (1997); FOTSING e TCHAGANG (2005), dentre outros autores, têm determinado ou considerado o coeficiente de difusão como constante.

CHEN *et al.* (1996) descrevem uma alternativa não destrutiva para avaliar o coeficiente de difusão dependente do teor de umidade usando curvas de secagem. Indicam que, dependendo do intervalo de teor de umidade e condições de secagem, a predictibilidade da remoção de umidade durante a secagem pode ser melhorada usando-se o coeficiente de difusão dependente do teor de umidade (seja este constante ou apresentando uma relação linear com o teor de umidade).

Segundo BIGGERSTAFF (1965), a temperatura é um fator crítico sobre o efeito do coeficiente de difusão, pois aumenta de forma exponencial. A relação entre a temperatura e o coeficiente de difusão de umidade através da madeira é geralmente expressa pela equação de Arrhenius (YAO, 1966), a qual é representada a seguir:

$$D = D_0 \exp(-E/RT_k)$$

Onde:

D: coeficiente de difusão, à temperatura absoluta  $T_k$ .

$D_0$ : uma constante ou o coeficiente de difusão calculado desde o logaritmo de D em  $1/T=0$ , (fator de frequência).

R: constante dos gases.

E: energia de ativação.

De acordo com YAO (1966) a energia de ativação (E) para a difusão da umidade através da madeira é considerada a energia requerida para que as moléculas de água pulem de um nível de energia para outro.

BRAMHALL (1979c), SKAAR e SIAU (1981) consideram o coeficiente de difusão como sendo dependente da temperatura, relacionando-o com uma equação do tipo Arrhenius. FERNANDEZ e HOWELL (1997) consideraram no seu modelo que a difusividade da água de impregnação é expressa por Arrhenius, sendo que o coeficiente e a energia de ativação da água de impregnação dependem do teor de umidade. A energia de ativação desta água é proporcional à entalpia de vaporização (SIAU, 1984).

SIMPSON e LIU (1997) utilizaram a expressão matemática de SIMPSON (1993) que demonstrou que o coeficiente de difusão para *Quercus rubra* pode ser representado por  $D = A \exp(-5.280/T) \exp(BM/100)$ , T temperatura absoluta, M teor de umidade em %; A e B coeficientes determinados experimentalmente (A: 12,9 e 14,8 e B: 2,32 e 2,48 para uma velocidade do ar de 1,5m/s e 5,1m/s, respectivamente).

De acordo com KANG e HART (1997), a maioria dos estudos que relacionam difusão de umidade e temperatura foi realizada antes dos anos 70. Os mesmos autores aplicaram a equação de Arrhenius para considerar o coeficiente de difusão dependente da temperatura. Segundo CHRUSCIEL *et al.* (1999), a variação da resistência da transferência de massa global é uma função da temperatura do ar relacionada com a lei de Arrhenius.

O último regime de secagem começa quando a difusão da água higroscópica é controlada segundo a difusão de Fick. O parâmetro que afeta este regime de secagem é

o coeficiente de difusão. Para muitos materiais higroscópicos, o coeficiente de difusão é assumido como sendo do tipo Arrhenius, com a temperatura como primeiro parâmetro de influência (MORÉN, 2001).

A presença das pontoações e a condição da membrana da pontoação não influenciam muito a difusão. As pontoações somente se tornam importantes em teores de umidade muito baixos e para madeiras com alta densidade, onde o coeficiente de difusão é muito pequeno, e as paredes das células são espessas. As pontoações desempenham um papel insignificante: se não ocorresse difusão através delas, o coeficiente de difusão transversal seria reduzido em apenas 10%. Se a membrana da pontoação fosse removida inteiramente, o coeficiente de difusão aumentaria em três vezes (STAMM, 1967b citado por LANGRISH; WALKER, 1993).

O estado das pontoações é um fator menor na difusão. Por exemplo, o cerne de uma madeira pouco impermeável levará para secar, do PSF até um teor de umidade de equilíbrio, virtualmente o mesmo tempo que uma madeira altamente permeável (alburno), tendo ambas mesma densidade básica (LANGRISH; WALKER, 1993).

Segundo SIAU (1971), a massa específica, a permeabilidade e a temperatura influenciam o processo de difusão. Da mesma forma DROIN *et al.* (1988a), indicam que a taxa de transporte de umidade está relacionada com a umidade relativa do ambiente, a temperatura, o tipo de madeira, a velocidade do ar ambiente, a presença de gradientes de concentração na madeira e o teor de umidade. O efeito da temperatura é um importante parâmetro para o coeficiente de difusão e, geralmente, este aumenta com a temperatura. Da mesma forma, a direção estrutural também afeta o movimento de água higroscópica. O coeficiente longitudinal é aproximadamente de duas a quatro vezes maior que o coeficiente transversal a uma umidade de 25%, e de 50 a 100 vezes maior, a uma umidade de 5%. Já a difusão no sentido radial é cerca de 17 a 25% maior que na direção tangencial. A velocidade do processo de difusão do interior para a superfície das tábuas afeta diretamente a velocidade de secagem (BROWN; BETHEL, 1975).

O fluxo de água ocorre longitudinalmente e transversalmente e apesar de ser 10 a 15 vezes mais rápido ao longo da grã a maior parte da água é evaporada pelas

faces transversais a esta, isto porque a distância envolvida é menor. Em termos simples, a secagem ocorre da superfície para o interior, evaporando inicialmente a umidade superficial e posteriormente a interna. Deste modo, a secagem é um processo essencialmente de movimento de umidade das camadas internas para a periferia da madeira (CECH; PFAFF, 1977).

O movimento de água abaixo do ponto de saturação das fibras, quando considerado num estado constante, é governado pela primeira Lei de Fick, que tem uma forma matemática análoga às Leis de Darci e Fourier (SIAU, 1971). A primeira Lei de Fick estabelece que o fluxo de umidade é proporcional ao gradiente de concentração na direção do fluxo, onde a constante de proporcionalidade é o coeficiente de difusão.

Os valores calculados teoricamente pela equação da Lei de Fick representam aproximadamente o dobro dos valores experimentais no sentido longitudinal e trinta vezes no sentido tangencial da madeira, uma vez que o fluxo não é constante nem no espaço nem no tempo. Discrepância que segundo TOMASELLI (1974), é atribuída ao fenômeno de difusão impedida, que ocorre nas aberturas minúsculas das membranas das pontoações, cujo diâmetro é menor do que o “caminho livre médio” das moléculas de gás (vapor de água) para que ocorra fluxo sem turbulência.

No entanto, o fluxo por difusão na madeira é considerado um fluxo variável no espaço e no tempo, representado pela segunda Lei de Fick aplicada ao fluxo transiente. Não obstante, esta simples denominação da equação diferencial para a difusão corresponde na verdade à combinação da Lei de Fick com a equação de continuidade (BABBITT, 1977).

Ao contrário do movimento capilar, o movimento de água por difusão é complexo, principalmente devido a uma integração existente entre o movimento de água por difusão nas cavidades celulares (lumes de células) e ao movimento da água higroscópica na parede celular. De acordo com STAMM (1964), os coeficientes de difusão para madeira podem ser obtidos, na prática, de três maneiras diferentes: determinação dos gradientes de umidade formados na madeira sob condições

controladas, medição da taxa de passagem de água através da madeira em estado estacionário e determinação da taxa de secagem.

#### 2.1.4 Cinética da Secagem da Madeira

De acordo com SIMPSON (1991), a água na madeira normalmente se movimenta de zonas de maior teor de umidade para as de menor teor de umidade, podendo ser considerada em duas fases: movimento de água do interior para a superfície e remoção de água desde a superfície.

Para JANKOWSKY (1995), SAHIN e DINCER (2002), a secagem da madeira é um processo térmico complexo no qual ocorre simultaneamente transferência de calor e massa. O deslocamento de uma corrente de ar pela superfície da madeira caracteriza a secagem por convecção. A energia da corrente de ar aquecido é transferida para a superfície da madeira para aumentar a temperatura do sólido e da umidade presente, promovendo a vaporização da água ali existente. A transferência de umidade ocorre quando esta migra para a superfície desde o interior da madeira e daí ao ar circundante, no estado de vapor de água. Simultaneamente, parte da energia recebida pela superfície provocará o aumento da temperatura nessa região, dando início ao transporte de calor da superfície para o centro da peça.

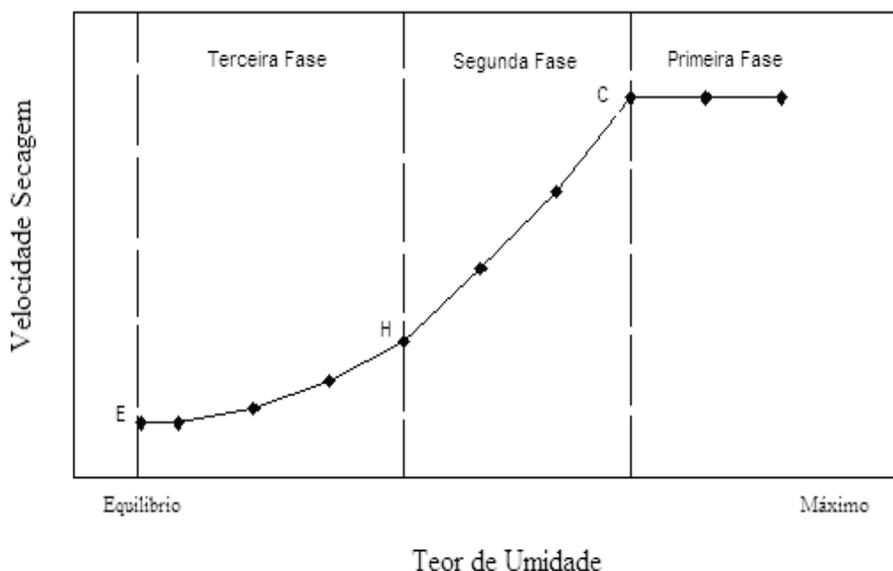
De acordo com VILLIERE (1966), HART (1977), MOYNE e MARTIN (1982), JANKOWKY (1995), SANTOS (2003), no processo de secagem convencional pode-se distinguir três diferentes fases caracterizadas pela variação na taxa de secagem e que determinam a curva característica de secagem do material (Figura 2).

##### a) Primeira fase da secagem

Segundo BRAMHALL (1975), a taxa de evaporação durante a primeira fase da secagem da madeira quando a sua superfície está acima do ponto de saturação das fibras, é proporcional à diferença de temperatura entre o ar e a superfície da madeira e também proporcional à diferença de pressão de vapor entre o ar e a superfície desta. A pressão de vapor de uma superfície úmida não corresponde à pressão de vapor de

saturação na temperatura de bulbo úmido, mas sim à pressão de saturação à temperatura do ponto de orvalho, que é um valor menor.

FIGURA 2 - DIAGRAMA DAS DIVERSAS FASES DA SECAGEM CONVENCIONAL



**FONTE:** Adaptado de VILLIERE (1966)

De acordo com SIAU e AVRAMIDIS (1996), o primeiro estágio na secagem da madeira, acontece quando a superfície está bem acima do ponto de saturação das fibras, ocorrendo fluxo capilar. Isto corresponde ao período de secagem constante, no qual a taxa de perda de umidade é constante e a temperatura da superfície saturada corresponde à temperatura do bulbo úmido do secador.

KRISCHER (1956) citado por BRAMHALL (1975) observou que, durante este estágio, a taxa de evaporação foi proporcional à diferença psicrométrica entre a temperatura de bulbo seco e bulbo úmido. Isto ocorre porque a taxa de transferência de calor é proporcional à diferença de temperatura entre o ar e a superfície da madeira.

Como a temperatura na superfície da madeira corresponde à temperatura de bulbo úmido durante este primeiro estágio, todo o calor (calor sensível) conduzido à madeira é usado para evaporar a umidade da superfície desta, causando diminuição de

sua temperatura. Desta forma, a taxa de evaporação é proporcional à diferença psicrométrica, independentemente da temperatura de bulbo seco. Como a superfície da madeira está saturada, a pressão de vapor parcial em sua superfície é igual à pressão de vapor de saturação na temperatura de bulbo úmido. Parte da energia recebida pela superfície provocará o aumento da temperatura nessa região, iniciando a transferência de calor para o centro da peça. Os parâmetros do escoamento exterior definem o processo de secagem, os quais são a temperatura, o estado hídrico do ar, e especialmente a velocidade deste. Desta forma as camadas limites térmicas e mássicas são as que governam a transferência de calor e de massa.

Quando as condições externas são severas, com temperatura elevada e/ou umidade de equilíbrio baixa, a fase do período de velocidade de secagem constante nem sempre é observável, devido ao curto espaço de tempo no qual subsiste. Depois de um certo tempo, a velocidade de difusão da água proveniente do interior da madeira diminui, enquanto a velocidade de evaporação permanece constante. Atingir-se-á, então, o momento em que o filme de água à superfície não poderá ser mais mantido (nessa região alcança-se o ponto de saturação das fibras). Neste momento, inicia-se a segunda fase (ponto C na Figura 2), denominada taxa decrescente.

#### **b) Segunda fase da secagem**

A segunda fase começa logo que a umidade na superfície passa abaixo do ponto de saturação das fibras, enquanto a zona interior ainda contém água livre (ponto C-H da Figura 2). Desta forma, a madeira atinge um teor de umidade no qual a linha de evaporação se desloca em direção ao centro da peça.

A umidade da madeira no ponto de transição do período constante para o período decrescente é denominada teor de umidade crítico (KOTOK *et al.* 1969). A vaporização da água presente na superfície gerará um gradiente de umidade, principalmente no sentido da espessura, dando início à movimentação da água do interior até a superfície por difusão, que também é influenciada pelo fluxo de calor que ocorre no sentido inverso.

A transferência interna da água ocorre nas fases de líquido, de vapor e como água higroscópica. Na fase líquida é fundamentalmente um fenômeno de capilaridade, sendo afetado pela estrutura anatômica da madeira. As outras fases são basicamente um fenômeno difusivo, influenciado pelas condições termodinâmicas do fluxo de ar e pelas características da própria madeira. A taxa de secagem decresce e depende cada vez mais das propriedades físicas do material.

Quando a madeira seca um pouco, sua temperatura começa a subir acima da temperatura de bulbo úmido e teoricamente não alcançará um estado de equilíbrio até que a madeira não chegue ao teor de umidade preestabelecido. A quantidade de calor transferido diminuirá exatamente na mesma proporção que o diferencial de diminuição de temperatura entre ar-madeira. De qualquer modo, a taxa de evaporação de umidade da madeira agora não estará exatamente na mesma proporção que a taxa de transferência de calor, como no caso da madeira úmida, porque a temperatura da madeira está mudando, requerendo, além do calor latente de vaporização o calor de umectação da água de impregnação.

#### c) Terceira fase da secagem

O estágio final, que corresponde à terceira fase mantendo-se a taxa decrescente, se inicia quando o material está no domínio higroscópico e a linha de evaporação da água se restringe ao centro da peça. Nela não há mais água livre no material e a taxa de secagem é regulada pelas características deste material, até que o teor de umidade de equilíbrio seja alcançado, sendo que a velocidade de secagem tende assintoticamente a zero (ponto H-E da Figura 2). As características do ar (temperatura, umidade relativa e velocidade) já não têm uma influência marcante. A velocidade de evaporação depende, então, da umidade média da madeira e, em certa medida, da temperatura em que se encontra a própria madeira. Também a velocidade do ar parece não ter já qualquer ação direta.

A secagem acima de 100°C diferencia-se daquele indicado anteriormente (convencional). De acordo com HANN (1965) citado por TOMASELLI (1981) existe um movimento paralelo ao de capilaridade, que ocorre na primeira fase da secagem e

que corresponde ao de expansão de bolhas de ar existentes no interior dos lumes criando pressões interiores e com isto o aparecimento de um fluxo hidrodinâmico.

## 2.2 MODELAGEM NA SECAGEM DA MADEIRA

Um modelo matemático compreensível permitirá completar o conhecimento sobre a secagem da madeira, sendo necessário descrever o aspecto físico no qual o modelo está baseado. Deste ponto de vista, vários processos estão envolvidos na secagem da madeira tais como: transferência de calor através da camada limite, condução de calor na madeira, fluxo de água livre e água de impregnação, evaporação de água da superfície da madeira, transferência de calor latente com difusão e evaporação de moléculas (BRAMHALL, 1979a).

A utilização de modelos matemáticos para simular a secagem da madeira é um meio já reconhecido para melhorar os programas de secagem, permitindo diminuir os custos, a energia, o tempo e os defeitos de secagem (HALL, 1987). Os modelos que descrevem adequadamente a transferência de calor e massa durante a secagem poderão ser usados para estudar processos industriais complexos, facilitar os ensaios experimentais e explicar os mecanismos físicos que estão envolvidos nestes processos de transferência. As áreas de aplicação incluem a secagem, a sorção de umidade sob condições ambientais adversas e a interpretação do fenômeno “visco-elástico” (AVRAMIDIS *et al.* 1994).

A maior parte dos modelos matemáticos tem sido empíricos, isso quer dizer que os modelos podem representar a relação causa-efeito sem estarem baseados nos fenômenos envolvidos no processo. O fenômeno pode ser representado por uma equação diferencial ordinária ou uma equação diferencial parcial, que podem ter uma solução analítica, como por exemplo, logarítmica ou exponencial ou uma solução numérica (diferenças finitas, elementos finitos e volumes finitos).

As soluções numéricas são mais populares (HALL, 1987) porque as equações resultantes são muito complexas e como indicado por SILVA, (2000), independentes do tipo de modelo; a solução está sujeita aos coeficientes de transporte de umidade como também às técnicas numéricas escolhidas.

De acordo com PLUMB *et al.* (1984), para testar e validar um modelo matemático são necessárias as seguintes informações experimentais: distribuição da temperatura e da umidade como uma função do espaço e do tempo dentro da madeira, perda de umidade líquida em função do tempo, propriedades do ar (temperatura, velocidade e umidade relativa) e fluxo de calor na superfície da madeira. Destas, a medição do teor de umidade como uma função do espaço e do tempo talvez seja a mais difícil das medições requeridas.

As três maiores vantagens de usar modelos matemáticos são: a sensibilidade dos modelos, que podem ser facilmente avaliados ao mudarem os diferentes parâmetros da secagem; a solução que pode ser generalizada para diferentes espécies de madeiras, e a relação entre a madeira, a água e a temperatura podem ser analisadas (GUI *et al.* 1994).

### 2.2.1 Modelo Difusivo

Na madeira, os modelos desenvolvidos têm sido baseados em mecanismos aproximados, nos quais a descrição macroscópica do fenômeno de transferência deriva das Leis de Fourier e de Fick. Na área de modelagem da madeira, o modelo de difusão representa a primeira tentativa de descrever e quantificar a secagem, sendo a taxa de difusão da água de impregnação o produto de um coeficiente de difusão e uma força condutora.

Segundo KIRK *et al.* (1985), a difusão controla o movimento de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras durante a secagem. Deste modo, a secagem pode ser modelada com precisão como um fenômeno de difusão. Isto é aplicável ao movimento de umidade envolvendo somente a água higroscópica e vapor de água, ou incluindo também a água livre, sendo verdadeiro para uma madeira moderadamente impermeável (folhosas), onde o fluxo de massa da água livre é restrito.

O modelo difusivo pode ser utilizado para determinar o coeficiente de difusão, os perfis de umidade e a taxa de secagem. Os primeiros modelos matemáticos para representar a secagem foram desenvolvidos por LEWIS (1921), SHERWOOD (1929) e NEWMAN (1931), citados por HALL (1987).

No pensamento clássico, a força condutora para a difusão é um gradiente de concentração que, tradicionalmente corresponde ao gradiente de teor de umidade. De qualquer modo, o modelo de difusão é utilizado para descrever o movimento de umidade global na madeira, sendo inadequado em certas circunstâncias. Este modelo assume que o movimento da água é provocado por um gradiente de concentração total de umidade. Não obstante, a água na madeira existe, normalmente, em três fases: água líquida, água higroscópica e vapor de água e em cada uma existem diferentes forças condutoras.

Uma solução analítica da equação de Fick é possível quando a difusividade é considerada constante e o teor de umidade de equilíbrio na superfície é alcançado quase que instantaneamente logo do início da secagem. Durante um curto período de tempo, a quantidade de umidade transferida é pequena, e a concentração de umidade pode ser considerada constante. Assim, a difusividade é determinada por uma constante e é definida a concentração de umidade na madeira.

BUI *et al.* (1980), utilizaram o método numérico por diferenças finitas para resolver a equação diferencial parcial para a difusão em madeira tangencial de *Populus sp* durante a secagem, considerando como forças condutoras o teor de umidade e a umidade relativa. No início, o teor de umidade é uniforme e a superfície da madeira está em equilíbrio com o ambiente de secagem. Estes pesquisadores concluíram que o coeficiente de difusão pode ser determinado pelos gradientes de umidade experimentais e que o teor de umidade e a umidade relativa são forças condutoras válidas para a equação de Fick na secagem isotérmica. Entretanto, o coeficiente de difusão determinado a partir do teor de umidade foi maior que aquele que considera a umidade relativa.

O modelo de difusão é, usualmente, empregado para espécies impermeáveis, onde a secagem é muito lenta. Na secagem de coníferas, devido à sua forma simples, o modelo de difusão é frequentemente usado durante o desenvolvimento das tensões de secagem (MORÉN, 1989; SALIN, 1989; PUIGGALI *et al.* 1993 citados por PANG, 1997).

KIRK *et al.* (1985) modelaram a secagem da madeira de *Quercus rubra* de acordo com a segunda Lei de Fick. No modelo, formularam as seguintes hipóteses: o teor de umidade é a força condutora; o coeficiente de difusão é um valor constante acima do ponto de saturação das fibras; e a  $\frac{1}{4}$  desse valor abaixo do PSF, existe equilíbrio entre o teor de umidade na superfície da madeira e o filme de ar adjacente à superfície, e o movimento de umidade desde o filme para a corrente de ar ocorre por transferência da massa do filme. O modelo foi aplicado a três casos práticos: câmara de secagem convencional com temperatura pré-determinada e umidade relativa programada; secador solar onde a temperatura e a umidade relativa são variadas em ciclos cada 24h durante o processo de secagem; câmara de secagem convencional com uma taxa de secagem máxima pré-determinada. Concluiu-se que do ponto de vista prático e quantitativo, o modelo trabalha muito bem e revela informações acerca do processo de secagem: proporciona resultados para vários tipos de condições; é útil para desenvolver e avaliar programas especialmente quando se controla a máxima taxa de secagem ou os máximos gradientes de umidade; e pode ser adaptado a outras situações de secagem.

DROIN *et al.* (1988a), utilizaram o modelo difusivo para modelar a cinética de absorção de umidade no sentido longitudinal em madeira de *Pinus silvestris*. O modelo considera a transferência de umidade no interior da madeira, controlada por difusão, e, também, a transferência desta do ambiente para a superfície da madeira. Eles concluíram que os valores teóricos e experimentais estão em concordância, validando o modelo proposto. A difusividade foi considerada constante durante o processo de absorção, entretanto o modelo é capaz de usar uma difusividade dependente da concentração. O modelo pode ser usado para qualquer tipo de absorção, especialmente no caso da absorção transversal como foi realizado por DROIN-JOSSERAND *et al.* (1988b). Os mesmos autores em 1989, considerando um modelo difusivo tridimensional, inferiram que o modelo permite obter a cinética de absorção de umidade em amostras de diferentes formas, além de permitir calcular os perfis de concentração de umidade.

EL KOUALI e VERGNAUD (1991) utilizaram uma solução analítica em diferenças finitas do modelo difusivo para descrever o processo de absorção e desorção de água acima e abaixo do ponto de saturação das fibras na direção tangencial, em madeira de *Pinus silvestris*. Estes autores concluíram que a difusão transiente com uma difusividade constante permite descrever não somente o processo de absorção, mas também o processo de desorção com difusão de água através do sólido e sua evaporação desde a superfície. Da mesma forma MOUNJI *et al.* (1991), estudaram o transporte de umidade bi-dimensional (radial-tangencial) acima e abaixo do ponto de saturação das fibras em madeira de *Pinus sylvestris*. Considerou no estudo uma transferência de umidade controlada por difusão com um valor constante igual no sentido radial e tangencial. Eles concluíram que o modelo permite avaliar completamente o processo com o perfil de umidade desenvolvido através da seção transversal da madeira em qualquer tempo, podendo prever a cinética de absorção quando a madeira é imersa em água e a cinética de sorção quando exposta ao ar.

SIMPSON e LIU (1991) determinaram a dependência do coeficiente de difusão em madeira de *Populus sp.* sobre o teor de umidade entre 0 e 18%, a uma temperatura de 43°C, utilizando o método das diferenças finitas para resolver a equação de difusão. Estes autores concluíram que o coeficiente de difusão aumenta em forma exponencial com o teor de umidade. O mesmo resultado foi encontrado para *Quercus rubra* entre um teor de umidade de 6 e 30%, à mesma temperatura por SIMPSON (1993).

CHEN *et al.* (1995) utilizaram uma técnica de otimização e a solução teórica geral de Newman para avaliar o melhor par de coeficientes de difusão e de emissão superficial para determinar como a variação do coeficiente de difusão com o teor de umidade, afeta a preditibilidade da curva de secagem.

No ano seguinte, CHEN *et al.* (1996), utilizaram uma técnica numérica não destrutiva para avaliar o coeficiente de difusão dependente do teor de umidade por meio de curvas de secagem, encontrando que é possível prever o movimento de umidade durante todo o processo de secagem.

HUNTER (1996) utilizou a segunda lei de Fick para o movimento de umidade sob ação de forças capilares em madeira de *Liriodendron tulipifera*, determinando o coeficiente de difusão capilar ( $1,12 \times 10^{-11}$  kg/m s Pa).

SIMPSON e LIU (1997) determinaram os coeficientes de transferência de umidade interna e externa, através de uma técnica de otimização e os resultados foram comparados com a solução de equação da difusão por diferenças finitas, resultando numa adequada concordância entre as curvas de secagem experimentais e calculadas acima do ponto de saturação das fibras.

LANGRISH e BOHM (1997) estudaram o movimento interno de umidade em três espécies de madeiras duras da Austrália acima do ponto de saturação das fibras, utilizando um modelo difusivo com forças condutoras baseadas nos gradientes de umidade e na pressão parcial de vapor da água. Encontraram que os valores são mais bem ajustados quando é usado o teor de umidade como força condutora ao invés da pressão parcial de vapor da água.

PORDAGE e LANGRISH (1999) utilizaram o modelo de difusão para determinar o efeito de diferentes velocidades do ar na secagem de madeiras duras australianas. Estas madeiras têm alta densidade e, portanto, o movimento de transporte de umidade é controlado pelo mecanismo de difusão. As velocidades do ar utilizadas para a simulação foram 0,05 m/s, 0,5 m/s e 2,0 m/s. Estes autores concluíram que parece não ser benéfico reduzir a velocidade abaixo de 0,5 m/s durante a pré-secagem. Entretanto, no final da secagem, há um pequeno ganho no aumento da velocidade do ar em até 2,0 m/s. O uso do coeficiente de transferência de massa para analisar a resistência na camada limite é mais apropriado que o uso do coeficiente de emissão superficial, que varia através do processo. Isto ocorre porque a taxa de transferência de massa desde a superfície não é diretamente proporcional à diferença entre o teor de umidade na superfície e o teor de umidade de equilíbrio.

HUKKA (1999) utilizou madeira verde de *Pinus sylvestris* e *Picea abies* para determinar os coeficientes de difusão efetivo e de transferência de massa, obtidos a partir dos perfis de umidade da madeira que foram determinados durante a secagem. Os cálculos de ambos os coeficientes são baseados usando o modelo difusivo. Os

resultados mostraram que o procedimento empregado é um método adequado para obter valores numéricos para os coeficientes internos e externos de transferência como função do teor de umidade da madeira e da temperatura. Estes coeficientes são aplicáveis em todo o intervalo de umidade entre o estado verde e seco em temperaturas entre 20°C e 80°C, cobrindo todo o processo de secagem da madeira.

LIU *et al.* (2001) aplicaram o modelo difusivo para determinar o coeficiente de difusão em madeira de 25mm de espessura de *Quercus rubra*, com um teor de umidade inicial de 35,9%, teor de umidade de equilíbrio de 5,5% e uma temperatura de 43,4°C (valores correspondentes a SIMPSON, 1993). Como resultado do ajuste do modelo, pode-se obter os gradientes de umidade, curva de secagem (teor de umidade como função do tempo) e a variação do coeficiente de difusão com o teor de umidade em diferentes tempos.

### 2.2.2 Modelo de Transporte

A transferência de calor e massa deveria ser analisada como um processo acoplado, sem deixar de considerar a transferência de massa induzida por um gradiente de temperatura (efeito Soret), que pode consideravelmente contribuir ao fluxo total de umidade (DEGROOT; MAZUR, 1962, PRIGOGINE, 1961, FOSTER; OKOS, 1978, citados por AVRAMIDIS *et al.* 1994).

Vários modelos para o transporte simultâneo de calor e massa em meios porosos podem ser encontrados na literatura (LUIKOV, 1966, WHITAKER, 1977 citados por PLUMB *et al.* 1984). Estes modelos podem, de maneira satisfatória, ser aplicados à madeira sempre que os coeficientes de transportes estejam disponíveis.

Numerosos modelos têm sido desenvolvidos para detalhar o fenômeno de transporte e simular o processo de secagem na madeira. Eles são baseados somente no processo de transporte ou baseados tanto no processo de transporte como nas propriedades físicas da madeira. O modelo de transporte na secagem considera transferência de calor e umidade, sendo a umidade; a água livre, água de impregnação e vapor de água, cobrindo um amplo intervalo das propriedades da madeira e condições de secagem. De qualquer forma, os modelos de transporte são geralmente

complexos e contém numerosas fórmulas matemáticas, que limitam sua aplicação prática.

De acordo com TREMBLAY *et al.* (2000a), duas categorias de modelos para a secagem da madeira podem ser identificadas: um modelo baseado na energia potencial e outro modelo em multicomponente. Na primeira categoria, as três fases da água na madeira (água livre, água impregnação e vapor de água) são caracterizadas pelo potencial de umidade (LUIKOV, 1966, LIU; CHENG, 1991, GUI *et al.* 1994, FORTIN *et al.* 2001, DEDIC *et al.* 2003, dentre outros); a segunda categoria foi proposta por WHITAKER (1977) citado por TREMBLAY *et al.* (2000a), porque as relações de conservação de energia e massa são escritas para água líquida, vapor de água e para a mistura de gases (vapor de água mais ar). Um conjunto de equações macroscópicas são então obtidas, onde o fluxo dos diferentes componentes é descrito usando diferentes coeficientes de transporte e forças condutoras, proporcionando uma descrição compreensível do mecanismo envolvido durante a secagem. Não obstante, resulta num grande conjunto de equações, requerendo o conhecimento dos coeficientes de transporte, forças condutoras e outros parâmetros físicos de difícil obtenção (PLUMB *et al.* 1985, STANISH *et al.* 1986, CHEN; PEI, 1989, TURNER, 1996, PANG, 1996b, 1997, PERRÉ; TURNER, 1999, NIJDAM *et al.* 2000, SOUZA; NEBRA, 2000, dentre outros autores).

PLUMB *et al.* (1985), apresentaram um modelo de transferência de calor e massa, considerando os mecanismos de transporte de umidade por difusão e capilaridade durante a secagem da madeira, incluindo a transferência de calor na superfície. Eles assumiram que toda a evaporação ocorre na superfície durante a primeira fase do processo de secagem e que o transporte capilar do líquido na superfície domina acima do PSF. Estes autores concluíram que a taxa de secagem é controlada pela difusão para baixa permeabilidade do líquido, enquanto o coeficiente de transferência convectivo domina em altas permeabilidades. Além de o modelo prever razoavelmente bem a taxa de secagem e os perfis de umidade.

STANISH *et al.* (1986), desenvolveram um modelo fundamental para o processo de secagem da madeira que considerou a migração tanto do ar como da água.

Eles subdividiram a água em vapor de água, água livre e água de impregnação. Sua importante contribuição foi considerar o transporte de cada fase como não sendo necessariamente por difusão. Eles assumiram que o movimento da água líquida pode ser descrito pela Lei de Poiseuille. O movimento do ar e vapor de água foi descrito pela soma das contribuições da Lei de Poiseuille e a difusão, seu argumento central foi tratar a migração da água de impregnação como um processo de difusão molecular.

O modelo matemático teve as seguintes hipóteses: o transporte de massa e energia são unidirecionais, e a umidade pode existir como água livre, água higroscópica e vapor de água, que coexistem em equilíbrio termodinâmico; se a água livre está presente na madeira, as fases vapor e água higroscópica se mantêm saturadas à temperatura local; na ausência de água livre, a concentração de água de impregnação na madeira e de vapor obedecem às isoterms de sorção à temperatura local; a migração da água de impregnação ocorre por difusão molecular e o fluxo difusivo é proporcional ao gradiente de potencial químico; a permeabilidade efetiva do sólido, para o gás e o líquido, varia com a saturação relativa dos espaços vazios dentro do sólido; as propriedades físicas e de transporte podem variar no espaço e no tempo.

Para NELSON (1991), as distribuições da temperatura e da umidade na madeira exposta a um gradiente de temperatura, podem ser modeladas satisfatoriamente com métodos termodinâmicos.

CLOUTIER *et al.* (1992) citados por TREMBLAY *et al.* (2000a), utilizaram o gradiente do potencial da água como força condutora num modelo isotérmico.

AVRAMIDIS *et al.* (1994), descrevem a transferência de calor e massa na madeira sob condições transientes baseada nos princípios de irreversibilidade termodinâmica (não isotérmicos). Estes autores concluíram que o modelo prediz a transferência de calor e umidade através da madeira no intervalo higroscópico, assim como também o modelo prediz o fenômeno de difusão térmica durante os primeiros estágios da desorção, resultando numa adequada simulação da curva de desorção e da mudança de temperatura.

Um modelo matemático bidimensional foi desenvolvido por PANG (1996b), para simular a transferência de umidade e calor na espessura e largura da madeira de

*Pinus radiata*. O modelo é baseado nas propriedades fisiológicas da madeira antes e durante a secagem. O autor considerou: o movimento de água livre por capilaridade (fluxo é obtido pela Lei de Darcy); o movimento de vapor de água por gradientes de pressão parcial de vapor (fluxo expressado pela Lei de Darcy); e o movimento de água abaixo do PSF, utiliza o potencial químico da água como força condutora. Ele conclui que o modelo predisse adequadamente o perfil de teor de umidade durante a secagem e que pode ser ampliado para prever o desenvolvimento das tensões de secagem.

SOUZA (1994), SOUZA e NEBRA (2000) desenvolveram um modelo unidimensional de transporte simultâneo de calor e massa aplicado e desenvolvido para a secagem da madeira (cavacos), sendo fundamentado no trabalho de KAYIHAN (1982) e STANISH *et al.* (1986). Os autores adotaram os seguintes mecanismos de transporte de massa: a água livre migra por capilaridade (Lei de Darcy); a água higroscópica, devido a um gradiente de potencial químico; e a difusão de vapor devido ao gradiente de pressão parcial de vapor de água. Foram compatibilizados os mecanismos de transporte de massa de água livre e de água higroscópica. Estes autores consideram as seguintes hipóteses: fluxo unidimensional e não há contração; três espécies da água coexistem em equilíbrio termodinâmico local no interior do cavaco (água livre, água de impregnação e vapor); a água de impregnação faz parte da matriz sólida e não ocupa os interstícios existentes na madeira, sendo estes ocupados pela água livre; existe equilíbrio termodinâmico local em todos os pontos da partícula; vapor de água e água de impregnação estão em equilíbrio segundo as isotermas de sorção e se mantêm em estado saturado enquanto existir água livre; o processo de secagem ocorre devido à evaporação interna e externa à partícula; a água de impregnação só é evaporada dentro da partícula após a extinção da água livre. Os autores concluíram que o modelo teve um bom comportamento quando comparado com os dados experimentais da literatura, recomendando-o para a secagem de outros materiais porosos.

WIBERG *et al.* (2000), estudaram a transferência de calor e massa durante a secagem de alburno acima do PSF com temperaturas entre 60°C e 80°C. Foi assumido que durante a secagem um primeiro regime é controlado pela transferência de calor

para a frente de evaporação até que ocorra a saturação irreduzível (PSF). Estes autores concluíram que a secagem de alburno a baixa temperatura é controlada pela transferência de calor quando existe perda de água livre desde o interior para a frente de evaporação.

PANG *et al.* (2001), apresentaram um modelo modificado e estendido para simular o processo de secagem, o resfriamento e o condicionamento. Os fenômenos de transferência considerados no resfriamento e no condicionamento são diferentes do processo de secagem de madeira.

DEDIC *et al.* (2003), apresentaram um modelo tridimensional baseado nas equações de LUIKOV para descrever o processo de transporte de calor e massa na secagem convectiva de madeira de *Fagus moesiaca*. O transporte é tratado nas três direções anatômicas da madeira: radial, tangencial e longitudinal; e considera o teor de umidade acima e abaixo do PSF. As condições dos ensaios foram: temperaturas de 45°C a 90°C, umidade relativa de 50% e 72% e velocidade do ar de 1,0 m/s, 2,0m/s e 3,0m/s. Eles concluíram que os resultados são consistentes e com aceitável precisão em relação aos valores experimentais obtidos em laboratório, recomendando utilizar o modelo em futuros trabalhos para amostras não isotrópicas.

### 2.2.3 Modelo Difusivo e Modelo de Transporte

PANG (1997) comparou o modelo de difusão e o modelo de transporte (forma similar ao modelo de LUIKOV, 1966). Os coeficientes de transferência nestas equações são derivados do modelo de transporte e são função do teor de umidade, da temperatura, das propriedades da madeira (densidade, permeabilidade e difusividade da água de impregnação), e das propriedades do ar (densidade e viscosidade do líquido, densidade e viscosidade do vapor).

O modelo de difusão pode ser uma forma simplificada do modelo de transferência quando o efeito do gradiente de temperatura é desprezível. O modelo de difusão é aplicável para casos onde o gradiente de temperatura é pequeno comparado ao gradiente do teor de umidade. Em outros casos, ou onde a temperatura da madeira é de interesse, o modelo de transporte seria mais apropriado.

O modelo de difusão assume que a migração da umidade no material por difusão é devido a um gradiente de umidade. Usando a segunda Lei de Fick, o modelo de difusão unidimensional é:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial M}{\partial x} \right) \quad 3$$

Onde:

M: teor de umidade local (kg/kg)

t: tempo de secagem (s).

x: coordenada na direção da secagem (m)

D: coeficiente de difusão devido a um gradiente de teor de umidade (m<sup>2</sup>/s).

O coeficiente de difusão (D) é usualmente determinado experimentalmente e varia com a temperatura, teor de umidade e densidade da madeira. Usando o coeficiente determinado experimentalmente, o modelo de difusão pode prever o teor de umidade na madeira durante a secagem. Entretanto, extrapolações do coeficiente para condições fora da extensão experimental podem resultar em erros significativos nas predições do modelo (ROSEN, 1987 citado por PANG, 1997). Portanto, extensivos ensaios são necessários para cobrir um amplo intervalo de condições de secagem e as variáveis da madeira (permeabilidade, densidade, alburno, cerne).

O processo de secagem da madeira pode ser interpretado como uma transferência simultânea de calor e massa, com equilíbrio termodinâmico local em cada ponto na madeira. No modelo baseado no transporte de PANG (1996b), foram considerados o movimento de cada fase da umidade e as propriedades físicas da madeira.

Estas equações são respectivamente:

$$c_p \mathbf{r}_a \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_m \frac{\partial T}{\partial x} \right) - H_{ww} \frac{\partial J_v}{\partial x} \quad 4$$

$$-r_a \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial J}{\partial x}$$

5

Onde:

- $C_p$ : calor específico da madeira (J/kg K).  
 $r_a$ : densidade básica da madeira (kg/m<sup>3</sup>).  
 $T$ : temperatura (K).  
 $t$ : tempo de secagem (s).  
 $x$ : coordenada na direção da secagem (m).  
 $k_m$ : condutividade térmica da madeira úmida (J/m K).  
 $H_{wv}$ : calor de vaporização da água (J/kg).  
 $J_v$ : fluxo de vapor de água (kg/m<sup>2</sup>s).  
 $J$ : fluxo total de umidade (kg/m<sup>2</sup>s).  
 $M$ : teor de umidade local (kg/kg).

Para resolver estas equações, cada termo do fluxo de umidade deve ser avaliado (água líquida, água de impregnação e vapor de água). O movimento de vapor de água é conduzido por gradientes de pressão de vapor e, o fluxo pode ser expresso pela lei de Darcy.

A difusão da água de impregnação ocorre somente quando as paredes das células estão abaixo do PSF e o potencial químico é usado como força condutora, permitindo desta forma representar este fluxo de umidade (STANISH *et al.* 1986).

Para o equilíbrio termodinâmico local, o potencial químico da água de impregnação é o mesmo que o do vapor de água. Quando o vapor obedece à lei dos gases ideais, o gradiente de potencial químico da água de impregnação pode ser determinado para uma certa pressão e temperatura (STANISH, 1986; STANISH *et al.* 1986).

No movimento da água líquida, o gradiente de pressão no líquido é uma consequência da ação capilar entre a fase líquida e o gás no interior do lume (SPOLEK; PLUMB, 1981) e, portanto, o fluxo líquido dentro da madeira é obtido pela lei de Darcy.

No modelo de transporte, todo o processo de secagem pode ser dividido em três períodos, de acordo com o nível de teor de umidade na madeira, quais sejam:

a) O teor de umidade é maior do que o valor mínimo para a continuidade do líquido. Durante este período o movimento do líquido e o fluxo de vapor ocorrem. A água líquida inicialmente move-se para fora e evapora-se numa fina camada (0,5mm a 2mm.) perto da superfície de secagem. Quando o teor de umidade junto à superfície diminui a um valor mínimo para manter a continuidade do líquido, forma-se uma zona seca na superfície e uma zona úmida no centro.

b) O teor de umidade é menor do que um valor mínimo, mas maior do que o ponto de saturação das fibras, período no qual somente o movimento de vapor é possível.

c) A queda do teor de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras ocorre quando os movimentos de vapor e de difusão da água impregnação controlam a perda de umidade durante a secagem.

Baseado no exposto, o fluxo de umidade pode ser calculado para cada fase. Quando o teor de umidade local está acima do PSF, o gás está saturado à temperatura local e a pressão de vapor é uma função somente da temperatura.

Quando o teor de umidade está abaixo do PSF ocorre simultaneamente o movimento de água higroscópica e de vapor, e os gradientes de concentração de umidade e temperatura neste ponto influenciam a secagem.

A equação de transferência de umidade num modelo de transporte pode ser escrita de forma similar às equações de LUIKOV (1966), nas quais o movimento de umidade é conduzido por gradientes de temperatura e de umidade. Ao comparar as equações 2 e 6 torna-se evidente que o modelo difusivo pode ser re-arranjado como uma forma simplificada do modelo de transporte, quando o efeito do gradiente de temperatura é desprezível ( $\partial T/\partial x$ ). Isto ocorre quando o gradiente de temperatura é significativamente menor ou quando o valor do coeficiente de transferência E (coeficiente de transferência de umidade por efeito do gradiente de temperatura) é

muito menor do que o D. A equação que relaciona o efeito dos gradientes de umidade e temperatura é apresentada a seguir:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial M}{\partial x} + E \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad 6$$

No estágio inicial da secagem de madeira de coníferas, quando o teor de umidade é alto (acima de um valor mínimo para a continuidade do líquido), a água líquida se move para a superfície de secagem ou para uma frente de evaporação no material. Neste período, a evaporação da água na zona úmida da madeira não é significativa e o efeito do gradiente de temperatura é pequeno. Também o coeficiente para o gradiente de temperatura (E) é menor que o coeficiente para o gradiente de teor de umidade (D). Neste caso, o modelo de difusão pode prever os perfis de teor de umidade de forma similar aos obtidos pelo modelo de transporte, se apropriados coeficientes de transferência fossem usados no modelo difusivo.

Na zona seca, uma quantidade significativa de calor é conduzida da superfície para a frente de evaporação onde se evapora a água líquida. Desta forma, gradientes de temperatura na zona seca podem não ser desprezíveis e seu efeito sobre a secagem deveria ser considerado. Quando o teor de umidade local está entre o ponto de saturação das fibras e o valor mínimo para a continuidade do líquido, a secagem pode somente ser descrita pelo gradiente de temperatura, porque o coeficiente de transferência é zero neste intervalo de teor de umidade.

No último período de secagem, há dúvidas sobre se o modelo de secagem por difusão pode descrevê-la adequadamente. Com programas moderados, a taxa de secagem chega a ser muito lenta neste período e a temperatura aproxima-se da temperatura ambiente (PANG, 1994 citado por PANG, 1997). Sendo assim, o modelo difusivo pode ser suficientemente preciso para calcular os perfis de umidade. Entretanto, no caso em que a taxa de secagem é relativamente alta e os gradientes de temperaturas são significativos, por exemplo, sob condições de secagem severas para

madeiras muito permeáveis, os gradientes de temperatura são altos e o modelo difusivo não é suficiente para descrever a secagem.

Quando os perfis de temperatura são de interesse, as equações de transferência de calor e massa no modelo de transporte podem ser resolvidas simultaneamente.

#### 2.2.4 Forças Conductoras

De acordo com BRAMHALL (1976a), as Leis de Fick na sua forma mais comum podem ser expressas como:

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (\text{Primeira Lei de Fick}) \quad 7$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (\text{Segunda Lei de Fick}) \quad 8$$

Onde:

$J$ : fluxo igual à massa por unidade de tempo através de uma unidade de área perpendicular ao gradiente de concentração  $\partial c / \partial x$ .

$D$ : coeficiente de difusão.

Na segunda lei de Fick, a taxa de variação da concentração num ponto é proporcional à derivada do gradiente de concentração.

É evidente que a primeira lei de Fick é meramente um caso especial da equação de fluxo, isto é:

$$\text{Fluxo} = \frac{\text{Força}_\text{Conductora}}{\text{Re sistência}} \quad 9$$

$$\text{Fluxo} = \text{Condutância} \times \text{Força}_\text{Conductora}$$

A resistência é a recíproca da condutância e em problemas de difusão, a condutância é chamada de coeficiente de difusão.

Segundo SIAU (1984), existem vários caminhos alternativos para expressar as forças condutoras ou potenciais, que conduzem a umidade através da madeira. As diferentes equações desenvolvidas para explicar o transporte de massa podem ser observadas na Tabela 1. Todos os coeficientes listados nesta tabela podem ser expressas em termos de  $D$ , que é a forma mais comum utilizada na literatura (SIAU, 1984).

O gradiente de teor de umidade tem sido tradicionalmente, empregado como força condutora para a difusão (ROSEN, 1976; DROIN *et al.* 1988a e 1988b; DROIN *et al.* 1989; MOUNJI *et al.* 1991; SIMPSON; LIU, 1991, El KOUALI; VERGNAUD, 1991).

TABELA 1 – EQUAÇÕES E POTENCIAIS PARA EXPLICAR O MOVIMENTO DE UMIDADE NA MADEIRA

EQUAÇÃO DE TRANSPORTE	COEFICIENTE	POTENCIAL	DEFINIÇÃO
$J = -D \frac{\partial c}{\partial x}$	$D, \text{cm}^2/\text{s}$	$c, \text{g}/\text{cm}^3$	Concentração
$J = -K_m \frac{\partial M}{\partial x}$	$K_m, \text{g}/\text{cm s } \%$	$M, \%$	Teor de umidade
$J = -K_p \frac{\partial p}{\partial x}$	$K_p, \text{g cm}/\text{dinas s}$	$p, \text{dinas}/\text{cm}^2$	Pressão parcial de vapor
$J = -K_\mu \frac{\partial \mu}{\partial x}$	$K_\mu, \text{g mol}/\text{cm s cal}$	$\mu, \text{cal}/\text{mol}$	Potencial químico
$J = -K_j \frac{\partial j}{\partial x}$	$K_j, \text{g}/\text{cm atm s}$	$f, \text{atm}$	Potencial da água
$J = -K_f \frac{\partial f}{\partial x}$	$K_f, \text{g}/\text{cm s } \%$	$f, \text{dinas}/\text{cm}$	Pressão de expansão

FONTE: SIAU (1984).

BUI *et al.* (1980), consideraram como forças condutoras o teor de umidade e a umidade relativa. Como resultado obteve que o coeficiente de difusão apresentou maiores valores quando relacionado ao teor de umidade da madeira que quando considerada a umidade relativa.

CUNNINGHAM *et al.* (1989), determinaram o coeficiente de transferência de umidade acima do PSF em *Pinus radiata* sob condições isotérmicas utilizando um gradiente de concentração de umidade como força condutora.

BRAMHALL (1976a, 1976b, 1979a, 1979b, 1995) analisou mecanismos para o movimento de umidade através da madeira, sugerindo que usar uma força condutora baseada nos gradientes de pressão de vapor de água para prever a taxa de secagem tem maior fundamento básico do que usar gradientes de teor de umidade.

Não obstante, de acordo com LANGRISH e BOHM (1997) dada a complexidade do movimento de umidade através da madeira, não há certeza de que a pressão de vapor como força condutora ajustará melhor o comportamento da secagem quando utilizado o teor de umidade como força condutora. Estes autores avaliaram experimentalmente gradientes de teor de umidade e pressão de vapor como forças condutoras, no movimento de umidade interno em madeiras duras (folhosas) da Austrália. Estes pesquisadores concluíram que o modelo de difusão é mais eficiente, quando são considerados os gradientes de teor de umidade como forças condutoras, do que os gradientes de pressão parciais de vapor de água.

Os gradientes de potencial da água como forças condutoras foram utilizados por CLOUTIER e FORTIN (1991, 1994), CLOUTIER *et al.* (1995), TREMBLAY *et al.* (1996), DEFO *et al.* (1999), ZHANG e PERALTA (1999) e os gradientes de potencial químico (STANISH, 1986, STANISH *et al.* 1986). Acima do PSF as forças capilares foram consideradas como forças condutoras (SPOLEK; PLUMB, 1981).

TREMBLAY *et al.* (2000a), usaram o método do perfil instantâneo para estabelecer a curva de desorção da condutividade efetiva da água em madeira de alburno de *Pinus resinosa* Ait, na direção radial e tangencial da madeira de verde até 9% de umidade. As temperaturas utilizadas foram 18°C, 56°C e 85°C. A conclusão foi que o valor da condutividade efetiva da água na direção radial e tangencial aumenta

com o aumento do teor de umidade, de seca até a condição saturada, em várias ordens de magnitude ( $10^4$  -  $10^5$ ). O conhecimento da função da condutividade efetiva da água e a relação do teor de umidade e do potencial de água permitem utilizar um modelo bidimensional do movimento de umidade na madeira, usando o gradiente do potencial da água como força condutora para a secagem da madeira em temperatura até 85°C.

O gradiente de pressão de expansão (“spreading”) foi utilizado como força condutora por NELSON (1986a, 1986b, 1986c), SKAAR e BABIAK (1982).

A modelagem de fluxos e de perfis de umidade na madeira sob condições transientes não isotérmicas foi estudada por SKAAR e SIAU (1981), SIAU e JIN (1985), AVRAMIDIS e SIAU (1987), NELSON (1991).

SKAAR e SIAU (1981) apresentaram três equações para representar o movimento não isotérmico através da madeira na direção transversal, concluindo que as três equações dão aproximadamente os mesmos resultados em baixos teores de umidade. No entanto, em altos teores de umidades, os resultados divergem.

Os coeficientes fenomenológicos que descrevem a direção e a magnitude do fluxo de umidade através da madeira foram derivados do gradiente de ativação das moléculas de água ou dos gradientes do potencial da água ou potencial químico, como função das forças condutoras da difusão, e os modelos desenvolvidos foram avaliados sob condições não isotérmicas estacionárias. (SIAU *et al.* 1986, AVRAMIDIS *et al.* 1987, AVRAMIDIS; SIAU, 1987, SIAU; AVRAMIDIS, 1992, e SIAU; AVRAMIDIS, 1993 citados por AVRAMIDIS *et al.* 1994).

### 2.3 PERFIS DE UMIDADE

A secagem da madeira verde envolve o fluxo de água livre acima do ponto de saturação das fibras, e a difusão de água higroscópica e do vapor de água abaixo do PSF. A permeabilidade afeta amplamente o fluxo da água livre, enquanto a densidade está mais relacionada à difusão abaixo deste ponto. A forma dos perfis ou gradientes de umidade que se desenvolvem na secagem e a forma da curva de secagem é dependente dos fatores indicados acima. Deste modo, a evolução da taxa de secagem e

os perfis de umidade revelam em grande parte a natureza física da madeira e os fatores que controlam o comportamento da secagem.

Os perfis de umidade acima do PSF são diferentes entre madeiras permeáveis e pouco permeáveis, sendo o fluxo de perda de umidade maior em madeiras permeáveis e, por conseguinte menores gradientes de umidade. Não obstante, abaixo do PSF os perfis de umidade são essencialmente os mesmos para madeiras permeáveis ou pouco permeáveis (HART; DARWIN, 1971).

A maior parte do movimento de umidade durante a secagem da madeira acontece acima do PSF, sendo, portanto, o objetivo principal na secagem da madeira reduzir o teor de umidade tão rapidamente quanto possível sem provocar defeitos. Quando a madeira seca muito rápida forma-se gradientes de umidade excessivos, causando uma contração desigual e produzindo defeitos na madeira. Se os gradientes de umidade podem ser preditos, os programas e as condições de secagem podem ser controlados para prevenir os defeitos (RESCH *et al.* 1989).

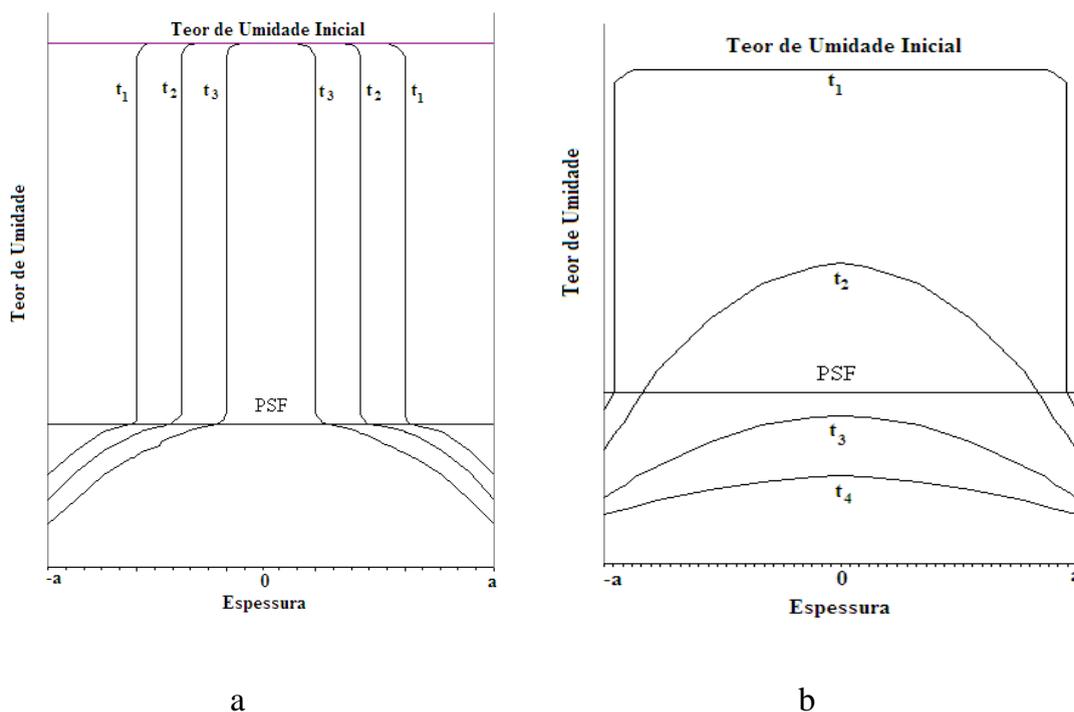
Os mecanismos de secagem na madeira foram discutidos por HAWLEY (1931) citado por SIMPSON (1976); RICE e YOUNGS (1991). O autor comparou dois tipos de secagem extremos; num não existe movimento de água livre (Figura 3a) e no outro há movimento de água livre para a superfície (Figura 3b).

A Figura 3a mostra o gradiente de teor de umidade de uma madeira pouco permeável secando simetricamente desde as duas faces. Todo o movimento de umidade para a superfície ocorre por difusão sobre o gradiente higroscópico entre a superfície e a descontinuidade, onde o teor de umidade aumenta numa linha vertical. Assim a chamada água livre não se movimenta além desta “linha úmida” e o teor de umidade no centro permanece no nível do teor de umidade inicial até que a linha úmida se retraia. O resultado é um perfil com uma descontinuidade no ponto de saturação das fibras.

A Figura 3b ilustra os gradientes de perda de umidade sob o mecanismo combinado do movimento de difusão e água líquida. Neste caso, o movimento de umidade na madeira ocorre no interior, como também na superfície externa. O resultado é bem definido, perfis contínuos e com uma forma que se aproxima de uma

parábola. Nenhuma linha úmida está presente e a água livre pode-se mover do centro antes que o centro alcance o PSF. Estes perfis predominam na metade e nos últimos estágios da secagem.

FIGURA 3 - EXEMPLOS EXTREMOS DE MOVIMENTO DE UMIDADE UNIDIRECIONAL SEGUNDO HAWLEY (1931). AS SUPERFÍCIES SÃO -a E a



NOTAS:

$t_1, t_2, t_3, t_4$ : tempo de secagem

**FONTE:** Adaptado de RICE e YOUNGS (1991).

Os gradientes de umidade excessivos podem causar fendas e empenamentos, por isso a habilidade do modelo numérico para prever a distribuição de umidade na madeira é de grande interesse (PLUMB *et al.* 1985). Segundo JANKOWSKY (1990), na secagem da madeira, as rachaduras superficiais podem aparecer quando as condições são muito severas, isto é, baixas umidades relativas provocam a rápida secagem das camadas superficiais a valores inferiores ao PSF, enquanto as camadas internas estão ainda com mais de 30% de umidade. Como as camadas internas impedem as superficiais de se retraírem, aparecem tensões que, excedendo a

resistência da madeira à tração perpendicular às fibras, provocam o rompimento dos tecidos lenhosos, o que normalmente ocorre nos tecidos que compõem os raios.

Portanto, a habilidade para prever o tempo requerido nas mudanças de teor de umidade na madeira, os defeitos e as variáveis do material permitiram melhorar a tecnologia da secagem da madeira (SIMPSON; LIU, 1991).

De acordo com LANGRISH e BOHM (1997), o conhecimento dos mecanismos de movimento de umidade na madeira é relevante para prever a taxa na qual as tábuas secam e também para prever os esforços de secagem. Estes esforços ocorrem devido à existência de uma contração diferencial entre a superfície e o centro da madeira, e podem ser o suficiente para causar rachaduras diminuindo a qualidade da madeira.

O problema principal durante o processo de secagem, são as rachaduras superficiais, sendo estas a base para realizar uma otimização dos programas de secagem. Por esta razão, o desenvolvimento de tensões durante a secagem na superfície pode ser calculado através do perfil de umidade interno (HUKKA, 1999). YEO *et al.* (2002a) indicam que a determinação do teor de umidade superficial é importante no estudo das tensões desenvolvidas e na prevenção de fendas superficiais na madeira durante a secagem.

## 2.4 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DO AR

### 2.4.1 Pressão de Vapor Saturada e Parcial da Água

De acordo com REID *et al.* (1987), a pressão de vapor saturado da água pode ser calculada pela equação de Antoine, adequada para uma pressão entre 1.333,2 Pa e 199.983,6 Pa, a qual é indicada a seguir:

$$P_{vs} = \exp \left( 18,3036 - \frac{3.816,44}{T_k - 46,13} \right) \times \frac{101.325}{760} \quad 10$$

Onde:

$P_{vs}$ : pressão de vapor saturado (Pa).

$T_k$ : temperatura absoluta (K).

Para o ar saturado com água, pode-se afirmar que a pressão parcial da água na mistura ar-água é igual à sua pressão de vapor na mesma temperatura.

De acordo com ROSSI (1987), a pressão de vapor parcial da água no ar, que corresponde à pressão parcial exercida pelas moléculas de vapor de água presente no ar, pode ser determinada pela definição de umidade relativa, o que é apresentado abaixo:

$$P_v = UR \times P_{vs} \quad 11$$

Onde:

$P_v$ : pressão de vapor parcial (Pa)

$P_{vs}$ : pressão de vapor saturado (Pa)

$UR$ : umidade relativa, em decimal.

#### 2.4.2 Umidade Absoluta

A umidade absoluta é a massa de vapor de água contida em uma unidade de massa de ar seco e pode ser descrita em função da pressão parcial da água no ar (ROSSI, 1987), a que é indicada a seguir:

$$X = 0,622 \frac{UR \times P_v}{P_{at} - UR \times P_v} \quad 12$$

Onde:

$X$ : umidade absoluta (kg de água/kg ar seco)

$P_v$ : pressão de vapor parcial (Pa)

$UR$ : umidade relativa (decimal)

$P_{at}$ : pressão atmosférica (Pa).

#### 2.4.3 Fração Molar dos Componentes

Pela definição de pressão parcial a fração molar de cada espécie pode ser calculada pela relação entre a pressão parcial do componente na mistura gasosa e a

pressão total (Lei de Dalton). No caso da água no ar, a pressão total é a pressão atmosférica. A equação para determinar a fração molar é mostrada a seguir:

$$x_v = \frac{P_v}{P_{at}} \quad 13$$

$$x_{ar} = 1 - x_v \quad 14$$

Onde:

$P_v$ : pressão parcial do vapor (Pa)

$P_{at}$ : pressão atmosférica (Pa)

$x_v$ : fração molar do vapor de água no ar

$x_{ar}$ : fração molar do ar.

#### 2.4.4 Viscosidade do Ar

A viscosidade do ar segundo POLING *et al.* (2001) é determinada de acordo a seguinte expressão:

$$m_{ar} = \frac{0,807 \times Tr_{ar}^{0,618} - 0,357 \times \exp(-0,449 \times Tr_{ar}) + 0,340 \times \exp(-4,058 \times Tr_{ar}) + 0,018}{E_{ar}} \quad 15$$

Sendo que a temperatura de referencia do ar é:

$Tr_{ar} = T_k / 132,164$  (K), adimensional.

$$E_{ar} = ((1E^{-3} R \times 132,164 \times Nav^2) / (1E^{-3} M_{ar})^3 \times (3.736.500)^4)^{(1/6)}, (\text{Pa s})^{-1}. \quad 16$$

Onde:

$m_{ar}$ : viscosidade do ar (Pa s)

$T_k$ : temperatura absoluta do ar (K)

$M_{ar}$ : massa molecular do ar (28,84 kg/kmol).

$Nav$ : número de Avogadro (6,022E23 kmol<sup>-1</sup>).

$R$ : constante dos gases ideais (8.314,5 J/kmol K; Nm/kmol K; Pa m<sup>3</sup>/kmol K).

#### 2.4.5 Viscosidade do Vapor de Água

A viscosidade do vapor de água segundo POLING *et al.* (2001) pode ser determinada segundo a expressão abaixo:

$$\mathbf{m}_v = \frac{0,807 \times T_{r_v}^{0,618} - 0,357 \times \exp(-0,449 \times T_{r_v}) + 0,340 \times \exp(-4,058 \times T_{r_v}) + 0,018}{E_v} \quad 17$$

Sendo que a temperatura de referência do vapor de água é:

$$T_{r_v} = T_k / 647,14 \text{ (K)}, \text{ adimensional.}$$

$$E_v = ((1E^{-3} R \times 647,14 \times N_{av}^2) / ((1E^{-3} M_v)^3 \times (22.064.000)^4))^{(1/6)}, \text{ (Pa s)}^{-1}. \quad 18$$

Onde:

$\mathbf{m}_v$ : viscosidade do vapor de água (Pa s).

$M_v$ : massa molecular da água (18,015 kg/kmol).

$T_k$ : temperatura absoluta do ar (K)

$N_{av}$ : número de Avogadro (6,022E23 kmol<sup>-1</sup>).

$R$ : constante dos gases ideais (8.314,5 J/kmol K; Nm/kmol K; Pa m<sup>3</sup>/kmol K).

#### 2.4.6 Viscosidade da Mistura Ar-Vapor de Água

A viscosidade da mistura ar-vapor de água segundo REID *et al.* (1987) pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$\mathbf{m}_m = \frac{\mathbf{m}_{ar}}{\left[ 1 + \left( \frac{x_v}{x_{ar}} \right) \times f_{12} \right]} + \frac{\mathbf{m}_v}{\left[ 1 + \left( \frac{x_{ar}}{x_v} \right) \times f_{21} \right]} \quad 19$$

O parâmetro de interação molecular entre duas moléculas, que relacionam a massa molecular e a viscosidade de cada componente adimensional, pode ser determinado pela expressão abaixo:

$$f_{12} = \frac{\left[ 1 + \left( \frac{m_{ar}}{m_v} \right)^{1/2} \times \left( \frac{M_v}{M_{ar}} \right)^{1/4} \right]^2}{\left[ \sqrt{8} \left( 1 + \frac{M_{ar}}{M_v} \right)^{1/2} \right]} \quad 20$$

$$f_{21} = \left[ f_{12} \left( \frac{m_v}{m_{ar}} \right) \left( \frac{M_{ar}}{M_v} \right) \right] \quad 21$$

Onde:

$m_m$ : viscosidade da mistura (Pa s )

$m_{ar}$ : viscosidade do ar (Pa s)

$m_v$ : viscosidade do vapor de água (Pa s).

$x_v$ : fração molar do vapor de água no ar

$x_{ar}$ : fração molar do ar.

#### 2.4.7 Calor Específico do Ar

De acordo com SONNTAG e BORGAROKKE (2003), o calor específico do ar pode ser calculado pela seguinte equação:

$$C_{ar} = (C_{ar0} + C_{ar1} \times T_k + C_{ar2} \times T_k^2 + C_{ar3} \times T_k^3) \times 1.000 \quad 22$$

Onde:

$C_{ar}$ : calor específico do ar (J/kg K);  $T_k = T_k / 1.000$ , temperatura absoluta.

$C_{ar0}$ : 1,050.

$C_{ar1}$ : -0,365.

$C_{ar2}$ : 0,850.

$C_{ar3}$ : -0,390.

#### 2.4.8 Calor Específico do Vapor de Água

O calor específico do vapor de água segundo SONNTAG e BORGAROKKE (2003), pode ser calculado por:

$$C_v = (C_{v0} + C_{v1} \times T_k + C_{v2} \times T_k^2 + C_{v3} \times T_k^3) \times 1.000 \quad 23$$

Onde:

$C_v$ : calor específico do vapor de água (J/kg K);  $T_k = T_k / 1.000$ , temperatura absoluta.

$C_{ar0}$ : 1,790.

$C_{ar1}$ : 0,107.

$C_{ar2}$ : 0,586.

$C_{ar3}$ : -0,200.

#### 2.4.9 Calor Específico da Mistura Ar-Vapor de Água

O calor específico da mistura pode ser calculado de acordo com a seguinte equação:

$$C_m = C_{ar} + X \times C_v \quad 24$$

Onde:

$C_m$ : calor específico da mistura (J/kg K).

$X$ : umidade absoluta.

$C_{ar}$ : calor específico do ar (J/kg K).

$C_v$ : calor específico do vapor de água (J/kg K).

#### 2.4.10 Densidade da Mistura Ar-Vapor de Água

Esta propriedade do fluido pode ser calculada, segundo a expressão abaixo:

$$\mathbf{r}_m = P_{at} \times \left( \frac{x_{ar} \times M_{ar} + x_v \times M_v}{RT_k} \right) \quad 25$$

Onde:

$\mathbf{r}_m$ : densidade da mistura (kg/m<sup>3</sup>).

$x_v$ : fração molar do vapor de água no ar

$x_{ar}$ : fração molar do ar.

$M_v$ : massa molecular da água (18,015 kg/kmol).

$M_{ar}$ : massa molecular do ar (28,84 kg/kmol).

$T_k$ : temperatura absoluta do ar (K)

$R$ : constante dos gases ideais (8.314,5 J/kmol K; Nm/kmol K; Pa m<sup>3</sup>/kmol K).

#### 2.4.11 Viscosidade Cinemática da Mistura Ar-Vapor de Água

A viscosidade cinemática da mistura pode ser calculada, segundo a expressão abaixo:

$$\mathbf{n}_m = \frac{\mathbf{m}_m}{\mathbf{r}_m} \quad 26$$

Onde:

$\mathbf{n}_m$ : viscosidade cinemática da mistura ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

$\mathbf{r}_m$ : densidade da mistura ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

$\mathbf{m}_m$ : viscosidade da mistura, Pa s. ( $1 \text{ Pa s} = 1 \text{ kg}/\text{m s}$ ).

#### 2.4.12 Condutividade Térmica do Ar

A condutividade térmica do ar é calculada segundo POLING *et al.* (2001), pela seguinte equação:

$$k_{ar} = \mathbf{m}_{ar} \times \frac{C_{ar} M_{ar} - R}{M_{ar}} \left[ 1,15 + \frac{2,03}{\left( \frac{C_{ar} M_{ar}}{R} \right) - 1} \right] \quad 27$$

Onde:

$k_{ar}$ : condutividade térmica do ar ( $\text{J}/\text{s m K}$ ).

$\mathbf{m}_{ar}$ : viscosidade do ar (Pa s).

$C_{ar}$ : calor específico do ar ( $\text{J}/\text{kg K}$ ).

$M_{ar}$ , massa molecular do ar ( $28,84 \text{ kg}/\text{kmol}$ ).

R: constante dos gases ideais ( $8.314,5 \text{ J}/\text{kmol K}$ ).

#### 2.4.13 Condutividade Térmica do Vapor de Água

A condutividade térmica do vapor segundo POLING *et al.* (2001) pode ser calculada pela seguinte equação:

$$k_v = \mathbf{m}_v \times \frac{C_v M_v - R}{M_v} \left[ 1,15 + \frac{2,03}{\left( \frac{C_v M_v}{R} \right) - 1} \right] \quad 28$$

Onde:

$k_v$ : condutividade térmica do vapor de água (J/s m K).

$\mu$ : viscosidade do vapor de água (Pa s).

$C_v$ : calor específico do vapor de água (J/kg K).

$M_v$ : massa molecular do vapor de água (18,015 kg/kmol).

$R$ : constante dos gases ideais (8.314,5 J/kmol K).

#### 2.4.14 Condutividade Térmica da Mistura Ar-Vapor de Água

A condutividade térmica da mistura de acordo com FOLING *et al.* (2001) pode ser calculada pela seguinte equação:

$$k_h = \frac{k_{ar}}{1 + \left(\frac{x_v}{x_{ar}}\right) \times f_{12}} + \frac{k_v}{1 + \left(\frac{x_{ar}}{x_v}\right) \times f_{21}} \quad 29$$

Onde:

$k_h$ , condutividade térmica da mistura ar-vapor de água (J/s m K).

$k_v$ : condutividade térmica do vapor de água (J/s m K).

$k_{ar}$ : condutividade térmica do ar (J/s m K).

$x_v$ : fração molar do vapor de água no ar

$x_{ar}$ : fração molar do ar.

#### 2.4.15 Difusividade Térmica da Mistura Ar-Vapor de Água

A difusividade de acordo com BEJAN (2004) pode ser calculada pela seguinte equação:

$$a_m = \frac{k_h}{r_m C_m} \quad 30$$

Onde:

$a_m$ : difusividade térmica da mistura ar-vapor de água (m<sup>2</sup>/s).

$k_h$ , condutividade térmica da mistura ar-vapor de água (J/s m K).

$r_m$ : densidade da mistura (kg/m<sup>3</sup>).

$C_m$ : calor específico da mistura (J/kg K).

## 2.5 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA MADEIRA

As propriedades térmicas são relevantes para a secagem da madeira porque estão relacionadas ao requerimento de energia e ao tempo requerido para aquecer a madeira à temperatura de secagem (SIMPSON, 1991). Para LANGRISH e WALKER (1993), o conhecimento das propriedades térmicas não é somente importante quando consideram as propriedades de isolamento e resistência ao fogo, mas também são necessárias para determinar o tempo de vaporização nas toras para desenrolamento e o tempo de aquecimento da madeira antes da secagem.

### 2.5.1 Condutividade Térmica

A condutividade térmica é a medida da taxa de fluxo de calor através de uma unidade de espessura de um material, sujeita a um gradiente de temperatura. É afetada pela densidade, teor de umidade, teor de extrativos, direção da grã, irregularidades estruturais tais como, fendas, nós, ângulo das fibras e temperatura. A condutividade térmica aumenta com o aumento da densidade, do teor de umidade, da temperatura, do conteúdo de extrativos. A condutividade é aproximadamente a mesma na direção radial e na direção tangencial. No sentido longitudinal, é de 1,5 a 2,8 vezes maior que no sentido transversal (WOOD HANDBOOK, 1999).

Segundo KOLLMANN e CÔTÉ (1968), a equação que permite determinar a condutividade térmica é:

$$k_1 = 1,68 \times 10^{-4} r_u + 0,022$$

$$k_u = k_1 [1 - 0,0125 (10 - Tu_i)]$$

$$k_{mad} = 1,163 \times k_u \left[ 1 - \left[ (1,1 - 9,8 \times 10^{-4} r_o) \times \left( \frac{27 - T}{100} \right) \right] \right] \quad 31$$

Onde:

$k_{mad}$ : condutividade térmica da madeira (J/m s °C).

$k_1$ : valor referencial a 10% de teor de umidade.

$r_u$ : densidade aparente (kg/m<sup>3</sup>) a 10% de teor de umidade.

$k_u$ : valor referencial ao teor de umidade inicial (Tu<sub>i</sub>) da madeira (%).

T: temperatura do ambiente (°C).

$r_o$ : densidade anidra (kg/m<sup>3</sup>).

### 2.5.2 Calor Específico

O calor específico é definido como a quantidade de energia necessária para aumentar a temperatura de uma substância de massa conhecida de uma grandeza para outra. O calor específico da madeira que contém água é maior do que o da madeira seca. Acima do PSF, corresponde à soma do calor específico da madeira mais o calor específico da água, mais um fator que considera a energia adicional da água de impregnação na madeira (WOOD HANDBOOK, 1999).

Segundo KOLLMANN e CÔTÉ (1968), o calor específico pode ser determinado por:

$$C_{mad} = 4.186,8 \times \left( \frac{0,01 \times Tu_i + 0,324}{1 + 0,01 \times Tu_i} \right) \quad 32$$

Onde:

$C_{mad}$ : calor específico da madeira (J/kg °C)

$Tu_i$ : teor de umidade inicial da madeira (%).

### 2.5.3 Difusividade Térmica

A difusividade térmica é uma medida do quão rápido um material pode absorver calor do ambiente. É a razão entre a condutividade térmica e o produto entre a densidade e o calor específico (WOOD HANDBOOK, 1999).

Segundo KOLLMANN e CÔTÉ (1968), a difusividade térmica pode ser determinado por:

$$a_{mad} = \frac{k_{mad}}{C_{mad} \times r_{av}} \quad 33$$

Onde:

$a_{mad}$ : difusividade térmica da madeira (m<sup>2</sup>/s).

$C_{mad}$ : calor específico da madeira (J/kg °C)

$r_{av}$ : densidade aparente da madeira verde,  $r_{av} = r_b(1 + T_{ui})$ , em (kg/m<sup>3</sup>).

$k_{mad}$ : condutividade térmica da madeira (J/m s °C).

## 2.6 NÚMEROS ADIMENSIONAIS

### 2.6.1 Número de Prandtl

O número de Prandtl é uma função somente das propriedades do fluido, e estabelece uma relação entre a difusividade de quantidade de movimento e a difusividade térmica (KREITH, 1977). Este pode ser determinado pela relação abaixo:

$$\text{Pr} = \frac{C_m \mathbf{m}_m}{k_h} = \frac{\mathbf{n}_m}{\mathbf{a}_m} \quad 34$$

Onde:

Pr: número de Prandtl.

$C_m$ : calor específico da mistura (J/kg K).

$\mathbf{m}_m$ : viscosidade da mistura, Pa s. (1Pa s = 1kg/m s).

$k_h$ , condutividade térmica da mistura ar-vapor de água (J/s m K).

$\mathbf{n}_m$ : viscosidade cinemática da mistura (m<sup>2</sup>/s).

$\mathbf{a}_m$ : difusividade térmica da mistura ar-vapor de água (m<sup>2</sup>/s).

### 2.6.2 Número de Reynolds

O número de Reynolds mede a relação entre a inércia ( $\mathbf{r}_m V_{ar}$ ) do fluido e a ação das tensões viscosas. Determina, assim, o quão turbulento (ou não) é o escoamento. A turbulência favorece enormemente o transporte de calor e massa.

Para o cálculo do número de Reynolds, considerou-se a passagem do ar através de um duto formado por duas tábuas adjacentes e os sarrafos separadores, empregando-se o conceito de diâmetro hidráulico (KREITH, 1977). Este pode ser determinado por:

$$D_h = 4 \frac{A}{P} \quad 35$$

Onde:

$D_h$ : diâmetro hidráulico (m).

A: área da seção transversal do conduto considerado (m<sup>2</sup>).

P: perímetro correspondente à seção transversal do conduto considerado (m).

O número de Reynolds, que caracteriza as condições do escoamento corresponde a seguinte equação:

$$Re = \frac{V_{ar} \times D_h}{\mathbf{n}_m} = \frac{\mathbf{r}_m V_{ar} D_h}{\mathbf{m}_m} \quad 36$$

Onde:

$V_{ar}$ : velocidade do ar (m/s).

$D_h$ : diâmetro hidráulico (m).

$\mathbf{n}_m$ : viscosidade cinemática (m<sup>2</sup>/s).

$\mathbf{r}_m$ : densidade da mistura (kg/m<sup>3</sup>).

$\mathbf{m}_m$ : viscosidade da mistura, Pa s. (1Pa s = 1kg/m s).

### 2.6.3 Número de Biot

O número de Biot representa uma medida da importância relativa da resistência térmica dentro de um corpo sólido e corresponde à razão entre as resistências internas e externas ao transporte de calor (ÖZISIK, 1990). O número de Biot é da por:

$$Bi = \frac{h_c L}{k_{mad}} \quad 37$$

Onde:

$Bi$ : número de Biot

$h_c$ : coeficiente de condutividade térmica (J/s m<sup>2</sup> °C).

$L$ : comprimento, (no estudo L=espessura/2). (m).

$k_{mad}$ : condutividade térmica da madeira (J/s m °C).

### 2.6.4 Número de Fourier

O número de Fourier é uma medida da razão entre a taxa de condução de calor e a taxa de retenção de calor, num elemento de volume. Por isso, quanto maior o número de Fourier, mais profunda é a penetração do calor num sólido durante um

certo intervalo de tempo (ÖZISIK, 1990). O número de Fourier pode ser calculado por:

$$Fo = \frac{t a_{mad}}{e^2} \quad 38$$

Onde:

$F_o$ : Número de Fourier.

$e$ : espessura (m).

$t$ : tempo (s).

$a_{mad}$ : difusividade térmica da madeira ( $m^2/s$ ).

#### 2.6.5 Número de Schmidt

O número de Schmidt caracteriza a transferência de massa do mesmo modo que o número de Prandtl caracteriza a transmissão de calor (KREITH, 1977), sendo calculado pela seguinte relação:

$$Sc = \frac{m_g}{r_g D_v} \quad 39$$

A difusividade do vapor de água segundo SOUZA e NEBRA (2000) pode ser calculada pela relação abaixo:

$$D_v = 1,2 \times 10^{-9} (T_k)^{1,75} \quad 40$$

Onde:

$D_v$ : coeficiente difusivo do vapor ( $m^2/s$ ).

$r_g$ : densidade do gás ( $kg/m^3$ ).

$m_g$ : viscosidade do gás, Pa s. (1Pa s = 1kg/m s).

$t$ : tempo (s).

$T_k$ : temperatura absoluta (K).

## 2.7 MODELOS EMPÍRICOS PARA ESTIMATIVA DE COEFICIENTES CONVECTIVOS

Os coeficientes de transferência de calor e massa externos (convectivos) são usados para definir as condições de contorno na superfície de secagem (PANG, 1996a), caracterizando a fronteira das equações de transferência de calor e massa de um modelo de secagem de madeira (TREMBLAY *et al.* 2000b). De acordo com ÖZISIK (1990), são necessárias condições de contorno e iniciais para a análise dos problemas de condução do calor. Nos problemas onde o regime é transitório, é preciso determinar quais são as condições iniciais e de contorno que caracterizam o problema. A condição inicial corresponde às condições do material num tempo igual a zero. Se for a temperatura, trata-se da distribuição da temperatura; e, se for de umidade trata-se da distribuição de umidade.

As condições de contorno são as declarações feitas e válidas em todos os pontos pertencentes à fronteira do meio condutor (temperatura, fluxo de calor ou relação entre a temperatura e o fluxo de calor). As condições de contorno são para definir o que ocorre em toda a fronteira do meio condutor analisado, necessárias tanto num regime permanente como num regime transitório (BEJAN, 2004).

O intercâmbio de massa entre a madeira e seu meio ambiente é controlado por duas principais resistências: a resistência interna, medida pelo coeficiente de difusão, relacionado à geometria interna da madeira e afetado tanto pela temperatura como pelo teor de umidade, e, a resistência externa, medida pelo coeficiente de emissão superficial que inclui a resistência da camada limite do ar adjacente à superfície da madeira. A resistência externa é função das características do fluido, tais como a temperatura, velocidade do ar, viscosidade, densidade da madeira, teor de umidade e condição da superfície. A soma dos dois componentes é chamada de resistência total.

Entre os autores que estudaram estas resistências pode-se mencionar: CHOONG e SKAAR (1972), ROSEN (1978), AVRAMIDIS e SIAU (1987), LIU (1989), SIAU e AVRAMIDIS (1996), HUKKA (1999), LIU e SIMPSON (1999).

Na Tabela 2, TREMBLAY *et al.* (2000b), apresentam uma revisão dos coeficientes de transferência convectivos de calor e massa.

TABELA 2 - COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR ( $h_c$ ) E MASSA ( $k_m$ ) CONVECTIVOS

AUTOR	$k_m$	FORÇA CONDUTORA	$h_c$	CONDIÇÃO DE SECAGEM	ORIGEM
CLOUTIER <i>et al.</i> (1992)	$9,36 \times 10^{-10}$ $\text{kg}^2/\text{m}^2 \text{ s}^2 \text{ j}$	Potencial da água J / kg		Tbs 50°C, Tbu 42,5°C Var 1 m/s	Experimental
THOMAS <i>et al.</i> (1980)	$2,5 \times 10^6$ $\text{kg}^2/\text{m}^2 \text{ s}^\circ\text{M}$	Potencial de umidade (°M)	22,5 W / m <sup>2</sup> K	Tbs 110°C, Tbu 87°C	KEYLWERTH (1952)
LIU e CHENG (1989)	$2,5 \times 10^6$ $\text{kg}^2/\text{m}^2 \text{ s}^\circ\text{M}$	Potencial de umidade (°M)	22,5 W / m <sup>2</sup> K	Tbs 110°C	THOMAS <i>et al.</i> (1980)
IRUDAYARAJ <i>et al.</i> (1990)	$1,67 \times 10^6$ $\text{kg}^2/\text{m}^2 \text{ s}^\circ\text{M}$	Potencial de umidade (°M)	22,5 W / m <sup>2</sup> K	Tbs 60°C	THOMAS <i>et al.</i> (1980)
	$1,67 \times 10^6$ $\text{kg}^2/\text{m}^2 \text{ s}^\circ\text{M}$	Potencial de umidade (°M)	22,5 W / m <sup>2</sup> K	Tbs 121°C	BEARD <i>et al.</i> (1983)
GUI <i>et al.</i> (1994)	$2,4 \times 10^6$ a $9,4 \times 10^6$ $\text{kg}^2/\text{m}^2 \text{ s}^\circ\text{M}$	Potencial de umidade (°M)	61,4 a 0,5 W / m <sup>2</sup> K	Tbs 110°C Tbu 87°C	
	$0,1 \times 10^5$ a $4,0 \times 10^5$ $\text{kg}^2/\text{m}^2 \text{ s}^\circ\text{M}$	Potencial de umidade (°M)	22,5 W / m <sup>2</sup> K	Tbs 115,6°C Tbu 71,1°C	
PERRÉ (1987)	0,02 m/s	Densidade do vapor (kg / m <sup>3</sup> )	15 W / m <sup>2</sup> K	Tbs 80°C, Tbu 68°C Var 2 m/s	$h_h$ :MOYNE (1981)
	0,02 m/s	Densidade do vapor (kg / m <sup>3</sup> )	23 W / m <sup>2</sup> K	Tbs 80°C, Tbu 68°C Var 5 m/s	$h$ :idem a $h_h$
BENNASRALLAH e PERRÉ (1988)	0,02 m/s	Densidade do vapor (kg / m <sup>3</sup> )	23 W / m <sup>2</sup> K	Tbs 80°C, Tbu 68°C	$h_h$ :MOYNE (1981)
	0,014 m/s	Densidade do vapor (kg / m <sup>3</sup> )	14 W / m <sup>2</sup> K	Tbs 50°C, Tbu 30°C	
PERRÉ e MAILLET (1989)	0,014 m/s	Densidade do vapor (kg / m <sup>3</sup> )	14 W / m <sup>2</sup> K	Tbs 120°C, Tbu 80°C	
	0,025 m/s	Densidade do vapor (kg / m <sup>3</sup> )	25 W / m <sup>2</sup> K	Tbs 60°C, Tbu 30°C	
	0,014 m/s	Fração molar do vapor	14 W / m <sup>2</sup> K	Tbs 50°C, Tbu 30°C	
PERRÉ e MAILLET (1989)	0,014 m/s	Fração molar do vapor	14 W / m <sup>2</sup> K	Tbs 120°C, Tbu 80°C	
FERGUSON e TURNER (1994)	0,02 m/s	Fração molar do vapor	20 W / m <sup>2</sup> K	Tbs 120-180°C, Tbu 80°C Var 6 m/s	
	0,02 m/s		17 W / m <sup>2</sup> K	Tbs 90°C, Tbu 70°C Var 3 m/s	
SUTHERLAND <i>et al.</i> (1992)	0,02 m/s	Densidade do vapor (kg / m <sup>3</sup> )	17 W / m <sup>2</sup> K	Tbs 125°C, Tbu 70°C Var 3 m/s	$h_h$ :SALIN (1988)
	0,04 m/s	Pressão de vapor (Pa)	32 W / m <sup>2</sup> K	Tbs 122°C, Tbu 70°C Var 8 m/s	$h$ :idem a $h_h$
	0,04 m/s		32 W / m <sup>2</sup> K	Tbs 152°C, Tbu 67°C Var 8 m/s	
STANISH <i>et al.</i> (1986)			58 W / m <sup>2</sup> K	Tbs 75°C Var 7 m/s	
			29 W / m <sup>2</sup> K	Tbs 125°C Var 2 m/s	
KAWAI <i>et al.</i> (1978)	$0,943 \times 10^{-6}$ $\text{g}/\text{cm}^2 \text{ s} \text{ mmHg}$	Pressão de vapor (mmHg)		Tbs 40°C	Experimental
BONNEAU e PUIGGALI (1993)	0,0313 m/s	Concentração de vapor (kg /kg ar úmido)	33 W / m <sup>2</sup> K	Tbs 49°C, Tbu 38°C	

FONTE: Adaptado de TREMBLAY *et al.* (2000b).

De acordo com KREITH (1977), a troca de calor por convecção entre um fluido e um sólido é representada pela equação dinâmica proposta por Newton, sendo  $Q = h_c A (T_f - T_s)$ . O coeficiente  $h_c$  de troca de calor por convecção, juntamente com a área  $A$  de troca, representam o inverso da resistência à passagem da energia entre o sólido e o fluido.

O coeficiente de troca de calor mede, por assim dizer, a facilidade (inverso da resistência) com que a energia passa entre o sólido e o fluido. Para situações geométricas bem definidas, há equações teóricas exatas que permitem a avaliação do coeficiente  $h_c$  para qualquer condição no fluido. Porém, dadas as dificuldades de se resolver as equações de transporte para situações muito complexas, é usual o emprego de equações empíricas.

Todas as equações empíricas descritas segundo a forma geral  $Nu = aRe^b Pr^c$ , sendo  $Nu$ , o número de Nusselt;  $Re$ , o número de Reynolds; e  $Pr$ , o número de Prandtl. São grupos adimensionais empregados para representar os parâmetros que decidem a resistência à troca de calor por convecção. Ali,  $a$ ,  $b$  e  $c$  são constantes empíricas válidas dentro das condições nas quais os experimentos são realizados.

A transferência de calor e massa por convecção entre a superfície da madeira e o ar ambiente pode ser definido pelas seguintes relações:

Fluxo de calor:

$$F_h = h_c (T_{bs} - T_{bu}) \quad (\text{J/m}^2 \text{ s}) \quad 41$$

Onde:

$h_c$ : coeficiente convectivo de calor ( $\text{J/s m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

$T_{bs}$ : temperatura de bulbo seco ( $^\circ\text{C}$ ).

$T_{bu}$ : temperatura de bulbo úmido ( $^\circ\text{C}$ ).

Fluxo de massa:

$$F_m = k_m (p_{bu} - p_{ar}) \quad (\text{kg/m}^2 \text{ s}) \quad 42$$

Onde:

$k_m$ : coeficiente de transferência de massa convectivo ( $\text{kg/s m}^2 \text{ Pa}$ ).

$P_{bu}$ : pressão parcial do vapor na temperatura de bulbo úmido (Pa).

$P_{ar}$ : pressão parcial do vapor na temperatura de bulbo seco (Pa).

No período com velocidade de secagem constante, todo o calor recebido pelo sólido é usado para vaporizar a água, garantindo assim que a temperatura neste sólido permaneça constante e igual à temperatura de bulbo úmido.

A igualdade entre o calor transferido para a água e o calor suprido para a vaporização é:

$$\frac{q}{A} = I_i \times N_A / A \quad 43$$

Onde:

$q/A$ : calor transferido por unidade de área interfacial ( $\text{J/s m}^2$ ).

$N_A/A$ : água evaporada ( $\text{kg/s m}^2$ ).

$I_i$ : entalpia de vaporização calculada na  $T_{bu}$ , (J/kg).

A entalpia de vaporização da água em qualquer temperatura é descrita por BRAMHALL (1979a). No período de secagem à velocidade constante a vaporização ocorre na temperatura de bulbo úmido ( $T_c = T_{bu}$ ). A entalpia de vaporização pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$I_i = (597,9 - 0,592T_c) \times 4.186,80 \text{ (J/kg)} \quad 44$$

Onde:

$I_i$ : entalpia de vaporização calculada na  $T_{bu}$ , (J/kg).

A taxa de troca de calor entre o ar e o sólido será, assim, descrita como:

$$\frac{q}{A} = h_c (T_{bs} - T_{bu}) \quad 45$$

Onde:

$q/A$ : calor transferido por unidade de área interfacial (J/s m<sup>2</sup>).

$h_c$ : coeficiente convectivo de calor (J/s m<sup>2</sup> °C).

$T_{bs}$ : temperatura de bulbo seco, (°C).

$T_{bu}$ : temperatura de bulbo úmido (°C).

A quantidade de massa transferida por unidade de tempo com a concentração de água descrita em função das pressões parciais na interface e o ar é representada por:

$$\frac{N_A}{A} = k_m (p_{bu} - p_{ar}) \quad 46$$

Onde:

$N_A/A$ : água evaporada (kg/s m<sup>2</sup>).

$k_m$ : coeficiente convectivo de massa (kg/s m<sup>2</sup> Pa).

$p_{ar}$ : pressão parcial do vapor de água no ar (Pa).

$p_{bu}$ : pressão parcial do vapor de água na interface ar-água, neste caso à  $T_{bu}$  (Pa).

O coeficiente convectivo de calor pode ser determinado igualando-se a equação 43 com a 45:

$$h_c = \frac{N_A I_l}{A(T_{bs} - T_{bu})} \quad 47$$

Onde:

$h_c$ : coeficiente convectivo de calor (J/s m<sup>2</sup> °C).

$N_A/A$ : água evaporada (kg/s m<sup>2</sup>).

$I_l$ : entalpia de vaporização calculada na  $T_{bu}$ , (J/kg).

$T_{bs}$ : temperatura de bulbo seco, (°C).

$T_{bu}$ : temperatura de bulbo úmido (°C).

Do mesmo modo, o coeficiente convectivo de massa será igual a:

$$k_m = \frac{N_A}{A(p_{bu} - p_{ar})} \quad 48$$

Onde:

$k_m$ : coeficiente de transferência de massa convectivo ( $\text{kg/s m}^2 \text{ Pa}$ ).

$N_A/A$ : água evaporada ( $\text{kg/s m}^2$ ).

$p_{ar}$ : pressão parcial do vapor de água no ar (Pa).

$p_{bu}$ : pressão parcial do vapor de água na interface ar-água, neste caso à  $T_{bu}$  (Pa).

O coeficiente convectivo de transferência de massa pode ser determinado nas unidades ( $\text{kg/s m}^2 \text{ Pa}$ ) quando se utiliza como potencial a pressão parcial ou em (m/s), quando se emprega como potencial a concentração de água na interface sólido ar em  $\text{kg/m}^3$ .

Os coeficientes convectivos também podem ser evidentemente determinados por equações empíricas. Para a determinação dos coeficientes convectivos de calor e massa, pode-se utilizar a correlação de Chilton-Colburn (KREITH, 1977; PANG, 1996a; PORDAGE; LANGRISH, 1999) e para a determinação do número de Nusselt, as relações empíricas de Mc Adams, Gnielinski e Gnielinski simplificadas (KAKAÇ *et al.* 1981). A composição entre os valores resultantes de equações empíricas com aquelas retiradas de experiências é importante para verificação de qual é o procedimento correto para o cálculo dos coeficientes na geometria usual em câmaras de secagem de madeira.

A correlação proposta por Chilton-Colburn (PANG, 1996a), onde  $j_a$  é o fator de Colburn para a troca de calor no interior de dutos, é:

$$j_a = 0,023 \text{Re}^{-0,2} = \frac{Nu}{\text{Re Pr}^{1/3}}$$

49

Onde:

$Nu$ : Número de Nusselt.

$Re$ : número de Reynolds.

$Pr$ : número de Prandtl.

Nesta correlação, considera-se a determinação das propriedades do gás à temperatura média do filme, ( $T_m = (T_{ar} + T_s)/2$ ) entre a temperatura do ar ao longe ( $T_{ar}$ ) e

a temperatura da superfície sólida ( $T_s$ ). É utilizada para fluidos que têm números de Prandtl no intervalo de 0,5 a 100 (KREITH, 1977).

Ao deixar em evidência o número de Nusselt, obtém-se a relação para a transmissão de calor do escoamento de um fluido dentro de tubos ou dutos. Esta relação foi também utilizada por TREMBLAY *et al.* (2000b), para determinar o coeficiente de transferência de calor convectivo médio, considerando um fluxo interno ao longo de uma seção retangular. O número de Nusselt pode ser calculado por:

$$Nu = 0,023Re^{0,8} Pr^{1/3} \quad 50$$

Onde:

$Nu$ : Número de Nusselt.

$Re$ : número de Reynolds.

$Pr$ : número de Prandtl.

O coeficiente de transferência de calor convectivo nos escoamentos internos é usualmente apresentado na forma adimensional pelo número de Nusselt baseado no diâmetro hidráulico (BEJAN, 2004). Este é calculado pela expressão abaixo:

$$Nu = \frac{h_c \times D_h}{k_h} \quad 51$$

O coeficiente convectivo pode ser isolado a partir do número de Nusselt, correspondendo à equação abaixo:

$$h_c = \frac{Nu \times k_h}{D_h} \quad 52$$

Onde:

$Nu$ : Número de Nusselt.

$h_c$ : coeficiente convectivo de calor ( $J/s \ m^2 \ ^\circ C$ ).

$D_h$ : diâmetro hidráulico (m).

$k_h$ , condutividade térmica da mistura ar-vapor de água ( $J/s \ m \ ^\circ C$ ).

O diâmetro hidráulico traduz os efeitos de uma geometria qualquer num tubo cilíndrico hipotético de diâmetro  $D_h$ .

Segundo KREITH (1977); PANG (1996a) a correlação entre o coeficiente convectivo de calor e o coeficiente convectivo de massa pode ser escrita como indicado abaixo:

$$k_m = \frac{h_c}{r_g C_g} \left( \frac{Pr}{Sc} \right)^{2/3} \quad 53$$

Onde:

$k_m$ : coeficiente convectivo de massa (m/s).

$h_c$ : coeficiente convectivo de calor (J/s m<sup>2</sup> °C).

$r_g$ : densidade do gás (kg/m<sup>3</sup>).

$C_g$ : calor específico do gás (J/kg °C).

Pr: número de Prandtl ( $C_g \times m_g / k_g$ ).

Sc: número de Schmidt. ( $m_g / r_g D_v$ ).

A correlação proposta por McAdams considera a determinação das propriedades do gás à temperatura média, da mesma forma do que a correlação de Colburn. De acordo com esta relação o número de Nusselt pode ser calculado utilizando a equação abaixo:

$$Nu = 0,021 Re^{\frac{4}{5}} Pr^{\frac{2}{5}} \quad 54$$

Onde:

$Nu$ : Número de Nusselt.

$Re$ : número de Reynolds.

$Pr$ : número de Prandtl.

A correlação proposta por Gnielinski considera a determinação das propriedades do gás à temperatura do gás e é utilizada para baixos valores de Reynolds. A determinação de Nusselt segundo este autor corresponde a:

$$Nu = \frac{\left[ \left( \frac{f}{2} \right) (Re - 1.000) Pr \right]}{\left[ 1 + 12,7 \left( \frac{f}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \left( Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right) \right]}$$

55

$$f = [1,58 \ln(Re) - 3,28]^2$$

A correlação proposta por de Gnielinski também pode ser simplificada, que é válida para valores de Prandtl entre  $0,5 < Pr < 1,5$ . Com as propriedades do gás determinadas à temperatura do gás. A equação abaixo permite calcular este o número de Nusselt:

$$Nu = 0,0214 \left( Re^{\frac{4}{5}} - 100 \right) Pr^{\frac{2}{5}}$$

56

Onde:

*Nu*: Número de Nusselt.

*Re*: número de Reynolds.

*Pr*: número de Prandtl.

PANG (1996a), dentre outros autores, utilizou a relação de Chilton-Colburn para determinar os coeficientes convectivos de transferência de calor e de massa. O autor observou que os coeficientes aumentam com o acréscimo da velocidade do ar, sendo este efeito mais marcante que o da temperatura do ar (Figuras 4 e 5).

Em geral, os valores experimentais estão entre os valores preditos. Entretanto, a maioria deles cai abaixo deste. Para o coeficiente de transferência de massa, os valores experimentais são aproximadamente iguais aos calculados para uma velocidade de 3m/s, enquanto somente dois dos valores estão perto da curva predita para a velocidade de 5m/s. Uma tendência similar pode ser observada para o coeficiente de transferência de calor.

FIGURA 4 - COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA PREDITOS VERSUS TEMPERATURA DO AR (LÍNHA). VALORES EXPERIMENTAIS  $\Delta=2-4\text{m/s}$ ;  $\circ=5-6\text{m/s}$ ;  $\times=7-8\text{m/s}$

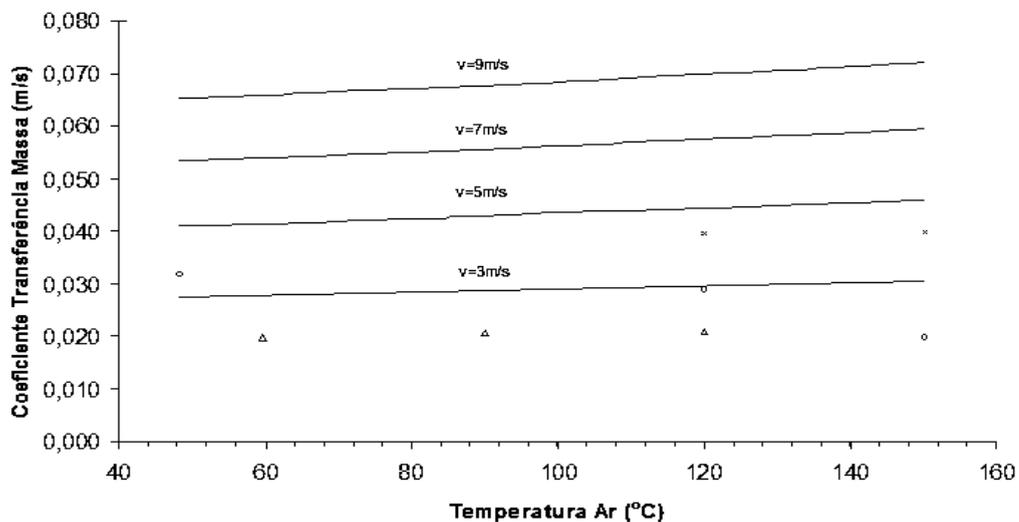
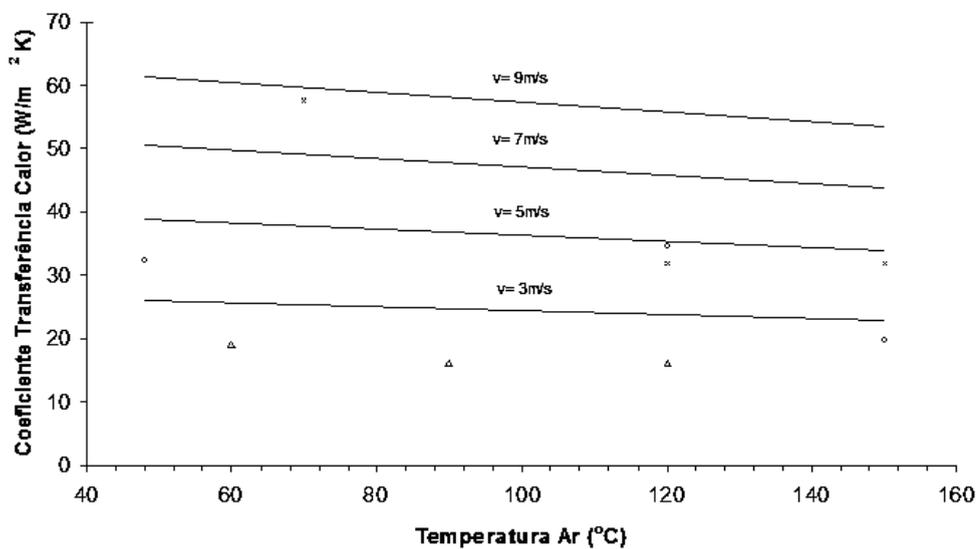


FIGURA 5 - COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR PREDITOS VERSUS TEMPERATURA DO AR (LÍNHA). VALORES EXPERIMENTAIS  $\Delta=2-4\text{m/s}$ ;  $\circ=5-6\text{m/s}$ ;  $\times=7-8\text{m/s}$



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 COLETA E PREPARAÇÃO DO MATERIAL

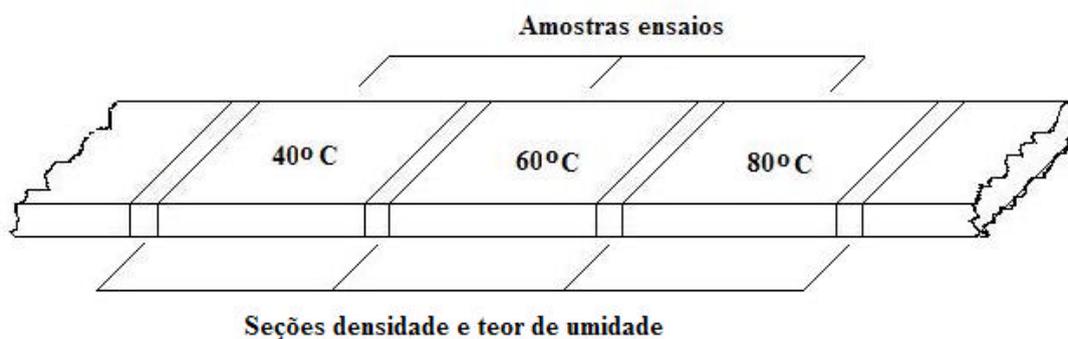
Para o estudo foram utilizadas madeiras de *Pinus elliottii* Engelm de 20 anos de idade proveniente da empresa Berneck Aglomerados S/A e *Pinus taeda* L. de 30 anos de idade, da Estação Experimental do Canguiri da Universidade Federal do Paraná.

Para ter certeza que as madeiras apresentem um teor de umidade máximo estas foram selecionadas após o desdobro e só o número de tábuas necessário para realizar o ensaio previsto. Escolheram-se tábuas tangenciais por apresentarem estas facilidades para identificar na superfície as rachaduras.

As tábuas utilizadas nos diferentes ensaios foram de 3,20m de comprimento, e 100mm de largura, sendo subdivididas em 3 amostras de 745mm de comprimento (pareadas) para os ensaios correspondentes à determinação dos coeficientes convectivos e aos de transferência de calor (Figura 6).

Na determinação dos coeficientes convectivos utilizou-se uma espessura de 36mm e para a transferência de calor uma espessura de 46mm. Foram consideradas duas amostras por cada ensaios.

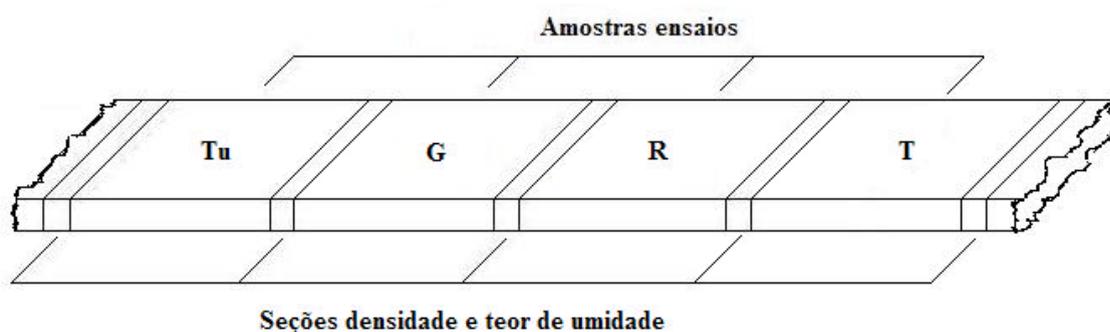
FIGURA 6 – RETIRADA DE AMOSTRAS (745mm) PARA OS ENSAIOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E COEFICIENTES CONVECTIVOS, E SECÇÕES PARA DENSIDADE E TEOR DE UMIDADE (25mm).



Para os ensaios de secagem em estufa piloto a tábua de 36mm de espessura, 100mm de largura e 3,20m de comprimento (Figura 7), foi subdividida em 4 amostras de 745mm de comprimento (pareadas), usadas para o controle do teor de umidade (Tu), do gradiente de umidade (G), das fendas superficiais (R) e da temperatura (T). Em cada ensaio foi considerada uma amostra para cada determinação (Tu, G, R, T).

Em todas as tábuas foram retiradas, também seções de 25mm de largura para a determinação da densidade básica, densidade anidra e teor de umidade inicial da madeira.

FIGURA 7 – RETIRADA DE AMOSTRAS (745mm) PARA OS ENSAIOS DE SECAGEM E SECÇÕES PARA DENSIDADE E TEOR DE UMIDADE (25mm).



### 3.2 EQUIPAMENTO

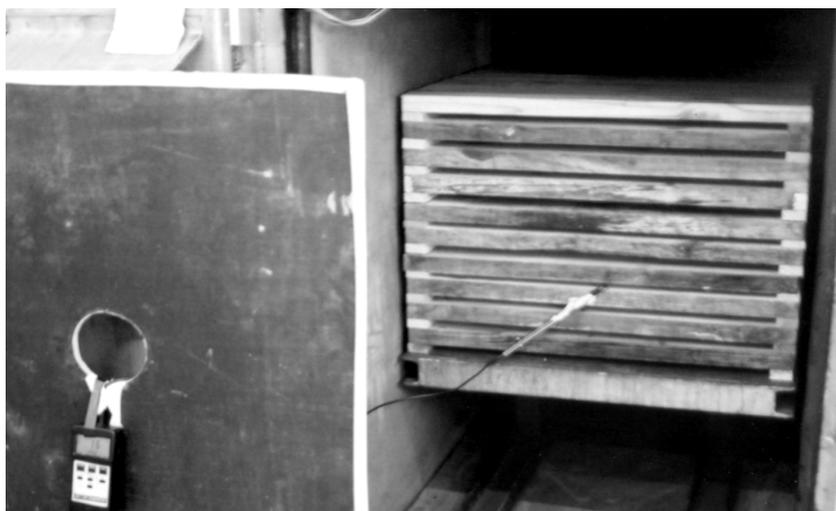
No estudo foi utilizada uma câmara piloto semi-industrial, pertencente ao Laboratório de Secagem da Universidade Federal do Paraná. As dimensões úteis da câmara são de 0,80m de altura, 0,80m de largura e 4,0m de comprimento, alcançando uma capacidade aproximada de 1m<sup>3</sup> de madeira serrada. A câmara é aquecida por um sistema elétrico de três resistências blindadas (trocadores de calor) e dotada de circulação forçada de ar. A umidade relativa da estufa foi controlada através do vapor produzido por uma caldeira elétrica e pelas aberturas de ventilação.

Nos diferentes ensaios foram utilizadas 120 tábuas (entre as amostras e as tábuas necessárias para completar a carga), que foram gradeadas com sarrafos separadores de madeira de 20mm.

A velocidade do ar foi controlada antes de cada ensaio através de um inversor de frequência, que regula a rotação do motor do ventilador e medida por um termo-anemômetro (Figura 8).

Para a pesagem periódica das amostras foi utilizada uma balança digital com capacidade de 15.000g e precisão de 5g e outra de 310g e precisão de 0,001g para a pesagem das lâminas; uma estufa de laboratório com circulação de ar com uma capacidade até 200°C, com precisão de 0,1°C para obtenção de massa anidra e um banho térmico com circulação para uma temperatura de trabalho de 0°C a 100°C, com uma precisão de 0,1°C para o aquecimento das amostras utilizadas para a determinação dos coeficientes convectivos à temperatura de bulbo úmido .

FIGURA 8 – CÂMARA DE SECAGEM E TERMO-ANEMÔMETRO UTILIZADOS NO ESTUDO



### 3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Na Tabela 3, pode-se observar as diferentes determinações efetuadas e o número de ensaios por temperatura para cada experimento realizado. A determinação do perfil de umidade, do perfil de temperatura e das rachaduras superficiais foi obtida, simultaneamente num mesmo ensaio. As outras atividades (1 e 5) foram determinadas em ensaios específicos para cada uma.

TABELA 3 - ENSAIOS REALIZADOS PARA OS DIFERENTES EXPERIMENTOS

ATIVIDADE	DETERMINAÇÃO	TEMPERATURA °C	ENSAIOS/ TEMPERATURA	ESPÉCIE	VELOCIDADE AR
	Coeficientes				
1	convectivos de calor e massa	40, 60, 80	2	<i>Pinus elliottii</i>	3,0m/s
2	Perfil de umidade	40, 60, 80	2	<i>Pinus elliottii</i>	3,0m/s
3	Perfil de temperatura	40, 60, 80	2	<i>Pinus elliottii</i>	3,0m/s
4	Rachaduras Superficiais	40, 60, 80	2	<i>Pinus elliottii</i>	3,0m/s
5	Temperatura interior	40, 60, 80	1	<i>Pinus taeda</i>	3,5m/s, 4,7m/s, 6,8m/s

### 3.3.1 Determinação dos Coeficientes Convectivos de Calor e Massa

O coeficiente de troca de calor na câmara de secagem piloto pode ser determinado facilmente colocando-se a madeira completamente saturada de água, de modo a garantir a secagem em período de velocidade constante. Neste período a taxa de troca de calor entre a madeira e o ar é constante e é uma função do coeficiente de troca de calor, além da temperatura de bulbo úmido.

#### a) Condições do ensaio

Os ensaios foram realizados na câmara de secagem piloto e as características das condições ambientais dentro da câmara podem ser observadas na Tabela 4. Foram realizados dois ensaios por temperatura e, em cada ensaio, utilizaram-se duas amostras.

Antes do início dos ensaios a câmara de secagem foi pré-aquecida à temperatura requerida (Tabela 4), sendo medida a espessura e a largura das amostras, permitindo com estes dados determinar a área evaporável.

TABELA 4 - CONDIÇÕES DE SECAGEM NO INTERIOR DA CÂMARA

TEMPERATURA BULBO SECO °C	TEMPERATURA BULBO ÚMIDO °C	UMIDADE RELATIVA %	VELOCIDADE AR m/s	TEMPO ENSAIO min.
40	28	40	3	60
60	44	40	3	60
80	60	40	3	60

As amostras (madeira úmida), foram colocadas juntamente com as tábuas secas, completando uma carga na câmara de 120 tábuas de madeira de *Pinus elliottii*, com uma espessura de 36mm, uma largura de 100mm e um comprimento de 745mm cada uma. Para que as amostras já iniciassem o ensaio nas condições de velocidade constante, as mesmas foram aquecidas previamente em água à temperatura de bulbo úmido antes de serem colocadas no interior da estufa (Figura 9).

FIGURA 9 - AQUECIMENTO DAS AMOSTRAS CONTROLE À TEMPERATURA DE BULBO UMIDO EM BANHO MARIA



#### b) Parâmetros controlados

Ao longo dos ensaios determinou-se a perda de massa de cada amostra por pesagens, em intervalos de 5 minutos para a temperatura de 40°C e 60°C e cada 3

minutos para a temperatura de 80°C. O tempo decorrido entre a retirada da amostra da câmara, a pesagem e a colocação desta novamente na câmara, foi de 20s.

A umidade de cada amostra foi determinada pelo método gravimétrico. As amostras foram colocadas em estufa de laboratório sem circulação de ar a 103±2°C até peso constante. Para a determinação do teor de umidade foi utilizada a seguinte equação:

$$Tu = \frac{Pu - P_0}{P_0} \quad 57$$

Onde:

*Tu*: teor de umidade, (kg/kg).

*Pu*: peso úmido da amostra, (kg).

*P<sub>0</sub>*: peso seco da amostra, (kg).

Antes da determinação da densidade básica e anidra, as amostras foram colocadas submersas em água por um período de uma semana, permitindo alcançar a saturação da madeira. O volume foi determinado por deslocamento de líquido (água) e as amostras quando em estado anidro, antes de determinar o seu volume, foram submersas em cera para evitar a absorção durante a medição do volume.

Com a obtenção do volume verde e anidro, e o peso seco, determinou-se a densidade básica e anidra, respectivamente, através das seguintes fórmulas:

$$r_b = \frac{P_0}{V_v} \quad 58$$

$$r_0 = \frac{P_0}{V_0} \quad 59$$

Onde:

*r<sub>b</sub>*: densidade básica da madeira, (kg/m<sup>3</sup>).

*r<sub>0</sub>*: densidade anidra da madeira, (kg/m<sup>3</sup>).

*V<sub>v</sub>*: volume saturado ou verde, (m<sup>3</sup>).

*V<sub>0</sub>*: volume anidro (0% de umidade), (m<sup>3</sup>).

*P<sub>0</sub>*: peso seco ou anidro, (kg).

### b) Cálculo dos coeficientes convectivos de calor e massa

Para a determinação experimental do coeficiente convectivo de calor foi utilizada a equação 60 e para o coeficiente convectivo de massa a equação 61. As quais são apresentadas a seguir:

$$h_c = \frac{N_A I_l}{A(T_{bs} - T_{bu})} \quad 60$$

$$k_m = \frac{N_A}{A(p_{bu} - p_{ar})} \quad 61$$

Onde:

$I_l$ : entalpia de vaporização calculada na  $T_{bu}$  (J/kg).

$h_c$ : coeficiente convectivo de calor, (J/s m<sup>2</sup> °C).

$k_m$ : coeficiente convectivo de massa, (kg/s m<sup>2</sup> Pa).

$p_{ar}$ : pressão parcial do vapor de água no ar, (Pa).

$p_{bu}$ : pressão parcial do vapor de água na interface ar-água, neste caso à  $T_{bu}$ , (Pa).

$T_{bs}$ : temperatura de bulbo seco, (°C).

$T_{bu}$ : temperatura de bulbo úmido, (°C).

$N_A/A$ : fluxo de água evaporada, (kg/s m<sup>2</sup>).

$N_A$ : água evaporável, kg/s.

$A$ : área evaporável, m<sup>2</sup>.

Quando se utiliza como potencial a pressão parcial do vapor, as unidades do coeficiente de transferência de massa convectivo correspondem a (kg/s m<sup>2</sup> Pa) ou em (m/s) quando se emprega como potencial a concentração de água (kg/m<sup>3</sup>) na interface sólido ar.

Além da determinação experimental do coeficiente convectivo de calor este foi determinado através de diferentes equações empíricas existentes na literatura. Como o coeficiente de transferência de calor convectivo no escoamento interno, depende do número de Nusselt baseado no diâmetro hidráulico. Este pode ser determinado pela seguinte equação:

$$h_c = \frac{Nu \times k_h}{D_h}$$

62

Onde

$h_c$ : coeficiente convectivo de calor, (J/s m<sup>2</sup> °C).

$Nu$ : número de Nusselt

$k_h$ : condutividade térmica da mistura, (J/s m °C).

$D_h$ : diâmetro hidráulico, m.

O número de Nusselt para a transmissão de calor do escoamento de um fluido dentro de tubos ou dutos pode ser determinado pela seguinte equação:

$$Nu = 0,023Re^{0,8} Pr^{1/3}$$

63

Onde:

$Nu$ : número de Nusselt.

$Pr$ : número de Prandtl.

$Re$ : número de Reynolds.

Também, a correlação proposta por McAdams, que considera a determinação das propriedades do gás à temperatura média. O número de Nusselt pode ser determinado pela seguinte expressão:

$$Nu = 0,021Re^{\frac{4}{5}} Pr^{\frac{2}{5}}$$

64

Onde:

$Nu$ : número de Nusselt.

$Pr$ : número de Prandtl.

$Re$ : número de Reynolds.

A correlação proposta por Gnielinski considera a determinação das propriedades do gás à temperatura do gás e é utilizada para baixos valores de Reynolds. O número de Nusselt pode ser determinado por:

$$Nu = \frac{\left[ \left( \frac{f}{2} \right) (Re - 1.000) Pr \right]}{\left[ 1 + 12,7 \left( \frac{f}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \left( Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right) \right]} \quad 65$$

$$f = [1,58 \ln(Re) - 3,28]^2$$

Onde:

$Nu$ : número de Nusselt.

$Pr$ : número de Prandtl.

$Re$ : número de Reynolds.

A correlação proposta por Gnielinski, também pode ser usada em uma versão simplificada, válida para valores de Prandtl entre  $0,5 < Pr < 1,5$ . Com as propriedades do gás determinadas à temperatura do gás, o número de Nusselt pode ser calculado pela seguinte equação:

$$Nu = 0,0214 \left( Re^{\frac{4}{5}} - 100 \right) Pr^{\frac{2}{5}} \quad 66$$

Onde:

$Nu$ : número de Nusselt.

$Pr$ : número de Prandtl.

$Re$ : número de Reynolds.

Uma das equações utilizadas para relacionar o coeficiente convectivo de calor e o coeficiente convectivo de massa corresponde à correlação proposta por Chilton-Colburn. Esta relação é apresentada a seguir:

$$k_m = \frac{h_c}{r_g C_g} \left( \frac{Pr}{Sc} \right)^{2/3} \quad 67$$

Onde:

- $k_m$ : coeficiente convectivo de massa, (m/s).  
 $h_c$ : coeficiente convectivo de calor, (J/s m<sup>2</sup> °C).  
 $\rho_g$ : densidade do gás, (kg/m<sup>3</sup>).  
 $C_g$ : calor específico do gás, (J/kg °C).  
Pr: número de Prandtl.  
Sc: número de Schmidt.

As equações empíricas mostradas permitiram comparar os resultados experimentais com os gerados teoricamente.

### 3.3.2 Secagem em Estufa Piloto

#### a) Condições do ensaio

Diferentes ensaios com madeira de *Pinus elliottii* Engelm foram realizados, em câmara piloto para a determinação do perfil de umidade, do perfil de temperatura, da curva de secagem, e a presença ou não das rachaduras superficiais durante a secagem.

Foram realizados dois ensaios por temperatura e as condições de secagem foram as mesmas do ensaio anterior (Tabela 4).

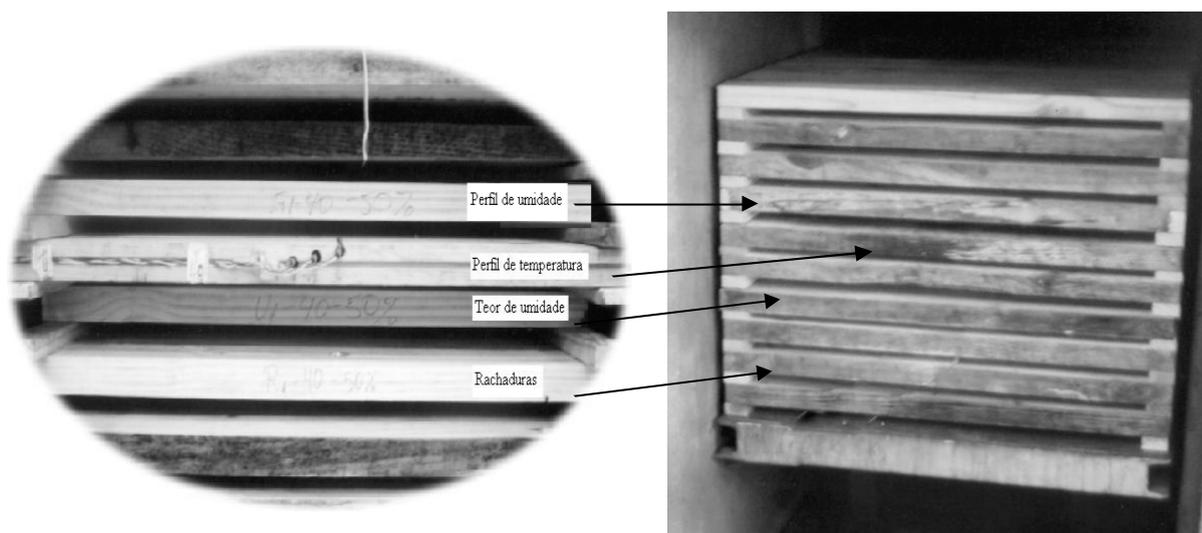
A velocidade do ar de 3m/s, foi escolhida considerando as recomendações de HILDEBRAND (1970), que indica uma velocidade de 3m/s ou mais, porque estas têm vantagens econômicas, quando a madeira for muito úmida ou em altas temperaturas. Neste estudo a madeira apresentava um teor de umidade médio acima de 120%.

Para a determinação dos parâmetros que modelam a cinética da secagem, considerou-se uma amostra para o teor de umidade (Tu), uma para o gradiente de umidade (G), uma para a temperatura (T) e uma para as rachaduras superficiais (R). Todas foram seladas nos topos com tinta resistente à umidade para evitar a perda de umidade na direção longitudinal da amostra.

A pilha de madeira composta de 120 tábuas com uma espessura de 36mm, 100mm de largura e um comprimento de 745mm, foi completada com 116 tábuas

secas e as 4 amostras úmidas (Figura 10). As tábuas controle foram colocadas dentro da câmara de secagem, depois que esta foi pré-aquecida à temperatura do ensaio.

FIGURA 10 – LOCALIZAÇÃO DAS AMOSTRAS NA PILHA DE MADEIRA UTILIZADA PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS



Durante o processo de secagem nos seis ensaios desenvolvidos, as variáveis controladas foram o teor de umidade, o gradiente de umidade, as rachaduras superficiais e a temperatura da madeira e da câmara.

## b) Parâmetros controlados

### b.1) Teor de umidade

O teor de umidade da madeira foi determinado no início, durante e no final do processo de secagem pelo método gravimétrico. Após o início de cada ensaio, e desde o início até o final da secagem, as amostras foram pesadas a cada oito horas para os ensaios à temperatura de 40°C, a cada quatro horas para os de temperatura de 60°C e a cada duas horas para a temperatura de 80°C.

Durante o controle do teor de umidade a câmara era aberta para a retirada e pesagem da amostra, a qual era imediatamente devolvida à câmara. O tempo consumido para a remoção, pesagem e recolocação da amostra foi de 1 minuto.

### **b.2) Perfil de umidade**

Da mesma maneira que o teor de umidade, os perfis de umidade (gradientes) ao longo da espessura da tábua foram determinados a cada 8 horas para os ensaios de 40°C, a cada 4 horas para os ensaios de 60°C e a cada 2 horas para os de 80°C.

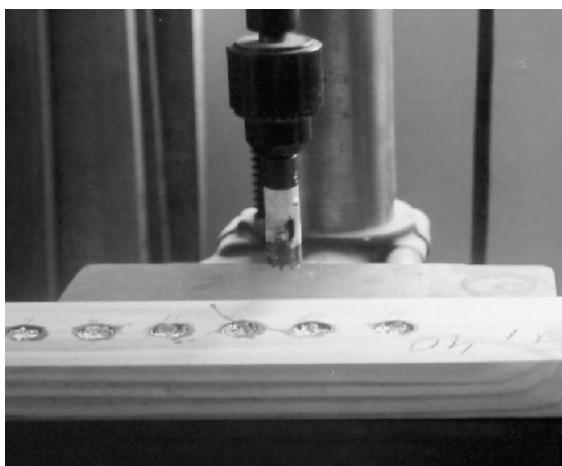
Para a determinação do perfil de umidade, uma seção cilíndrica da amostra foi retirada com auxílio de uma serra de copo de 21mm de diâmetro (Figura 11). Cada cilindro foi subdividido em três lâminas de 2mm de espessura e quatro lâminas de 3mm de espessura empregando-se para isso uma guilhotina, tendo cada uma delas determinada a sua massa inicial e anidra.

As lâminas assim obtidas permitiram calcular o teor de umidade de cada uma delas pelo método gravimétrico. Após a retirada da amostra a tábua controle voltava à câmara para prosseguimento da operação. O buraco deixado pela retirada da amostra era selado com tinta e tampado com papel alumínio.

### **b.3) Perfil de temperatura**

A temperatura interna da madeira e do ambiente de secagem foi controlada por meio de termopares tipo J, sendo um termopar para o controle da temperatura de bulbo seco e um para o controle da temperatura de bulbo úmido. No interior da madeira os termopares foram dispostos a 2mm, 9mm e 18mm (centro da tábua) da superfície da tábua, em orifícios de 30mm de profundidade (Figura 12). Para a coleta de dados os termopares foram conectados a um módulo condicionador de sinais analógico-digital instalado em um microcomputador. As leituras de temperaturas foram realizadas em intervalos de um minuto, durante todo o período de ensaio.

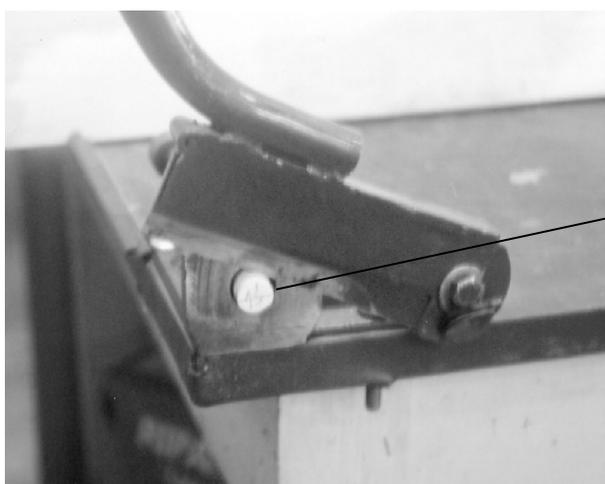
FIGURA 11 – OBTENÇÃO DAS LÂMINAS PARA A DETERMINAÇÃO DO PERFIL DE UMIDADE DAS TÁBUAS



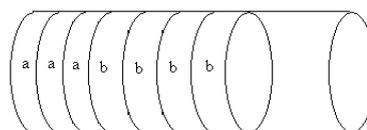
a. Dispositivo de corte



b. Corte do cilindro com serra de copo

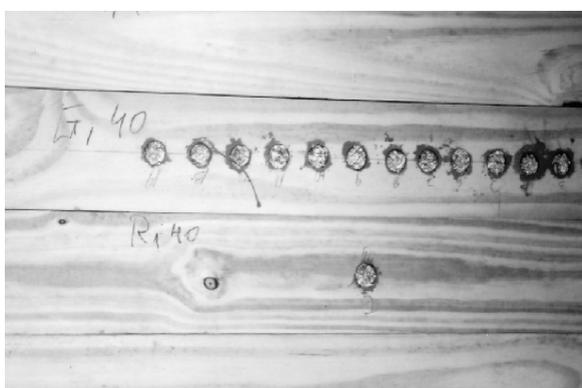


c. Guilhotina para o corte das lâminas



a: lâmina de 2mm de espessura.

b: lâmina de 3mm de espessura.



d. Local e selado do furo



e. Balança controle do peso

FIGURA 12 – POSIÇÃO DOS TERMOPARES PARA A DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA INTERNA DA MADEIRA



#### **b.4) Rachaduras superficiais**

A avaliação das fendas superficiais foi de forma visual, observando-se durante a secagem a presença ou não das rachaduras superficiais. No momento que estas se apresentavam era determinado o perfil de umidade ao longo da espessura da amostra, de acordo com a metodologia indicada anteriormente para determinar o gradiente de umidade.

A amostra era retirada da estufa o tempo suficiente para realizar as determinações e, posteriormente, colocada na câmara até o fim da secagem. Depois da secagem a amostra era colocada em uma estufa a  $103\pm 2^{\circ}\text{C}$  para a determinação do teor de umidade no momento que ocorreu a rachadura e o teor de umidade final.

#### **3.3.3 Modelo Difusivo Aplicado**

Um balanço de massa no sólido foi desenvolvido para descrever a difusão transiente da água desde o interior para a superfície do material, sendo escolhido o teor de umidade como potencial do fluxo, ou força motora.

A contração do material não foi considerada e a transferência de massa ocorre unidirecional no sentido perpendicular à superfície da placa (radial).

O modelo não trata de explicar os vários mecanismos de transporte que ocorrem no interior da madeira (movimento de água livre, água higroscópica e vapor de água) e é considerado um meio contínuo e homogêneo. Como consequência, o modelo de secagem difusivo, que permite determinar o coeficiente de difusão de massa efetivo ( $D_{ef}$ ), é comumente referido à segunda Lei de Fick. O balanço diferencial de massa assume a forma da Equação 68, considerando-se que não há transporte em y e z, logo:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{ef} \frac{\partial M}{\partial x} \right) \quad 68$$

Onde:

M: teor de umidade, (kg água/kg madeira seca).

t: tempo, (s).

$D_{ef}$ : coeficiente de transporte efetivo, ( $m^2/s$ ).

x: orientação espacial, (m).

O coeficiente de difusão efetivo leva em conta, assim, o fluxo global de massa na madeira, considerando todos os mecanismos envolvidos (movimento de água livre, água higroscópica e vapor de água).

Na resolução do modelo de secagem difusivo, deve-se considerar uma apropriada condição inicial e condições de contorno para determinar as constantes de integração e o coeficiente de transferência de massa convectivo foi obtido aplicando-se a analogia de Chilton-Colburn, correspondente à Equação 67.

A condição inicial para resolver a equação diferencial parcial 70 é o teor de umidade ( $kg_{\text{água}}/kg$  massa seca) no tempo igual a zero (início do processo, Equação 69).

A primeira condição de contorno considerou uma resistência externa finita para a transferência de massa na superfície da madeira: toda água que chega à superfície por difusão é removida por convecção com o ar (Equação 70).

A segunda condição de contorno se gera quando se considera que a parte superior e inferior da tábua estão sob idênticas condições externas, espera-se que o perfil de umidade interno seja simétrico na direção da difusão. O perfil de umidade passara por um ponto de máximo no centro da placa e a primeira derivada de  $M$  (umidade) com respeito a  $x$  (posição), será igual a zero (Equação 71).

$$t = 0 \quad \rightarrow \quad M = M_i \quad 69$$

$$x = 0 \quad \rightarrow \quad D \frac{\partial M}{\partial x} = k(M - M_e) \quad 70$$

$$x = \frac{L}{2} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad 71$$

Onde:

$M_i$ : teor de umidade inicial, (kg água/kg madeira seca).

$M_e$ : teor de umidade de equilíbrio, (kg água/kg madeira seca).

$k$ : coeficiente de transferência convectivo de massa, (m/s).

O modelo de secagem transiente, representado pela Equação 70, foi resolvido pelo método numérico das linhas envolvendo uma fórmula de diferenças centrais explícitas, para aproximar a derivada espacial de segunda ordem:

$$\left( \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \right)_{i,j} = \frac{M_{i,j+1} - 2 \times M_{i,j} + M_{i,j-1}}{\Delta x^2} \quad 72$$

A substituição da derivada segunda por uma equação explícita de diferenças (Equação 72) na Equação (68) gera um sistema de equações diferenciais ordinárias que descreve a variação da umidade no tempo  $i$  em cada  $j$ -ésima posição ao interno da tábua.

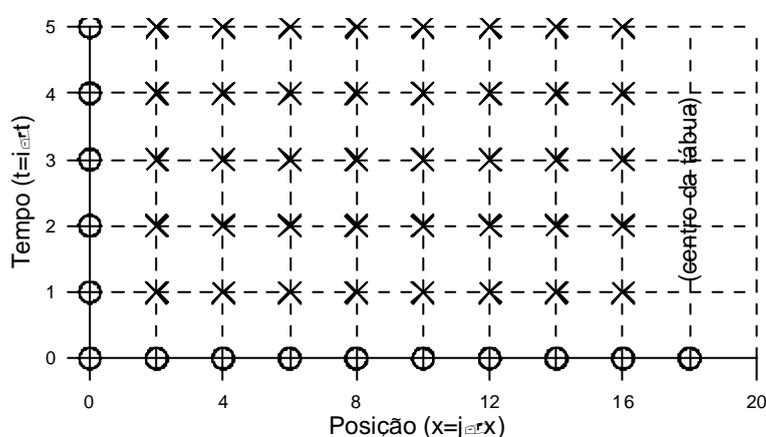
A técnica de solução é chamada de método das linhas porque os valores de umidade são calculados em todas as posições no tempo  $t$  antes de calcularem-se os valores em  $t + \mathbf{D}t$ . A fórmula de diferenças para trás explícita de Euler foi aplicada para

representar a variação da umidade no tempo em cada posição  $j$  do domínio de integração, o qual é representado esquematicamente na Figura 13.

Para se obter o coeficiente de transporte efetivo, os perfis de teor de umidade interno experimental foram utilizados, sendo adotada uma rotina computacional de otimização envolvendo o método simplex modificado, programado na linguagem Fortran.

Os diferentes valores do coeficiente de difusão obtidos nas três temperaturas dos ensaios de secagem (40°C, 60°C e 80°C) foram utilizados para obtenção de uma correlação empírica do tipo Arrhenius, que assume uma diminuição linear do logaritmo do coeficiente interno de transporte de massa efetivo ( $\ln(D_{\text{eff}})$ ) com o incremento do inverso da temperatura ( $1/T$ ).

FIGURA 13 - DOMÍNIO DE INTEGRAÇÃO DA UMIDADE. o=VALORES DEFINIDOS PELAS CONDIÇÕES DE CONTOURNO; X=VALORES CALCULADOS ATRAVÉS DA SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO (68)



### 3.3.4 Determinação da Temperatura Interna

#### a) Condições do ensaio e parâmetros controlados

Determinou-se a curva de aquecimento em tábuas de *Pinus taeda* L de 46mm de espessura, 100mm de largura e 745mm de comprimento. Neste ensaio utilizaram-se amostras perto da medula (madeira juvenil) e perto da casca (madeira adulta), que foram colocadas simultaneamente dentro da câmara.

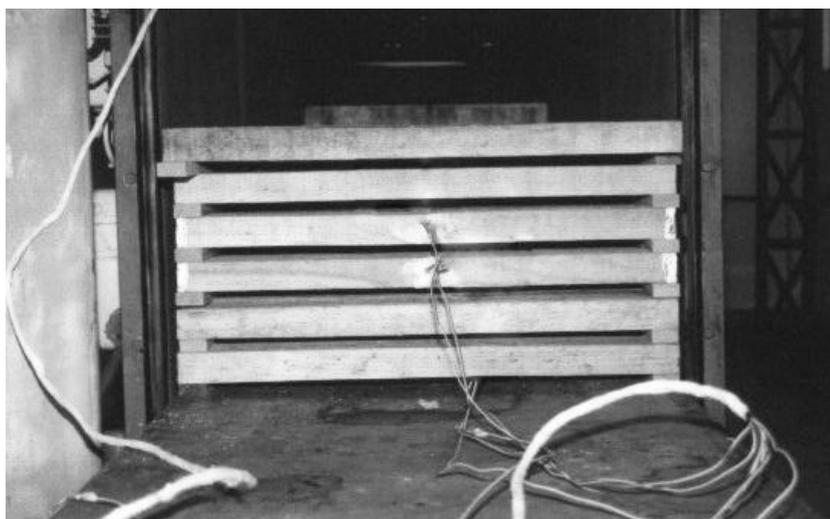
As condições dentro da câmara podem ser observadas na Tabela 5.

TABELA 5 - CONDIÇÕES DE AQUECIMENTO NO INTERIOR DA CÂMARA

<b>TEMPERATURA BULBO SECO (°C)</b>	<b>TEMPERATURA BULBO ÚMIDO (°C)</b>	<b>UMIDADE RELATIVA (%)</b>	<b>VELOCIDADE AR (m/s)</b>
40	40	100	3,5, 4,7 e 6,8
60	60	100	3,5, 4,7 , e 6,8
80	80	100	3,5, 4,7 e 6,8

As amostras em cada um dos ensaios (uma amostra de madeira juvenil e uma amostra de madeira adulta), foram colocadas dentro da câmara, quando a mesma já se encontrava à temperatura requerida, permitindo completar um volume de madeira de  $0,32\text{m}^3$  (Figura 14).

FIGURA 14 – CÂMARA DE SECAGEM E DISTRIBUIÇÃO DA CARGA DE MADEIRA DURANTE OS ENSAIOS



Como a área de troca térmica oferecida pelas laterais das tábuas são muito menores que as áreas das faces superior e inferior, considera-se que o fluxo ocorre,

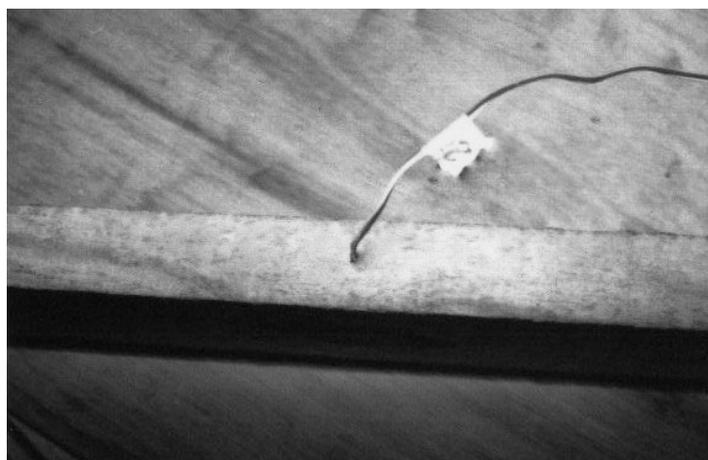
principalmente na direção da espessura da tábua configurando um fluxo de calor unidimensional. As condições iniciais consideram uma distribuição uniforme da temperatura na madeira (temperatura inicial constante ao longo da espessura).

As amostras foram colocadas na última coluna e na terceira fileira da carga de madeira, garantindo-se que o escoamento do ar atingido esteja plenamente desenvolvido, quanto ao regime no interior dos condutos, configurado pelo espaço entre as tábuas.

Durante o processo de aquecimento nos nove ensaios realizados, as variáveis controladas foram a temperatura no centro da madeira, a temperatura de bulbo seco e úmido, que foram medidas por termopares tipo J.

No interior da madeira o termopar foi disposto no centro da tábua, em um orifício de 30mm de profundidade na lateral da tábua (Figura 15). Para a coleta de dados os termopares foram conectados a um módulo condicionador de sinais analógico-digital instalado em um microcomputador. As leituras de temperaturas foram realizadas em intervalos de um minuto, durante todo o período de ensaio.

FIGURA 15 – DISPOSIÇÃO DOS TERMOPARES NA TÁBUA



#### **b) Modelo Matemático de Fourier**

De acordo com (SIAU, 1995), a equação do balanço diferencial de energia (equação de Fourier), considerando o aquecimento de uma placa plana (tábua) em regime transiente com fluxo de calor unidirecional pode ser escrita como:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( k_{mad} \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \mathbf{r}_{av} C_{mad} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Onde:

$k_{mad}$ : condutividade térmica da madeira, (J/m s °C).

$\mathbf{a}_{mad} = k_{mad}/\mathbf{r}_{av}C_{mad}$  difusividade térmica, (m<sup>2</sup>/s).

$\mathbf{r}_{av}$ : densidade aparente da madeira úmida, (kg/m<sup>3</sup>).

$C_{mad}$ : calor específico da madeira úmida (J/kg s)

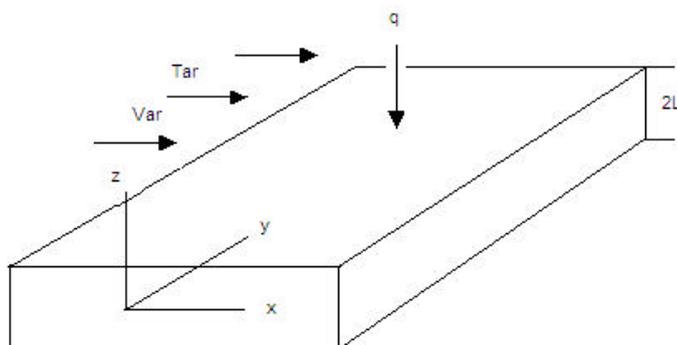
T: temperatura, (°C).

t: tempo, (s)

z: coordenada espacial na direção z, (m).

Para a solução do modelo proposto considerou-se uma tábua de espessura  $2L$ , sendo aquecida por convecção a partir do ar a uma temperatura  $T_{ar}$  que escoia sobre a tábua com uma velocidade  $V_{ar}$ . (Figura 16).

FIGURA 16 – FLUXO DE CALOR E AR SOBRE UMA TÁBUA DE ESPESSURA  $2L$



NOTAS:

Var: velocidade do ar.

Tar: temperatura do ar.

q: fluxo de calor.

Considerando-se que a condutividade térmica, calor específico e a densidade aparente da madeira não varia com a temperatura, tem-se que a difusividade térmica da madeira seja constante ao longo do ensaio.

Na equação 74 pode-se observar a condição inicial, considerando-se uma temperatura inicial constante ao longo da espessura da tábua, e igual a  $T_0$ .

$$T(z,0) = T_0$$

74

A primeira condição de contorno está representada pela equação 75, considera no centro da placa, a função temperatura que passa por um ponto de mínimo:

Para  $z=0$  (Simetria):

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \quad 75$$

Como o fluxo de calor é no sentido inverso do gradiente de temperatura na espessura da tábua, tem-se a segunda condição de contorno, a qual está representada na equação 78. A troca de calor entre a tábua e o ar é por convecção, logo na superfície da mesma ( $z=L$ ). O fluxo de calor por condução da superfície para o interior da tábua iguala-se ao fluxo de calor recebido do ar:

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \Big|_{z=L} = \frac{h_c}{k_{mad}} \times (T_{ar} - T) \quad 76$$

A solução detalhada da equação de Fourier pode ser vista no anexo-3. A Equação que descreve a temperatura em qualquer posição no interior da placa e em qualquer tempo pode ser escrita como:

$$T(z,t) = T_{ar} + (T_0 - T_{ar}) \times 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\text{sen}(L I_n) \times \cos(z I_n)}{L I_n + \text{sen}(L I_n) \times \cos(L I_n)} \exp(-I_n^2 a_{mad} t) \quad 77$$

Onde:

$T(z,t)$ : variação da temperatura no tempo e no espaço.

$T_{ar}$ : temperatura do ar.

$L$ : metade da espessura da tábua.

$z$ : direção no eixo  $z$ .

$I$ : raízes da equação característica.

$a_{mad}$ : difusividade térmica da madeira.

### 3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística correspondeu a uma análise de variância e análise de regressão linear simples e múltipla, correspondendo a uma análise de estatística descritiva. As medidas de adequação e seleção dos modelos de regressão foram feitas através da análise do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), de correlação (R), teste F e do erro padrão da estimativa (Syx), considerando-se os modelos mais adequados aqueles de maior  $R^2$ , R, F e menor Syx. Na análise de variância considerou-se um valor de  $p=0,05$ , que corresponde ao nível de 95% de confiabilidade. Para a análise estatística utilizou-se o software STATISTICA<sup>®</sup> 6.0.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 COEFICIENTES CONVECTIVOS DE CALOR E MASSA

Os coeficientes convectivos de transferência de calor e massa entre o ar e as paredes de um duto de madeira, que corresponde no caso de secagem de madeira ao espaço livre entre duas filas consecutivas de tábuas empilhadas no interior do secador, foram determinados com base em equações empíricas propostas por diferentes autores e comparados com os valores obtidos neste estudo nas temperaturas de 40°C, 60°C e 80°C.

A madeira de *Pinus elliottii* Emgenl utilizada nestes ensaios, apresentou uma densidade básica média de 405kg/m<sup>3</sup> (coeficiente de variação de 4,4%) e um teor de umidade inicial médio de 130%, (coeficiente de variação de 18,3%). No anexo-1 podem-se observar as propriedades físicas de cada amostra utilizada neste ensaio.

#### 4.1.1 Coeficiente Convectivo de Calor

Os resultados obtidos para o coeficiente convectivo de calor são apresentados na Tabela 6. Observa-se que o desvio (erro) é menor quando os valores determinados pela analogia de Chilton-Colburn e os valores obtidos neste estudo, indicando que o coeficiente convectivo de calor determinado do número de Nusselt ( $Nu=0,023Re^{4/5}Pr^{1/3}$ ) é o mais apropriado para determinar este coeficiente.

Os resultados obtidos neste estudo estão em concordância com TEMBLAY *et al.* (2000b) e FORTIN *et al.* (2001), os quais indicaram que o valor médio do coeficiente convectivo de calor pode ser obtido do número de Nusselt, considerando um fluxo ao longo de um duto de seção retangular. Da mesma forma para BEJAN (2004), o coeficiente de transferência de calor convectivo no escoamento interno é usualmente apresentado na forma adimensional pelo número de Nusselt baseado no diâmetro hidráulico.

Os valores contemplados na Tabela 6 comprovam ainda que o coeficiente convectivo de calor é pouco influenciado pela temperatura, variando entre 17,1 J/sm<sup>2</sup>K e 16,8 J/sm<sup>2</sup>K para a temperatura de 40°C e 80°C (Chilton-Colburn). Isto se deve ao

fato que nas condições utilizadas neste experimento a temperatura absoluta variou de 313,15K até 353,15K, correspondendo a uma variação de apenas 12,8%.

Devido a pouca variação do coeficiente de transferência convectivo de calor com a temperatura, HUKKA (1999) utilizou uma relação baseada nos resultados de PANG (1996a) e SALIN (1996), que relaciona diretamente o coeficiente convectivo unicamente com a velocidade do ar atmosférico ( $h_c = 8xV^{0,67}$  J/s m<sup>2</sup>K). Esta relação despreza as variações nas propriedades do ar por considerar que variam pouco nas condições usuais de um secador de madeira.

TABELA 6 - COEFICIENTES CONVECTIVOS DE CALOR DETERMINADOS NESTE ESTUDO E POR OUTROS AUTORES

AUTOR	COEFICIENTE CONVECTIVO DE CALOR (J/s m <sup>2</sup> k)			ERRO (%) (E-C/E)		
	40°C	60°C	80°C	40°C	60°C	80°C
	Chilton-Colburn	17,1	16,9	16,8	3,9	13,3
McAdams	15,3	15,1	15,1	14,0	22,6	25,6
Gnielinski	15,5	15,1	15,1	12,9	22,6	25,6
Gnielinski simplificado	14,0	13,6	13,6	21,3	30,3	33,0
Valores estudo	17,8	19,5	20,3	0,0	0,0	0,0

NOTA: (E-C/E)=[(Experimental-Calculado)/Experimental]x100.

Na Tabela 7 podem-se observar os valores individuais de cada amostra, determinados neste estudo e os valores obtidos pela analogia de Chilton-Colburn.

Como pode ser observado, de uma maneira geral o erro tende aumentar com o acréscimo da temperatura, e isto é muito provavelmente provocado por erro experimental, que cresce com a temperatura. Em temperaturas mais elevadas a perda de água da madeira durante a retirada da tábua da câmara para pesagem aumenta, e que aparentemente afeta os resultados.

TABELA 7 - COEFICIENTES CONVECTIVOS DE CALOR DETERMINADOS NESTE ESTUDO E SEGUNDO CHILTON-COLBURN

Amostra	COEFICIENTE CONVECTIVO DE CALOR (J/s m <sup>2</sup> K)						% ERRO (E-C/E)		
	40-E	40-CC	60-E	60-CC	80-E	80-CC	40	60	80
1	19,6	17,1	16,9	16,9	21,0	16,8	12,8	0,0	20,0
2	16,7	17,1	21,7	16,9	19,7	16,8	-2,4	22,1	14,7
3	17,3	17,1	19,7	16,9	20,3	16,8	1,2	14,2	17,2
4	17,6	17,1	19,9	16,9	20,3	16,8	2,8	15,1	17,2

NOTAS:

E: Valores experimentais

40,60,80: Temperatura de secagem, °C

CC: Chilton-Colburn

 $(E-C/E)=[(Experimental-Calculado)/Experimental] \times 100.$ 

#### 4.1.2 Coeficiente Convectivo de Massa

Na Tabela 8 são apresentados os valores do coeficiente convectivo de transferência de massa determinados neste estudo e os calculados com base na analogia de Chilton-Colburn, considerando as amostras individuais. Os maiores erros encontrados correspondem a -15,6%, -17,0% e -53,2% para as temperaturas de 40°C, 60°C e 80°C, respectivamente.

Os resultados obtidos indicam que a percentagem de erro aumenta com o aumento da temperatura utilizada. No caso do coeficiente de transferência de massa, como observado, o erro foi maior que o observado para o coeficiente de transferência de calor. Isto demonstra que o coeficiente de transferência de massa é mais difícil de determinar do que o coeficiente de transferência de calor, e esta foi a razão para PERRÉ e TURNER, (1999) utilizar a analogia de Chilton-Colburn para determinar o coeficiente de transferência de massa.

PANG (1996a) utilizou a analogia de Chilton-Colburn para a determinação do coeficiente de transferência de calor, enquanto SOUZA e NEBRA (2000) a aplicaram para a determinação do coeficiente de transferência de massa, que foi utilizado num modelo de transporte simultâneo de calor e massa aplicado à secagem de cavacos de madeira.

TABELA 8 - COEFICIENTES CONVECTIVOS DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA DETERMINADOS NESTE ESTUDO E SEGUNDO CHILTON-COLBURN

Amostra	COEFICIENTE CONVECTIVO DE MASSA, $k_m$ (m/s)						% ERRO (E-C/E)		
	40-E	40-CC	60-E	60-CC	80-E	80-CC	40	60	80
1	0,0166	0,0163	0,0161	0,0165	0,0116	0,0167	1,8	-2,5	-44,0
2	0,0141	0,0163	0,0155	0,0165	0,0109	0,0167	-15,6	-6,5	-53,2
3	0,0146	0,0163	0,0141	0,0165	0,0112	0,0167	-11,6	-17,0	-49,1
4	0,0149	0,0163	0,0142	0,0165	0,0112	0,0167	-9,4	-16,2	-49,1

NOTAS:

40,60,80: Temperatura de secagem °C. E: Valores experimentais.

CC: Chilton-Colburn.

 $(E-C/E)=[(Experimental-Calculado)/Experimental] \times 100$ .

TURNER (1996) trabalhando com madeira de *Picea spp*, utilizou um valor constante do coeficiente convectivo de transferência de massa médio de 0,014 m/s, independente da temperatura de secagem. Este autor utilizou uma velocidade do ar de 2,0m/s e temperaturas de bulbo seco de 50°C, 80°C e 120°C e com temperaturas de bulbo úmido de 30°C, 65 °C e 80 °C, respectivamente. TREMBLAY *et al.* 2000b, determinaram experimentalmente o coeficiente convectivo de massa em madeira de *Pinus resinosa* para as velocidades de 1,0, 2,5 e 5,0 m/s e uma temperatura de 56°C , obtendo um coeficiente convectivo de massa de 0,010 m/s, 0,013 m/s e 0,016 m/s, respectivamente.

Pode-se mencionar da análise anterior que os coeficientes convectivos de transferência de massa podem ser determinados da analogia de Chilton-Colburn.

#### 4.2 TESTES EM ESTUFA PILOTO

A secagem em câmara piloto permitiu avaliar o coeficiente de difusão efetivo, o gradiente de umidade, a umidade média da tábua, perfil de temperatura e as fendas superficiais, considerando diferentes condições de secagem.

Neste ensaio foram utilizadas tábuas de *Pinus elliottii* de 36mm de espessura com um teor de umidade inicial médio de 121,8% e a secagem foi feita até as tábuas atingiram um teor de umidade médio final de 13,7%. O material neste estudo tinha

uma densidade básica média de 447 kg/m<sup>3</sup>. No anexo-2 podem-se observar as propriedades físicas das amostras utilizadas neste ensaio.

Como apresentado anteriormente na metodologia, nesta parte do experimento foram testadas três temperaturas (40°C, 60°C e 80°C) e a velocidade do ar foi mantida constante em 3 m/s.

#### 4.2.1 Tempo de Secagem

Na Tabela 9 apresentam-se o tempo de secagem e o teor de umidade médio para as condições testadas. O efeito da temperatura sobre o tempo de secagem pode ser ainda observado na Figura 17.

TABELA 9 - TEOR DE UMIDADE INICIAL, FINAL E TEMPO DE SECAGEM PARA AS TEMPERATURAS TESTADAS

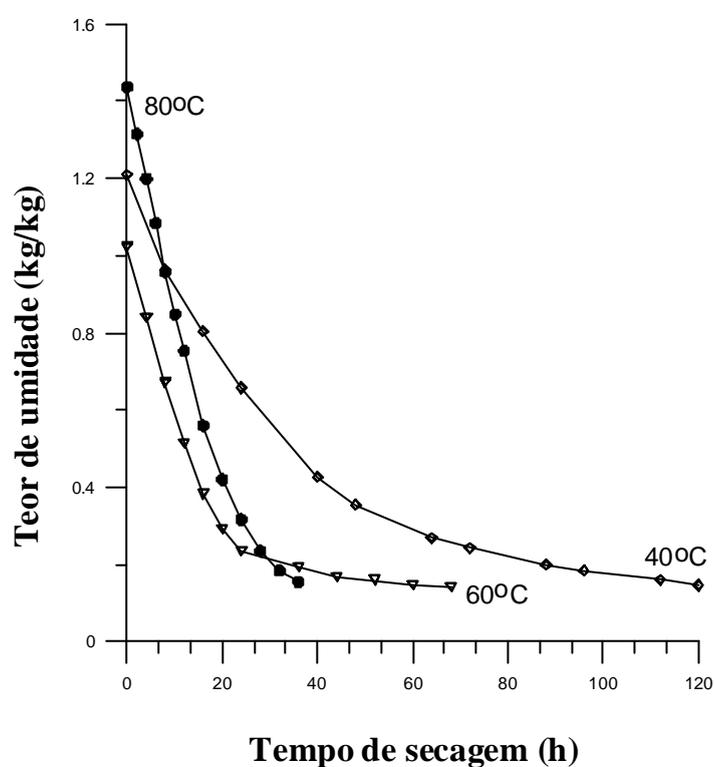
TEMPERATURA SECAGEM	TEOR UMIDADE INICIAL	TEOR UMIDADE FINAL	TEMPO DE SECAGEM
40°C	122,1 %	14,7 %	120 h
60°C	108,0 %	11,8 %	62 h
80°C	135,5 %	14,6 %	36 h

Os tempos de secagem obtidos neste estudo estão em concordância com os obtidos por SANTINI e HASELEIN (2002), num estudo sobre o efeito da velocidade do ar (2,3m/s e 5,0m/s) e a temperatura do ar (50°C e 110°C) sobre a taxa de secagem em madeira *Pinus elliottii* de 25mm de espessura. Segundo os autores, o tempo de secagem para a temperatura de 50°C e uma velocidade de 2,3m/s foi de 74h, considerando um teor de umidade inicial de 114% e final 10%. Para uma temperatura de 110°C, e a mesma velocidade do ar, o tempo de secagem foi de 19h, sendo neste caso o teor de umidade inicial de 103% e o final de 10%.

Quando consideraram uma velocidade do ar de 5m/s mantendo praticamente os mesmos valores do teor de umidade inicial e final, SANTINI e HASELEIN (2002) obtiveram tempos de secagem de 63h e 10h para uma temperatura de secagem de 50°C

e 110°C, respectivamente. Segundo TOMASELLI (2006) os tempos médios de secagem obtidos na indústria para madeira serrada de *Pinus* de 36mm de espessura, seriam de 120h, 80h e 48h horas, para as temperaturas de 40°, 60°C e 80°C, respectivamente.

FIGURA 17 – CURVAS DE SECAGEM PARA MADEIRA DE *PINUS ELLIOTTII* PARA AS TEMPERATURAS TESTADAS



Ao se relacionar os tempos de secagem com a temperatura observa-se que, quando se utiliza uma temperatura de secagem de 80°C, o tempo necessário para alcançar uma umidade final de 14,0% diminui em 70,0% em relação com aquele obtido a 40°C. Para uma temperatura de 60°C, o tempo necessário diminui em 48,0% para atingir o mesmo teor de umidade.

Os valores obtidos neste estudo, também podem ser comparados com os de SEVERO (1986), que trabalhou com secagem de madeira de *Pinus elliottii* de 25mm

de espessura. SEVERO (1986) identificou uma redução de 59% no tempo de secagem quando aumentou a temperatura de 50°C para 80°C e de 57% quando a velocidade do ar passou 2,5m/s para 5,5m/s, mantendo a mesma temperatura. O efeito da temperatura no tempo de secagem da madeira de *Pinus* foi também estudado por KLITZKE (2002). Este autor identificou que, utilizando uma velocidade do ar de 4m/s, o tempo de secagem diminuiu em 34,1% quando a temperatura foi aumentada de 70°C para 90°C.

Ao realizar uma análise de regressão múltipla dos dados (*backward stepwise*), considerando as variáveis: temperatura, teor de umidade inicial, teor de umidade final e densidade básica da madeira (Anexo-4), foram eliminadas as variáveis, teor de umidade inicial e densidade básica da madeira. Isto indica que estes parâmetros pouco influenciaram no tempo total de secagem, por se tratar de amostras pareadas.

O modelo linear apresentou um coeficiente de determinação de 98,68% e um erro absoluto de 3,46, sendo apresentado a seguir:

$$\text{Tempo} = 146,4010 - 2,0882T + 3,7692Tu_f \quad 78$$

Onde:

T= temperatura de secagem, °C.

Tu<sub>f</sub>= teor de umidade final, %.

SANTINI e HASELEIN (2002), estudaram a influência da velocidade do ar e da temperatura sobre a taxa de secagem da madeira de *Pinus elliottii*, concluíram que os parâmetros teor de umidade iniciais e finais, no modelo de regressão linear não tiveram efeito significativo mesmo a 90% de confiabilidade. Entretanto, a temperatura e a velocidade do ar foram os parâmetros que explicaram melhor o modelo linear com um coeficiente de determinação de 99,85%.

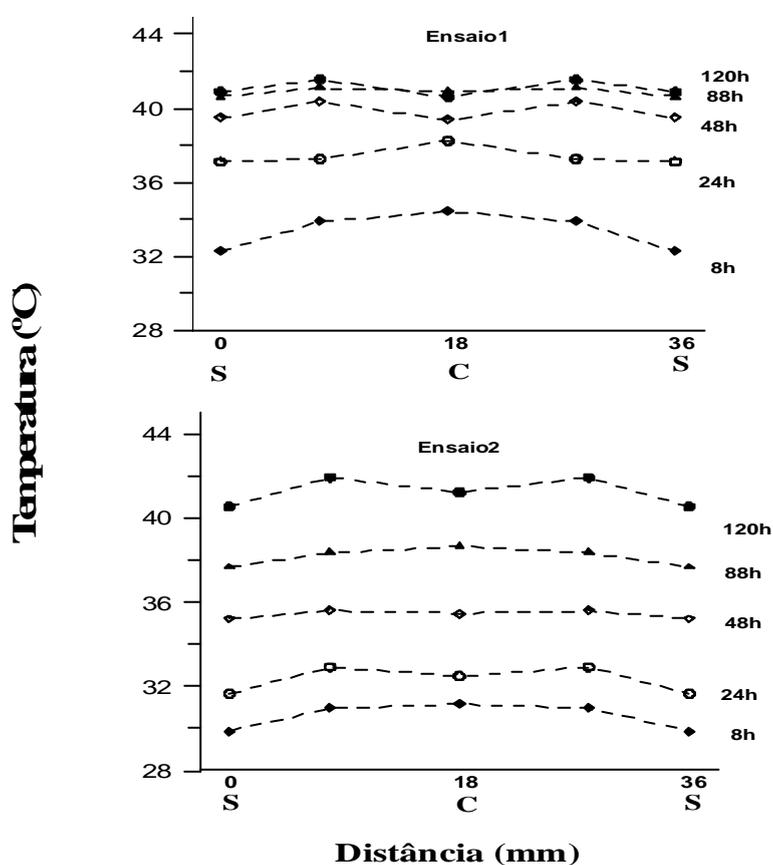
Os mesmos autores mencionam que TAYLOR e MITCHELL (1987), constataram que o teor de umidade inicial, a densidade da madeira e a quantidade da água removida durante a secagem não tinham efeito significativo sobre o tempo de secagem.

#### 4.2.2 Temperatura Interna

A variação da temperatura na espessura da madeira nos diferentes ensaios realizados e para diferentes períodos de secagem, pode ser observada nas Figuras 18, 19 e 20.

Como pode ser observado o gradiente de temperatura na espessura da tábua nos diferentes intervalos de tempo mantem-se praticamente inalterados e a diferença na temperatura entre o centro e a superfície, é na maioria dos casos de 1°C.

FIGURA 18 – GRADIENTE DE TEMPERATURA NO INTERIOR DA MADEIRA A 40°C



NOTAS:  
S: superfície.  
C: centro

FIGURA 19 – GRADIENTE DE TEMPERATURA NO INTERIOR DA MADEIRA A 60°C

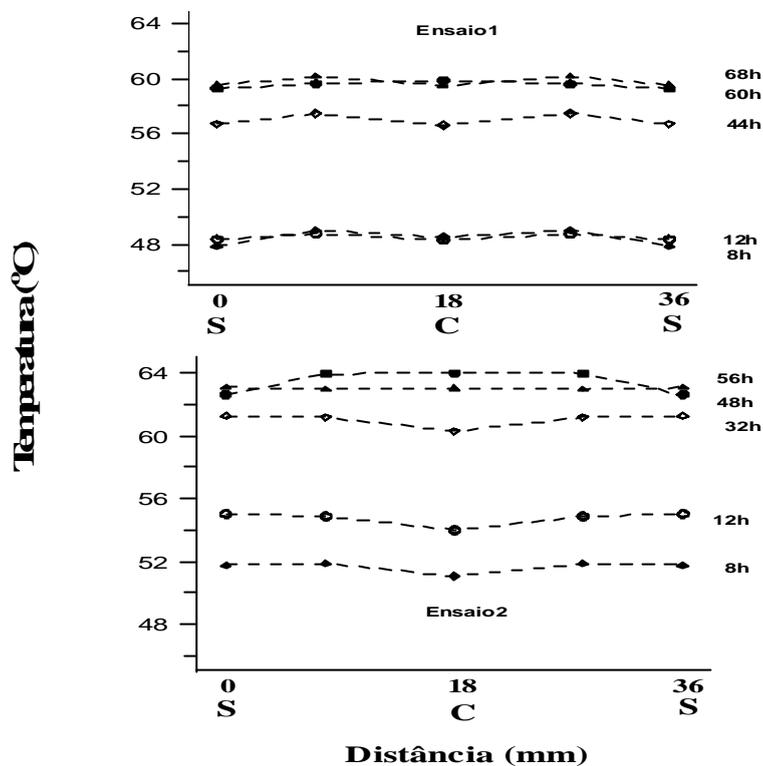
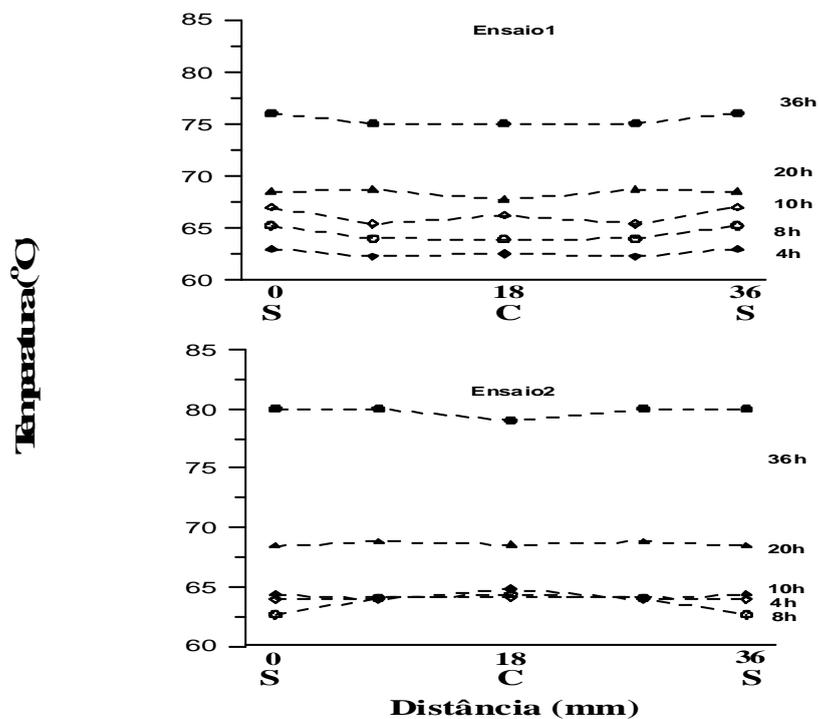


FIGURA 20 – GRADIENTE DE TEMPERATURA NO INTERIOR DA MADEIRA A 80°C



NOTAS:

S: superfície. C: centro

O comportamento da temperatura interna da madeira durante ensaios experimentais foi também registrado por PLUMB *et al.* (1984), indicando que a temperatura no interior da madeira foi uniforme em diferentes tempos. Isto, segundo o autor indica que o processo de transferência de calor é externamente controlado pelo coeficiente convectivo de calor em contraste à transferência de massa a qual é controlada pelo coeficiente de difusão. O fato que a variação interna da temperatura é pequena, significa que o gradiente de temperatura ( $\partial T/\partial x$ ) não contribui ao fluxo de umidade total e portanto, pode ser eliminado da equação de transporte de massa (PLUMB *et al.* 1985). Este efeito se denomina, “efeito Soret” e quando o gradiente passa a não ser significativo, o processo de secagem se denomina isotérmico.

Deve-se notar que, quando a difusão não é isotérmica, o fluxo de umidade é determinado por difusão termal (movimento de umidade devido a um gradiente de temperatura) e por difusão de massa, devido o gradiente de potencial químico, sendo mais complexo e derivada da termodinâmica irreversível (NELSON, 1986a e 1986c).

De acordo com PANG (1997) o modelo de difusão é aplicável para casos onde o gradiente de temperatura é plano ou o coeficiente para o gradiente de temperatura é pequeno comparado com o gradiente de teor de umidade. Em outros casos, ou onde a temperatura da madeira é de interesse, o modelo de transporte deve ser empregado.

Para LIU e SIMPSON (1999), o processo é isotérmico quando a condutividade térmica da madeira é de ordem de magnitude maior do que o coeficiente de difusão.

Dos resultados obtidos neste estudo, pode-se concluir que a equação de difusão pode ser usada para prever a distribuição de umidade na madeira, devido a que praticamente não existe variação da temperatura na espessura da tábua (processo isotérmico).

#### 4.2.3 Efeito da Umidade no Coeficiente de Difusão Efetivo

Na Tabela 10 é apresentado o resultado obtido experimentalmente para o coeficiente de difusão efetivo para a madeira de *Pinus elliottii* submetidas a secagem em três temperaturas. Os coeficientes foram determinados ao longo do processo de

secagem e, portanto representam valores para cada temperatura e diferentes valores de teor de umidade da madeira.

TABELA 10 - COEFICIENTE DE DIFUSÃO EFETIVO PARA AS TEMPERATURAS DE SECAGEM TESTADAS

TEMPERATURA (40°C)				TEMPERATURA (60°C)				TEMPERATURA (80°C)			
Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 1		Ensaio 2	
Tu	D <sub>ef</sub>	Tu	D <sub>ef</sub>	Tu	D <sub>ef</sub>	Tu	D <sub>ef</sub>	Tu	D <sub>ef</sub>	Tu	D <sub>ef</sub>
1,120	0,00	1,214	0,00	1,087	0,00	0,919	0,00	1,532	0,00	1,269	0,00
0,754	1,51	0,580	3,20	0,755	2,56	0,545	4,05	0,992	5,80	0,809	5,93
0,614	1,29	0,538	1,78	0,641	1,99	0,427	3,53	0,875	4,41	0,723	4,12
0,511	1,17	0,509	1,26	0,625	1,42	0,341	3,15	0,785	3,69	0,615	3,94
0,353	1,11	0,468	1,05	0,380	2,66	0,284	2,88	0,680	3,25	0,521	3,85
0,265	1,19	0,412	0,97	0,290	2,68	0,229	2,74	0,645	2,76	0,451	3,63
0,209	1,07	0,338	1,02	0,237	2,62	0,158	2,95	0,589	2,62	0,394	3,48
0,171	1,09	0,263	1,11	0,210	2,36	0,162	2,25	0,528	2,23	0,349	2,89
0,166	0,91	0,230	1,07	0,176	2,08	0,120	2,27	0,425	2,20	0,287	2,73
0,148	0,91	0,209	1,02	0,159	1,79	0,097	2,22	0,333	2,29	0,214	2,86
0,139	0,82	0,193	0,96	0,143	1,65	0,084	2,18	0,225	2,58	0,180	2,74
0,135	0,78	0,184	0,89	0,132	1,50			0,187	2,53	0,150	2,70
		0,166	0,87	0,126	1,37			0,155	2,50	0,125	2,66
		0,169	0,80								
		0,164	0,76								
		0,152	0,75								
Média	1,08		1,17		2,06		2,82		3,07		3,46

NOTAS:

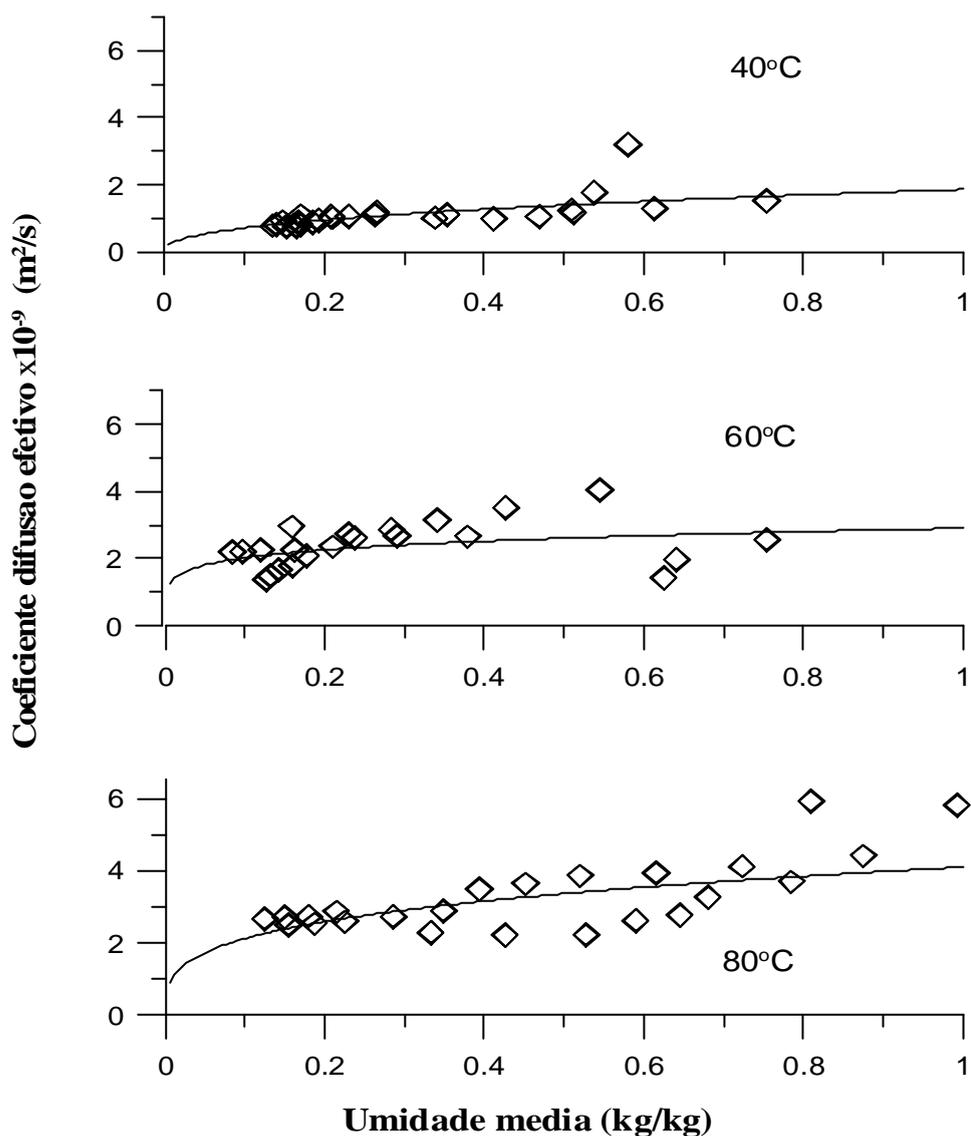
Tu: Teor de umidade médio, kg água/kg madeira seca.

D<sub>ef</sub>: Coeficiente de difusão efetivo, m<sup>2</sup>/s (x10<sup>-9</sup>).

Os valores do coeficiente de difusão efetivo para diferentes teores de umidade e temperatura de secagem, podem ser vistos também na Figura 21, onde o efeito da umidade média da madeira no coeficiente de difusão para as três temperaturas testadas (40°C, 60°C e 80°C) é mais facilmente analisado. Como mostrado, o coeficiente de

difusão efetivo decresce com a redução do teor de umidade e aumenta com a temperatura de secagem.

FIGURA 21 - EFEITO DA UMIDADE NO COEFICIENTE DE DIFUSÃO EFETIVO



Como pode ser observado, o coeficiente de difusão efetivo decresce com a diminuição do teor de umidade principalmente a partir do ponto de saturação das fibras. De uma maneira geral, acima do ponto de saturação das fibras o coeficiente de difusão efetivo tende a permanecer constante. Estes resultados confirmam os

resultados de SIMPSON e LIU (1997), que indicaram que o coeficiente de difusão na secagem da madeira aumenta com o aumento do teor de umidade e tende a ser constante acima do PSF.

Da mesma forma HUKKA (1999), que determinou o coeficiente de difusão efetivo em madeira de *Pinus sylvestris* e *Picea abies*, constatou que o coeficiente de difusão efetivo permanece constante acima do ponto de saturação das fibras e abaixo deste ponto decresce com a diminuição do teor de umidade para as diferentes temperaturas de ensaio utilizadas (20°C, 40°C, 60°C e 80°C).

YEO *et al.* (2002b), que realizaram ensaios de secagem com três espécies de madeira diferentes (*Quercus rubra* L., *Pinus spp.* e *Acer saccharum*) a uma temperatura de 30°C e uma umidade relativa 25%, também encontraram resultados semelhantes dependendo da espécie e da direção considerada (longitudinal, radial ou tangencial). Eles identificaram, que o coeficiente de difusão longitudinal para as três espécies permanece constante desde o teor de umidade máximo (madeira verde) até 30% e, posteriormente, diminui até o teor de umidade de equilíbrio.

Quando a madeira apresenta um coeficiente de difusão constante acima do ponto de saturação das fibras indica que o movimento de umidade é predominantemente por ação capilar. O coeficiente de difusão na direção transversal para cada espécie, exceto para a direção radial da madeira de *Acer saccharum*, decresce desde verde (acima de 100%) até o teor de umidade de equilíbrio.

Observou-se, também, no presente estudo que a variação do coeficiente de difusão efetivo abaixo do ponto de saturação das fibras foi mínimo. De acordo com KIRK *et al.* (1985), o coeficiente de difusão assume valores mais elevados e constantes quando o teor de umidade esta acima do ponto de saturação das fibras e, evidentemente, um menor valor para umidades abaixo do ponto de saturação das fibras.

O efeito da umidade no coeficiente de difusão tem sido pesquisado considerando duas alternativas básicas. Alguns autores como HOUGEN *et al.* (1940); MERONEY, (1969) citados por LIU *et al.* (2001) e SIMPSON (1993), têm assumido que o coeficiente de difusão depende fortemente do teor de umidade, enquanto outros

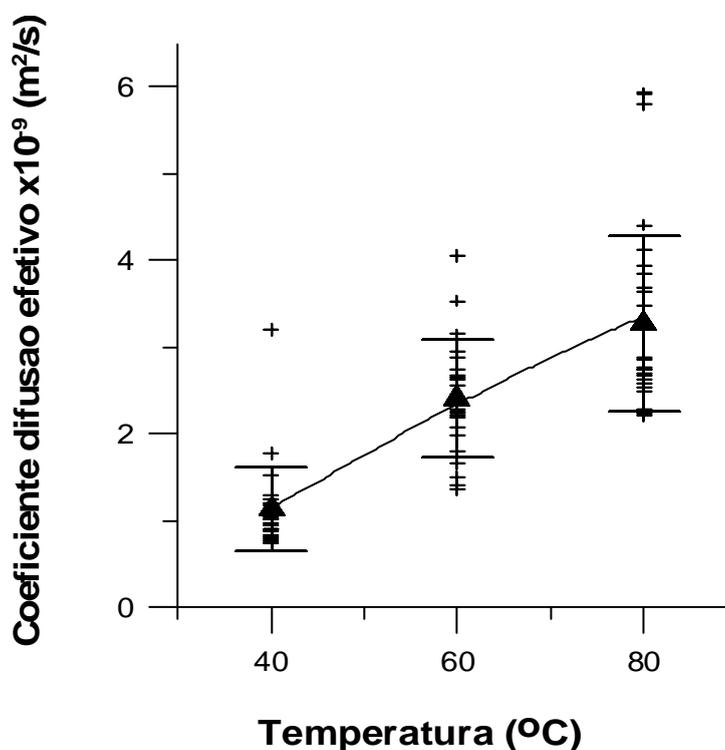
como AVRAMIDIS e SIAU (1987), CHOONG e SKAAR (1972), DROIN *et al.* (1988a), MOUNJI *et al.* (1991), YEO *et al.* (2001) consideram o coeficiente de difusão constante, aludindo neste caso uma média.

#### 4.2.4 Variação do Coeficiente de Difusão Efetivo com a Temperatura

A variação do coeficiente de difusão efetivo, com a temperatura de secagem calculada com base nos resultados deste estudo, pode ser observada na Figura 22. O coeficiente de difusão efetivo aumenta com o acréscimo da temperatura de secagem seguindo uma função exponencial do tipo  $[D_{ef}=9,911\exp(-86,602/T)]\times 10^{-9}$ , (T, em °C).

Esta função exponencial obtida neste estudo é dependente da temperatura e obedece a uma forma do tipo Arrhenius, sendo aplicada por diferentes autores (STAMM, 1964, CHONG, 1965, YAO, 1966, BRAMHALL, 1979c, SKAAR ; SIAU, 1981, SKAAR ; BABIAK, 1982, KANG ; HART, 1997, FERNANDEZ; HOWELL, 1997, HAQUE ; LANGRISH, 2001).

FIGURA 22 – EFEITO DA TEMPERATURA NO COEFICIENTE DE DIFUSÃO EFETIVO



Como indicado por LIU (1989), o coeficiente de difusão descreve a taxa de movimento de umidade interna e é uma medida da resistência interna da madeira ao fluxo de umidade, sendo relacionado à geometria interna da madeira, e afetado pela temperatura e a umidade (SIAU; AVRAMIDIS 1996, SIMPSON; LIU 1997).

STAMM e NELSON (1961) e WIRAKUSUMA (1962) citados por YAO (1966), demonstraram que a temperatura afeta tanto o coeficiente de difusão de vapor de água como o coeficiente de difusão de água higroscópica, sendo confirmado por BIGGERSTAFF, (1965), que considera a temperatura como um fator crítico.

De acordo com MORÉN (2001), o último regime de secagem começa quando a difusão controla a taxa de secagem, a qual representa a resistência ao movimento da água e é principalmente influenciado pela temperatura. CHRUSCIEL *et al.* (1999), sugerem que a variação da resistência da transferência de massa global seja representada por uma função da temperatura do ar ambiente, descrita segundo a lei de Arrhenius.

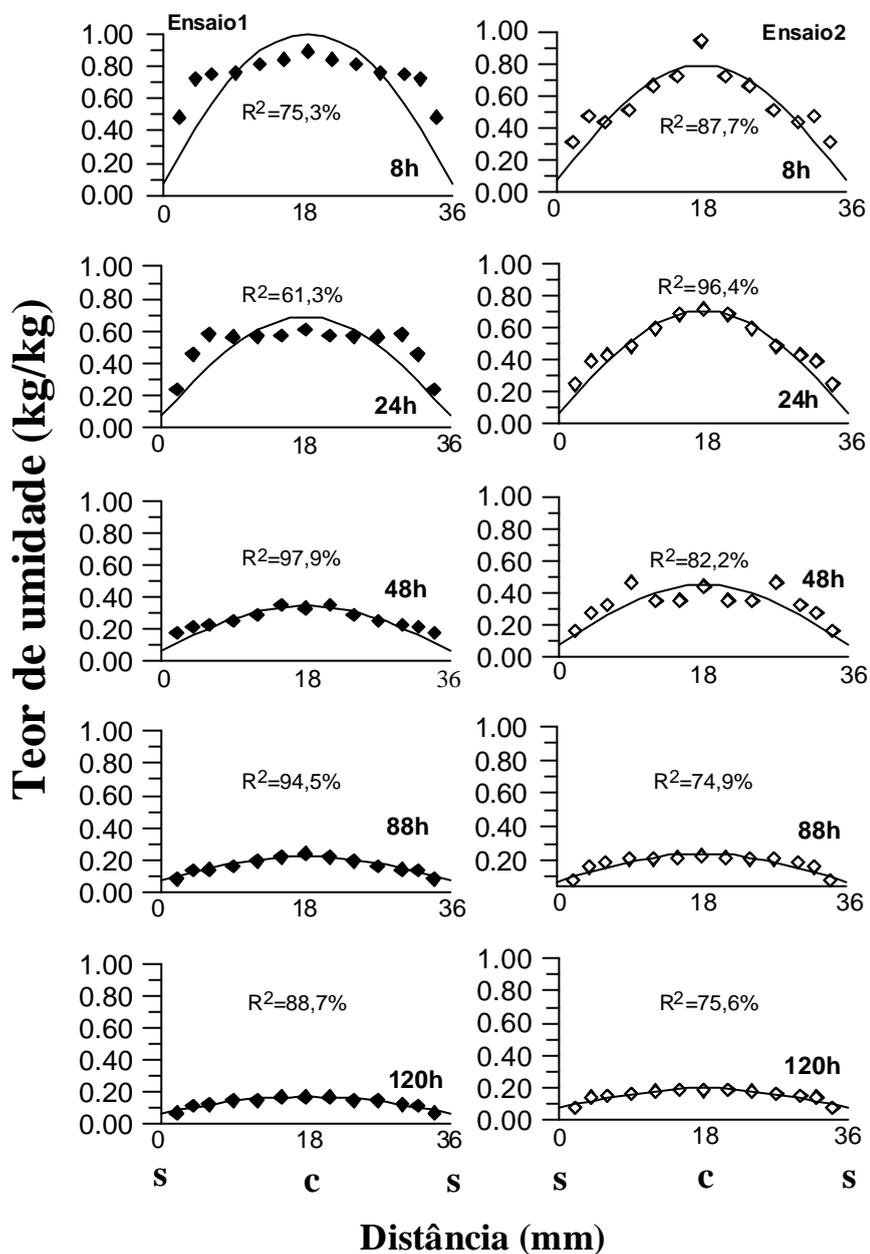
#### 4.3 MODELAGEM

##### 4.3.1 Modelagem do Gradiente de Umidade

Os gradientes de umidades durante o processo de secagem foram determinados experimentalmente pelo método das lâminas. Para obter os gradientes de umidades teóricos foi utilizado o modelo difusivo (segunda lei de Fick), sendo considerados os seguintes parâmetros físicos no modelo: i) coeficiente convectivo de transferência de massa, ii) teor de umidade inicial da madeira, iii) teor de umidade de equilíbrio e iv) coeficiente de difusão efetivo.

Nas Figuras 23, 24 e 25, observam-se os perfis de umidade ao longo da espessura da tábua com base nos dados experimentais, os quais são comparados com os determinados pelo modelo difusivo, em diferentes tempos de secagem, obtidos nos ensaios com temperatura de 40°C, 60°C e 80°C. Para cada uma das amostras testadas foi calculado o coeficiente de determinação considerando os valores experimentais e os determinados pelo modelo difusivo, e os resultados são apresentados nestas Figuras.

FIGURA 23 - DADOS EXPERIMENTAIS E DO MODELO DIFUSIVO PARA O GRADIENTE DE UMIDADE (TEMPERATURA DE 40°C)



NOTAS:

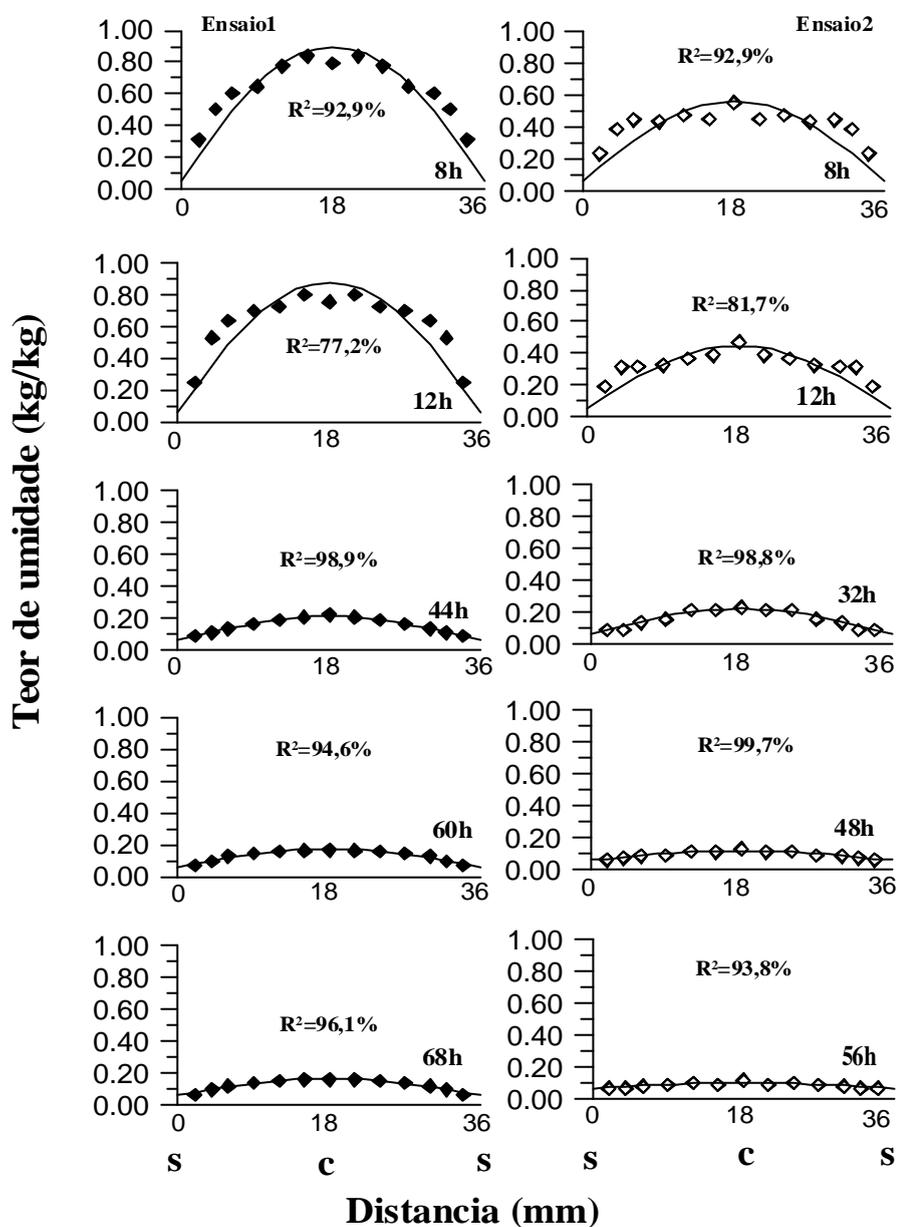
◆; ? Resultados deste estudo

— Modelo difusivo

s: superfície.

c: centro

FIGURA 24 - DADOS EXPERIMENTAIS E DO MODELO DIFUSIVO PARA O GRADIENTE DE UMIDADE (TEMPERATURA DE 60°C)



NOTAS:

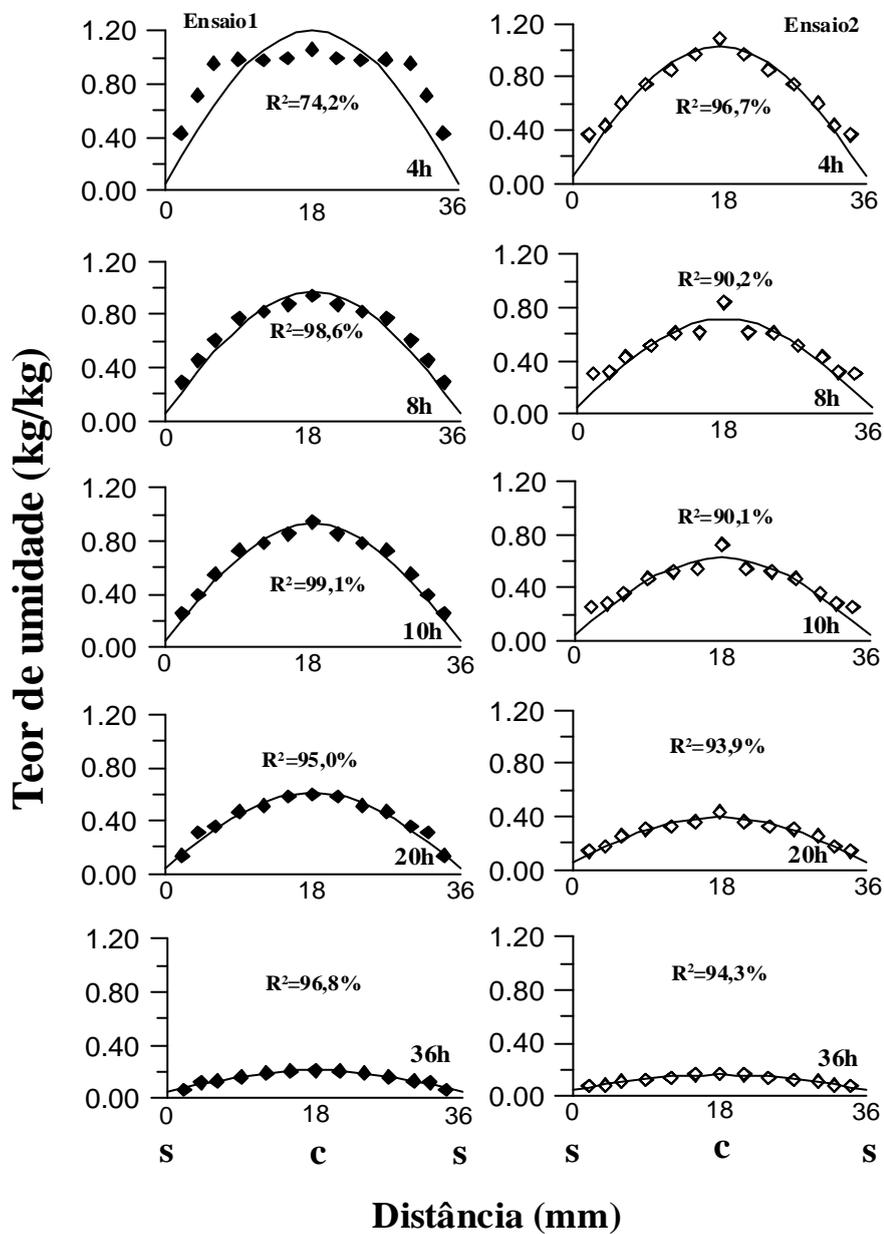
◆; ? Resultados deste estudo

— Modelo difusivo

s: superfície.

c: centro

FIGURA 25 - DADOS EXPERIMENTAIS E DO MODELO DIFUSIVO PARA O GRADIENTE DE UMIDADE (TEMPERATURA DE 80°C)



NOTAS:

◆; ? Resultados deste estudo

— Modelo difusivo

s: superfície.

c: centro

Ao analisar o comportamento dos perfis de umidade, observa-se que as curvas teóricas estão próximas das obtidas em base aos valores experimentais. As diferenças dependem em grande parte se a madeira está acima ou abaixo do ponto de saturação das fibras, sendo que no início da secagem o modelo tende a sobre-estimar o teor de umidade no centro da madeira, mas a medida que a umidade diminui as duas curvas se aproximam e a relação melhora.

PLUMB *et al.* 1985 aplicou um conjunto de equações que descrevem o transporte capilar e difusivo em madeira de *Pinus spp*, durante a secagem, como também a transferência de calor, identificando a mesma tendência apresentada neste estudo.

Pode-se observar que, a partir de um teor de umidade médio da tábua de 40%, as curvas teóricas e experimentais se aproximam, indicando que o modelo difusivo consegue explicar adequadamente os valores experimentais. Em certos casos o modelo difusivo não consegue interpretar totalmente os valores reais, apresentando valores de coeficiente de determinação abaixo de 80%, isto pode ser atribuído ao fato de que a função utilizada para ajustar os valores experimentais correspondeu a uma função polinomial que, em forma geral, permitiu uma melhor resposta aos valores experimentais. Do ponto de vista prático, de acordo com HUKKA (1999) isto não deve ser considerado um problema porque a aparência dos perfis de umidade resultantes é uma propriedade das funções utilizadas e não dos valores dos parâmetros determinados.

Outra provável fonte de erro está relacionada à flutuação da temperatura de secagem. Embora estas temperaturas tenham sido consideradas constantes (40°C, 60°C e 80°C), na realidade ocorreram flutuações, com variações entre 2 a 4°C dependendo da temperatura testada.

O teor de umidade na superfície da madeira, determinado pelo modelo em todos os ensaios, alcançou nas primeiras horas de secagem a umidade de equilíbrio de 7%, 6% e 5%, para as temperaturas de secagem estudadas. Isto é muito importante do ponto de vista das tensões de tração na superfície o que pode levar a formação de rachaduras superficiais nos primeiros estágios da secagem da madeira.

De acordo com KIRK *et al.* (1985), o teor de umidade na superfície da madeira desce já no início do processo de secagem a valores próximos ao valor de equilíbrio e a taxa de movimento de água passa a ser controlada inteiramente pela difusão interna em direção à superfície. Neste caso a resistência interna à transferência de massa aumenta e o teor de umidade na superfície passa a ser constante e próximo ao valor de umidade de equilíbrio do ambiente.

Corroborando com estes resultados HUKKA (1999) também constatou que o método de medição utilizado (das lâminas), não permitiu descrever com precisão o desenvolvimento do teor de umidade na superfície da madeira e que a umidade se aproximou do teor de umidade de equilíbrio logo no início da secagem. YEO *et al.* (2002a) indicam que a determinação do teor de umidade superficial é importante no estudo das tensões desenvolvidas e prevenção de fendas superficiais na madeira durante a secagem, entretanto métodos mais precisos para medir o teor de umidade superficial são necessários para melhorar a acuidade.

O gradiente de umidade na fase inicial de secagem, como pode ser observado nas figuras apresentadas, tende a ser plano, e nas fases posteriores tem tendência a parabólico. Isto indica, muito provavelmente, que esta madeira apresenta predominantemente um movimento de água capilar no início da secagem, o que está de acordo com o apresentado por HAWLEY (1931) citado por SIMPSON (1976) e por RICE e YOUNGS (1991), sobre os mecanismos de secagem na madeira, que apresenta a forma dos gradientes de umidade de madeiras com e sem movimento de água capilar.

De acordo com o exposto por este autor, os gradientes obtidos neste estudo representam uma madeira com movimento de água capilar. O resultado deste movimento é bem definido, apresentando perfis contínuos e com uma forma que se aproxima a uma parábola. Nenhuma linha úmida está presente e a água livre pode-se mover desde o centro antes que o centro alcance o ponto de saturação das fibras.

### 4.3.2 Modelagem da Perda de Umidade

O conhecimento do fluxo de umidade e dos gradientes de umidade faz possível deduzir o coeficiente de difusão, o qual como apresentado, variou com o teor de umidade da madeira e a temperatura de secagem. O coeficiente de difusão é de capital importância em modelos usados para determinar a perda de umidade da madeira durante o processo de secagem.

O coeficiente de difusão efetivo ( $D_{ef}$ , m<sup>2</sup>/s) obtido neste estudo para madeira de *Pinus elliottii* de 36mm de espessura em função da temperatura absoluta e o teor de umidade da madeira, é descrito por:

$$D_{ef} = 8.405,6e^{\left(\frac{-2.706,4}{273,15+T}\right)} (T_u)^{0,263} \quad 79$$

Onde:

T=temperatura de secagem, °C.

Tu= teor de umidade, kg água/kg m.s.

O modelo desenvolvido foi empregado para descrever a perda de umidade teórica da madeira e compará-las com os valores experimentais do estudo, considerando a umidade média das tábuas e das lâminas para as temperaturas de secagem estudadas.

A perda de umidade média dos ensaios para as diversas temperaturas pode ser observada na Figura 26. De uma forma geral o modelo tem um bom ajuste, e os resultados obtidos são próximos dos dados experimentais. Ao comparar as curvas resultantes do modelo difusivo com aqueles obtidos experimentalmente constatou-se que o modelo tem um melhor ajuste quando é utilizado o valor de teor de umidade médio das lâminas (Tabela 11).

De qualquer forma em ambos os casos, os valores do coeficiente de determinação são aceitáveis, e as diferenças encontradas estão associadas muito provavelmente a erros experimentais relacionados a duas formas distintas utilizadas na determinação do teor de umidade.

FIGURA 26 – CURVAS DE PERDA DE UMIDADE MÉDIA: COMPARAÇÃO ENTRE O MODELO DIFUSIVO E OS VALORES EXPERIMENTAIS

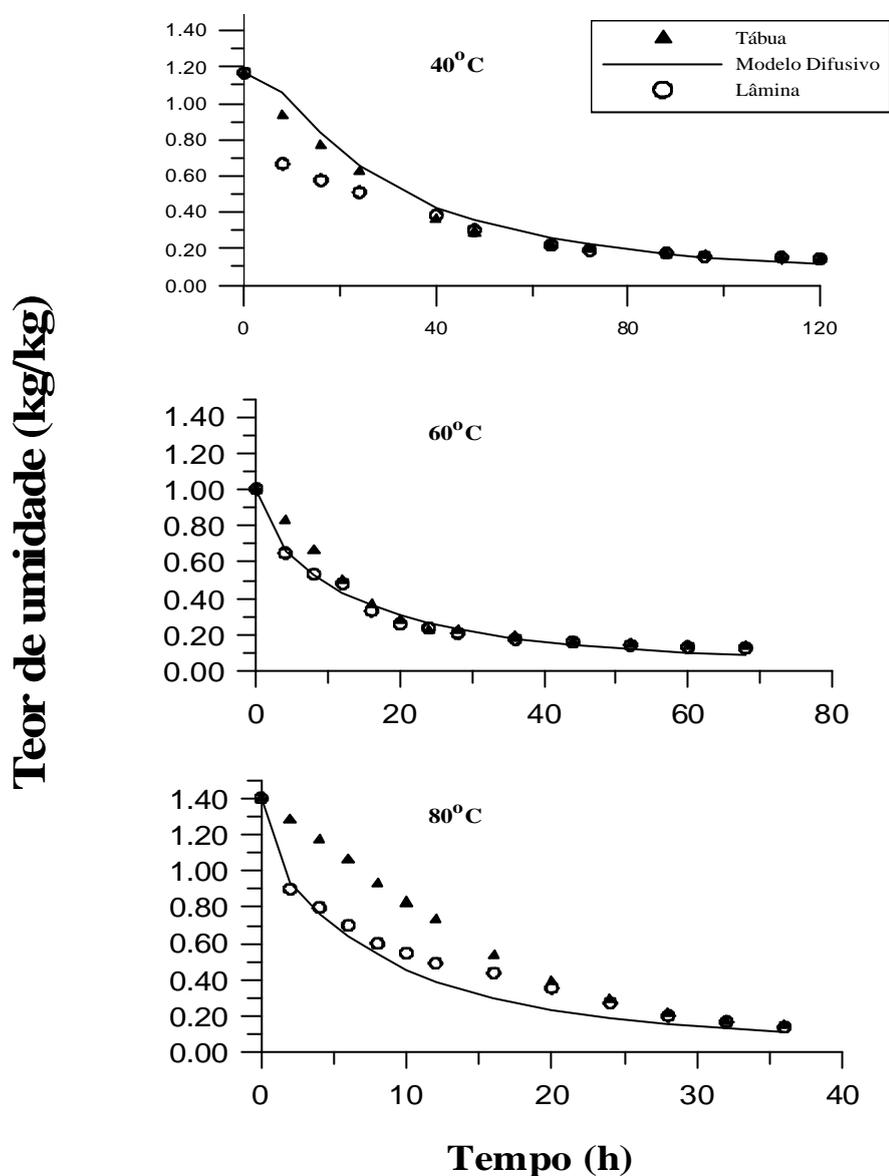


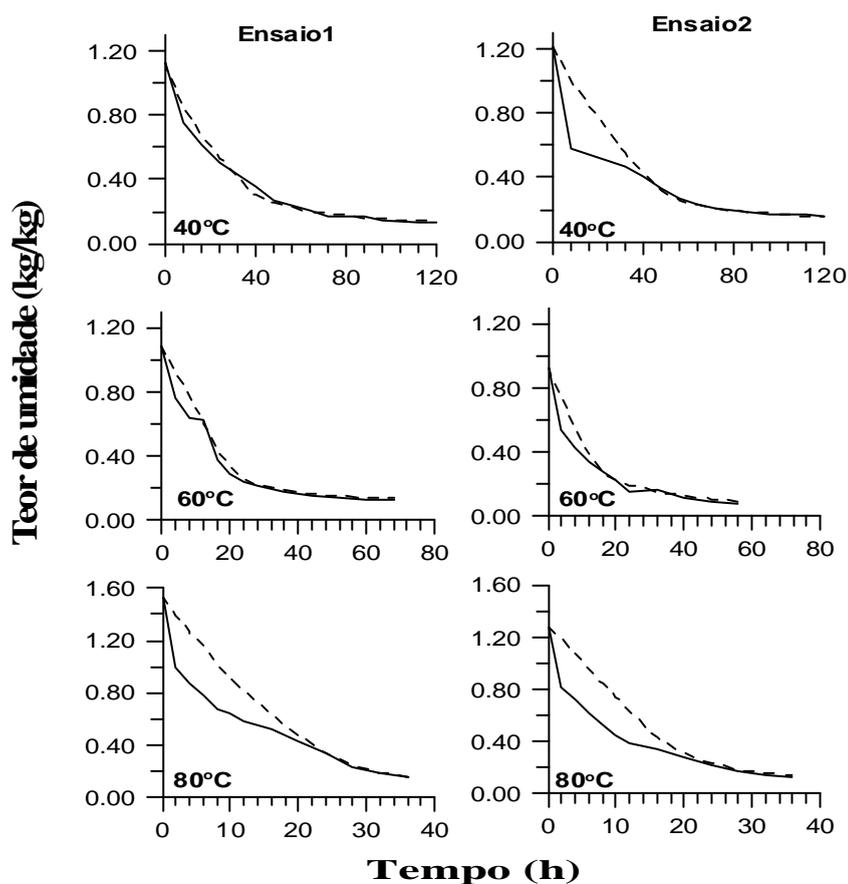
TABELA 11 - COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO PARA AS CURVAS DE SECAGEM OBTIDAS POR MEIO DO MODELO E OS VALORES EXPERIMENTAIS

MODELO DIFUSIVO			
Coeficiente de determinação			
Temperatura/Amostras	40°C	60°C	80°C
Tábua	98,7%	95,9%	86,2%
Lâmina	89,1%	98,8%	98,5%

As diferenças no teor de umidade, também, podem ser devidas a que o teor de umidade médio das tábuas controle foi determinado considerando a média aritmética das 7 lâminas cortadas na espessura da tábua e o teor de umidade da tábua considera o valor médio da peça completa.

A variação do teor de umidade entre estas duas formas de determinação ao longo do tempo pode ser observada na Figura 27. Como pode ser observado existe uma diferença entre os teores de umidade médios obtidos através das duas metodologias, sendo que de forma geral a diferença entre eles é maior quanto maior foi a temperatura de secagem e, em especial, quando o teor de umidade se encontrava acima de 40%.

FIGURA 27 - TEOR DE UMIDADE AO LONGO DO PROCESSO DE SECAGEM DETERMINADO POR MEIO DE DUAS METODOLOGIAS



NOTAS:

---- Teor de umidade médio da tabua

\_\_\_ Teor de umidade médio das lâminas.

Um fator importante que pode explicar a diferença entre os teores de umidade é que o teor de umidade médio foi determinado em um lugar pontual e pode não estar representando o teor de umidade de toda a tábua. Além disto existem evidências de que a diferença pode ter relação com a temperatura de secagem, pois a 80°C esta diferença se acentua. Este fato pode estar relacionado a erros experimentais gerados pela perda de umidade mais elevada nas lâminas de 2mm a 3mm de espessura, as quais por ter uma maior temperatura interna e, portanto, uma maior facilidade para perder umidade no intervalo entre a sua retirada e a pesagem.

A dificuldade no uso de lâminas está relacionada à heterogeneidade da madeira, e a umidade média das lâminas poderia ser superada se um grande número de medições fosse feito (CHRUSCIEL *et al.* 1999).

O método gravimétrico com a pesagem da tábua proporciona os valores mais precisos da umidade média; entretanto, quando se requer o conhecimento do gradiente de umidade, o método das lâminas é o necessário. Neste método, deve ser ainda observado que o material é destruído e, portanto, não é apropriado para medições contínuas (RESCH *et al.* 1989).

As dificuldades na determinação da variação do teor de umidade foram também identificadas por HUKKA (1999). Para este autor a variação no teor de umidade foi a mais importante fonte de erro durante o esfriamento das amostras e à necessidade de usar diferentes corpos de prova em diferentes tempos, indicando que um maior número de amostras obtidas simultaneamente aumentaria a precisão dos resultados.

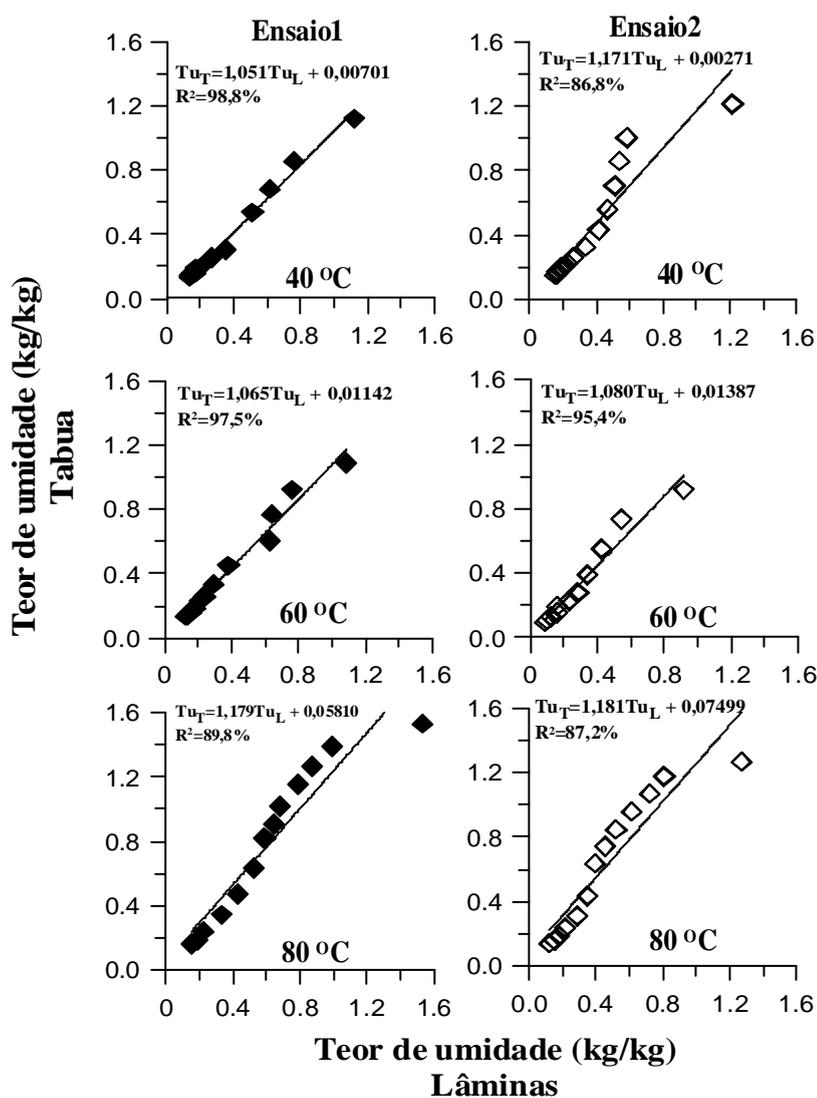
Mesmo que ocorram erros experimentais a análise indica que existe uma boa correlação entre o teor de umidade das lâminas e o teor de umidade médio da tábua. Como pode ser observado na Figura 28, em geral os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) obtidos são elevados.

Analisando-se em maior detalhe, observa-se que a variação está relacionada em grande parte ao teor de umidade. Em geral maiores diferenças são obtidas a teores de umidade acima do ponto de saturação das fibras, quando a taxa de secagem é mais elevada, especialmente para as temperaturas de secagem mais altas. Abaixo do ponto

de saturação das fibras, onde o movimento da água é mais lento, praticamente a diferença entre os dois métodos foi mínima.

Os resultados deste estudo indicam que, o modelo difusivo representa adequadamente os valores experimentais, permitindo prever a distribuição do teor de umidade interno da madeira ao longo da secagem para a madeira de *Pinus elliottii*, dentro da faixa de temperaturas empregadas no experimento. Além disso, é importante notar que o modelo desenvolvido é relativamente simples, o que facilita a sua aplicação.

FIGURA 28 - CORRELAÇÃO ENTRE O TEOR DE UMIDADE MÉDIO DA TÁBUA ( $Tu_T$ ) E DAS LÂMINAS ( $Tu_L$ ) PARA AS TEMPERATURAS TESTADAS



#### 4.3.3 Modelagem da Transferência de Calor

A evolução da temperatura interna das tábuas de *Pinus taeda* durante o aquecimento de madeira foi obtida através de medições experimentais e comparadas com o modelo desenvolvido neste estudo com base em Fourier. O material utilizado foram tábuas de 46mm de espessura com um teor de umidade médio de 70,6% e uma densidade básica média de  $396 \text{ kg/m}^3$  para madeira próxima da medula (madeira juvenil), e uma umidade de 125,7% com uma densidade básica média de  $427 \text{ kg/m}^3$ , para madeira próxima da casca (madeira adulta). No Anexo-3, podem-se observar as propriedades físicas de cada amostra utilizada neste ensaio.

Os resultados obtidos, considerando três temperaturas de aquecimento ( $40^\circ\text{C}$ ,  $60^\circ\text{C}$  e  $80^\circ\text{C}$ ) e três velocidades do ar (3,5m/s, 4,7m/s, 6,8m/s) são apresentados nas Figura 29 (material próximo da medula) e a Figura 30 (material próximo da casca).

A análise da informação apresentada indica que, para o ar escoando no interior da câmara às temperaturas de  $40^\circ\text{C}$  e  $60^\circ\text{C}$ , a solução do modelo de Fourier explica bem os dados experimentais, quando se considera um número de Biot tendendo a infinito. Entretanto, para a temperatura de  $80^\circ\text{C}$ , a curva do modelo com Biot finito e o Biot tendendo ao infinito, encontram-se entre os valores experimentais, sendo que o primeiro está abaixo do experimental e o segundo acima destes valores.

Segundo LUIKOV (1968), o número de Biot define um rol essencial na determinação do perfil de temperatura de um sólido, podendo ser interpretado como a razão entre a resistência interna no sólido, representada pela condutividade térmica da madeira e a resistência convectiva do fluxo de calor na superfície, representado pelo coeficiente convectivo de calor. Desta forma pode-se indicar que, quando o número de Biot é muito grande, a resistência interna do material é bem maior que a resistência convectiva, definindo a velocidade de aquecimento.

Entretanto, se o número de Biot for muito pequeno, o gradiente interno deve ser pequeno em comparação com a diferença de temperatura externa, e a transferência de calor pode ser então controlada, sobretudo, pela transferência convectiva de calor na superfície. Quando o número de Biot for menor que 0,1, significa que o corpo possui uma resistência interna desprezível ao fluxo de calor (SISSON; PITTS, 2001).

FIGURA 29 - TEMPERATURA NO CENTRO DA TÁBUA PARA MADEIRA COM UM TEOR DE UMIDADE MÉDIO DE 70,6% (PRÓXIMO A MEDULA)

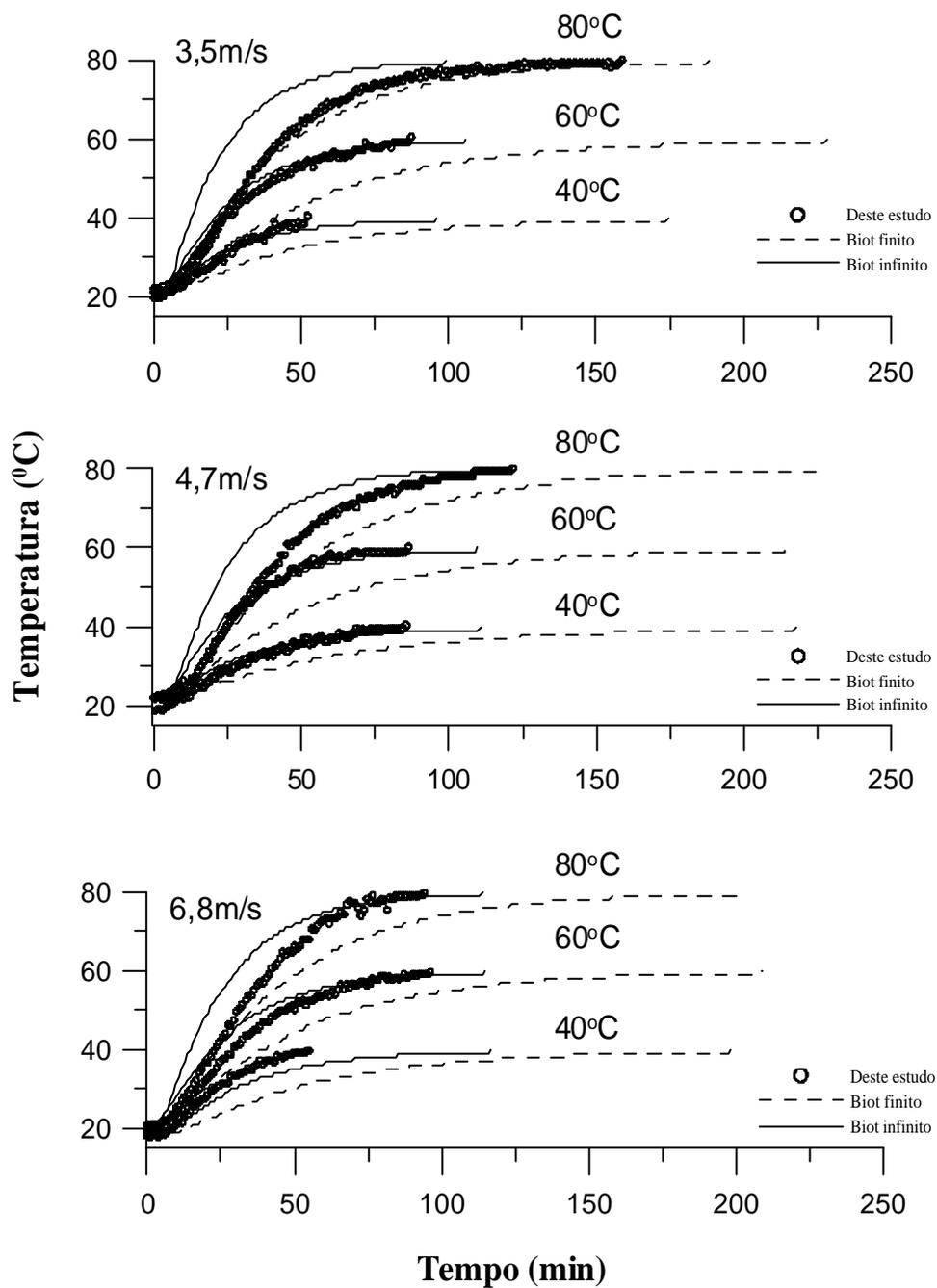
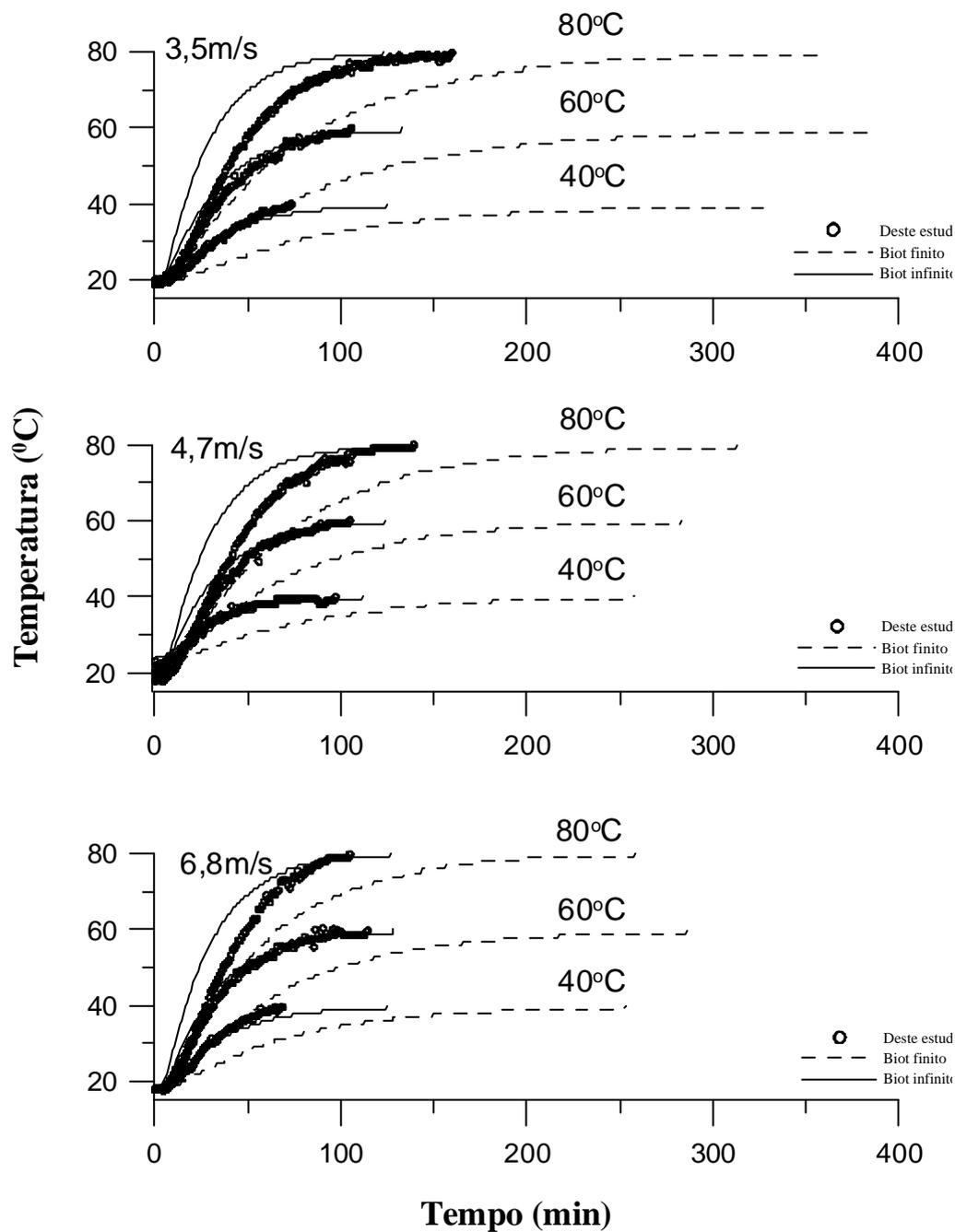


FIGURA 30 - TEMPERATURA NO CENTRO DA TÁBUA PARA MADEIRA COM UM TEOR DE UMIDADE MÉDIO DE 125,7% (PRÓXIMO A CASCA)



Os resultados deste estudo podem ser comparados com os obtidos por ZIELONKA e GIERLIK (1999). Estes autores compararam a distribuição teórica e experimental da temperatura interna da madeira de *Metzgeria leptoneura* com 60mm de espessura e teor de umidade de 10% a 14%, aquecidas através de um processo de convecção e por microondas, aquecidas a uma temperatura de 98°C. O estudo concluiu que a solução da equação de condução de calor com base em Fourier descreve adequadamente o aquecimento na secagem convencional e por microonda.

Na Tabela 12, é apresentado o tempo de aquecimento, a temperatura inicial da madeira para as várias amostras testadas nas três temperaturas utilizadas neste ensaio.

Como pode ser observado a temperatura inicial da madeira flutuou entre 18 e 23 °C e o tempo de aquecimento experimental entre 53 e 162 min, correspondendo a um número de Fourier (tempo adimensional) entre 0,8 e 3,3.

Adicionalmente pode-se observar que em geral os tempos de aquecimento experimentais ( $t_e$ ) em cada temperatura são próximos entre eles, tanto para madeiras com um teor de umidade médio inicial de 70,6% (próximo da medula) como para as madeiras com um teor de umidade médio inicial de 125,7% (próximo da casca).

Os tempos de aquecimento obtidos neste estudo para as diferentes temperaturas podem ser comparados com o estudo realizado por MACLEAN (1952) citado por SIAU (1984). MACLEAN obteve um tempo de aquecimento de 120min para que o centro de uma peça de madeira de 50mm de espessura fosse aquecida de uma temperatura de 15,5°C até a temperatura do ar de 93,3°C.

BAI e GARRAHAN (1984) determinaram o tempo de aquecimento da madeira de *Pinus resinosa* Soland e *Betula papyrifera* verde com uma espessura de 51mm. Para a madeira de *Betula papyrifera*, com um teor de umidade inicial de 73,3%, os autores identificaram que foi necessário um tempo de aquecimento de 180min para que a temperatura inicial de 5,9 °C chegasse a 56,1°C. O mesmo tempo foi requerido para *Pinus resinosa* Soland com um teor de umidade inicial de 67,1% com uma temperatura inicial de 23,5°C e final de 99,7°C, mantendo-se constantes as condições do ar a 100% de umidade relativa, temperatura do ar de 100°C e velocidade do ar de 2 m/s.

TABELA 12 - TEMPERATURA E TEMPO TOTAL DE AQUECIMENTO NO INTERIOR DA MADEIRA DE *PINUS TAEDA* L.

AMOSTRA  Código	TEMPERATURA DE AQUECIMENTO °C		TEMPO DE AQUECIMENTO					
	T <sub>ar</sub>	T <sub>i</sub>	Minutos			Adimensional		
			t <sub>e</sub>	t <sub>m</sub>	t <sub>Bi</sub>	F <sub>o</sub>	F <sub>m</sub>	F <sub>mBi</sub>
1J	40	21	53	178	98	0,8	2,8	1,6
2J	40	22	88	222	113	1,2	3,0	1,5
3J	40	18	56	202	119	0,8	2,8	1,6
4J	60	22	89	233	108	1,5	4,0	1,9
5J	60	22	88	219	112	1,5	3,6	1,9
6J	60	21	98	213	117	1,6	3,4	1,9
7J	80	20	162	192	101	3,3	3,9	2,1
8J	80	19	124	231	114	2,3	4,2	2,1
9J	80	20	98	206	116	1,7	3,6	2,1
Média		21	95	211	111	1,6	3,5	1,8
1A	40	19	75	336	128	0,9	4,2	1,6
2A	40	23	99	262	114	1,3	3,5	1,5
3A	40	18	70	258	127	0,9	3,3	1,6
4A	60	20	109	393	138	1,5	5,4	1,9
5A	60	20	107	289	112	1,6	4,3	1,7
6A	60	18	117	292	131	1,7	4,2	1,9
7A	80	19	160	366	128	2,6	6,0	2,1
8A	80	18	142	329	129	2,3	5,3	2,1
9A	80	18	107	265	129	1,7	4,2	2,1
Média		19	116	313	128	1,8	4,7	1,9

## NOTAS:

T<sub>ar</sub>: Temperatura de aquecimento.

T<sub>i</sub>: Temperatura inicial da madeira.

t<sub>e</sub>, F<sub>o</sub>: Tempo de aquecimento experimental e adimensional.

t<sub>m</sub>, F<sub>m</sub>: Tempo de aquecimento calculado pelo modelo e adimensional, considerando Bi finito.

t<sub>Bi</sub>, F<sub>mBi</sub>: Tempo de aquecimento calculado pelo modelo e adimensional, considerando Bi infinito.

J: Madeira próximo da medula com teor de umidade inicial médio de 70,6%.

A: Madeira próximo da casca com um teor de umidade médio de 125,7%.

Em geral, quando se compara o tempo de aquecimento entre as duas madeiras, as próximas da medula (teor de umidade de 70,6%) com as próximas da casca (teor de umidade de 125,7%). Verificou-se que as madeiras com um teor de umidade médio de 125,7% precisam de um 23,9% de tempo adicional para alcançar a temperatura de 40<sup>o</sup>C, 21,1% para alcançar a temperatura de 60<sup>o</sup>C e de 6,5% para a temperatura de 80<sup>o</sup>C.

Este aumento no tempo de aquecimento está relacionado, à maior quantidade de água que está presente nas peças originadas próximo à casca, que apresentam um maior teor de umidade. Com maior teor de umidade apresenta um maior calor específico e, como essa propriedade representa uma medida da energia requerida para alcançar uma dada temperatura no material, o tempo de aquecimento aumenta. Para SIMPSON (1991), WOOD HANDBOOK, (1999) a velocidade de aquecimento depende da temperatura e do teor de umidade da madeira, e é praticamente independente da densidade ou da espécie.

Conforme descrito na metodologia, os testes experimentais de aquecimento da madeira de *Pinus taeda* foram feitos numa umidade relativa de 100%, evitando-se desta forma a transferência de massa durante o período de aquecimento. SIMPSON (1976) afirma que o aquecimento da madeira nesta condição não altera significativamente o teor de umidade. Este fato foi também comprovado por ROZAS (1993), que constatou uma redução de 2,4% a 3% no teor de umidade inicial da madeira de *Eucalyptus grandis*, quando vaporizada a 100<sup>o</sup>C e 100% de umidade relativa por um período de 2 horas.

Entretanto, HOU *et al.* (2002), reportaram um aumento do teor de umidade inicial da madeira durante o aquecimento. Este resultado foi obtido de forma teórica através de uma formulação matemática que descrever o fluxo de massa e calor bidimensional da madeira. Os autores encontraram um aumento do teor de umidade inicial de 0,72% a 0,79% para 60<sup>o</sup>C e de 2,45% a 2,68% para 80<sup>o</sup>C, num tempo de aquecimento entre 1,0h e 2,5h. Concluíram, também, que uma madeira de 4 cm de espessura levaria 3 horas para alcançar a temperatura ambiente no centro da peça.

Nas Figuras 31 e 32, são apresentados gráficos que indicam o efeito da velocidade do ar na evolução da temperatura interna (centro) das madeiras submetidas a diferentes temperaturas e velocidades do ar para as amostras com um teor de umidade inicial de 125,7% e 70,6%, respectivamente.

FIGURA 31 – EFEITO DA VELOCIDADE DO AR NA TEMPERATURA NO CENTRO DA PEÇA PARA O TEOR DE UMIDADE INICIAL MÉDIO DE 70,6%.

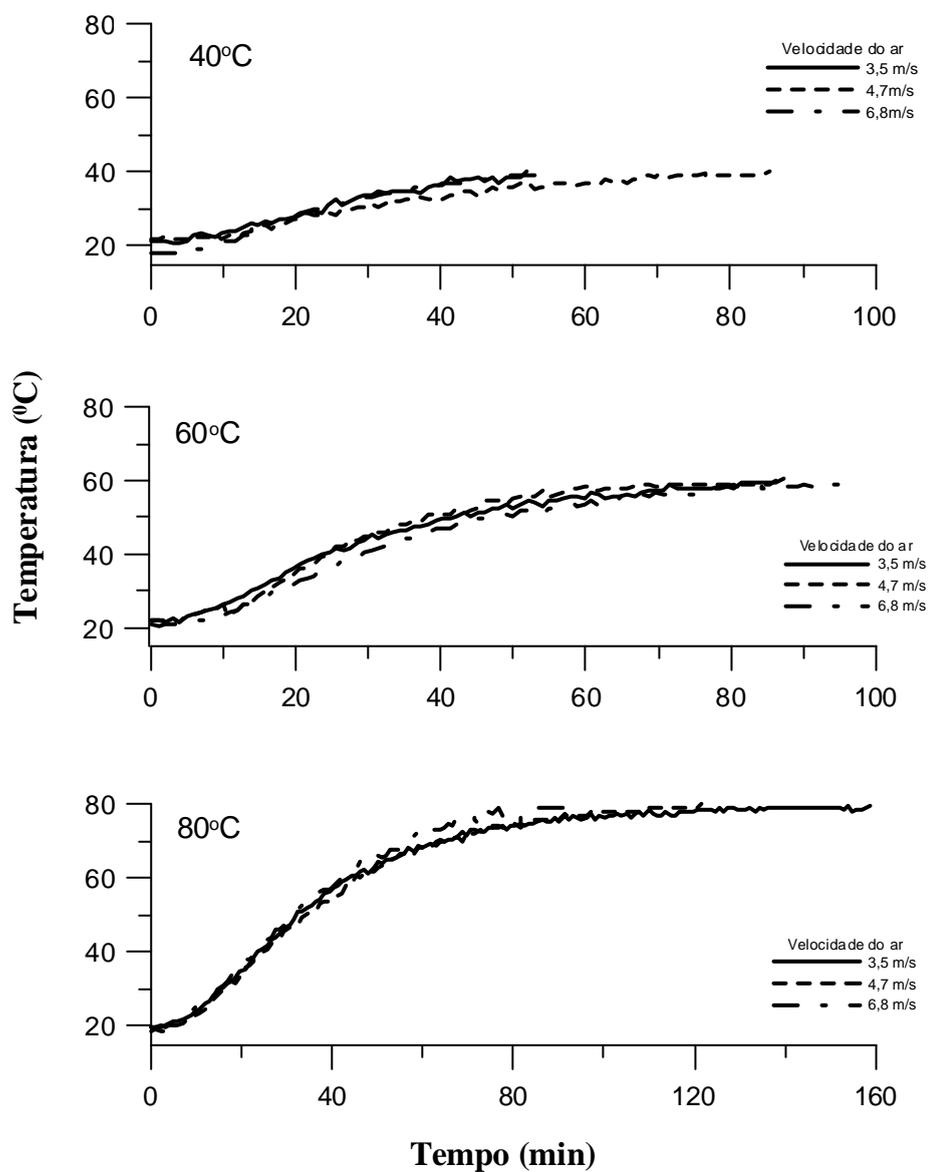
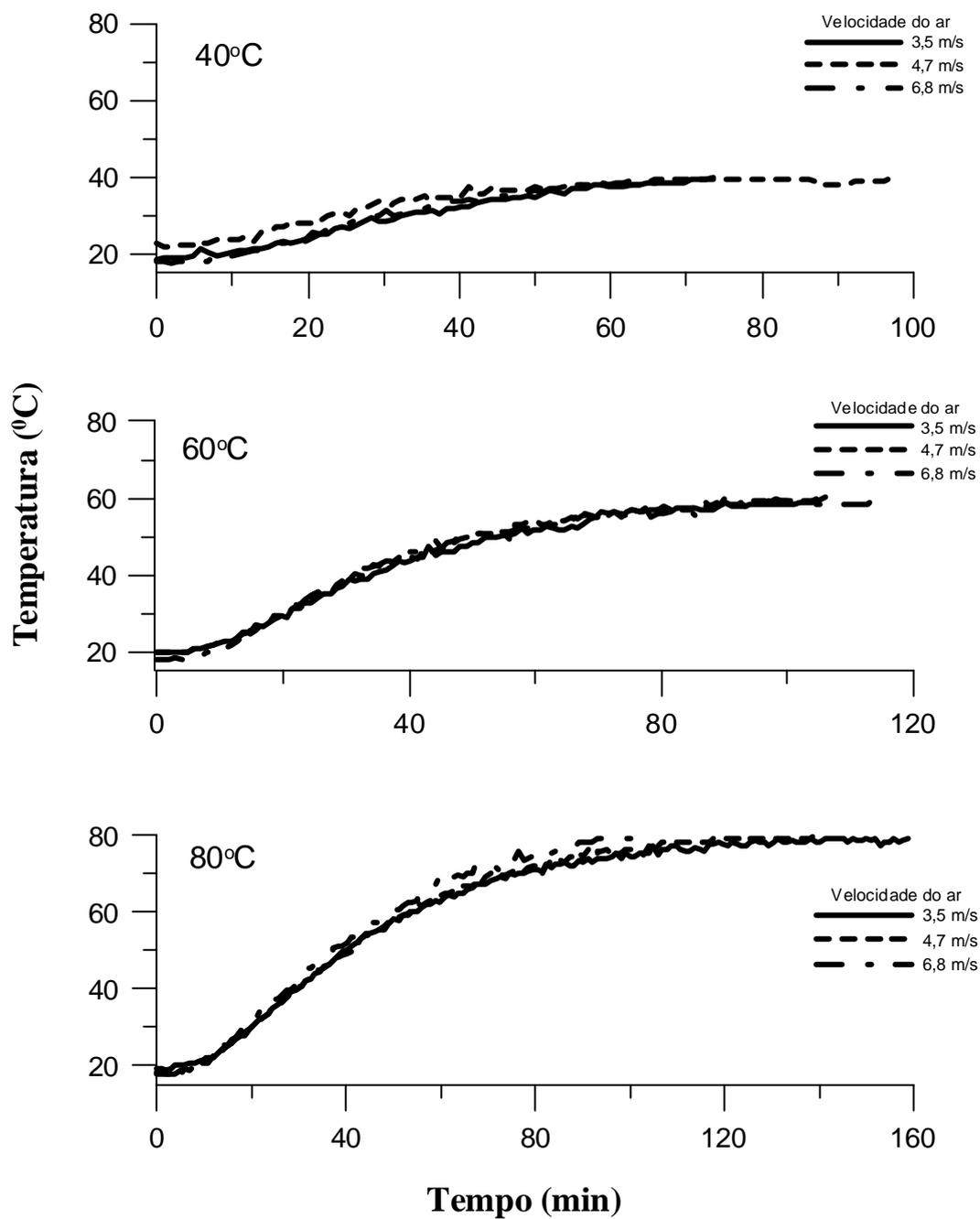


FIGURA 32 - EFEITO DA VELOCIDADE DO AR NA TEMPERATURA NO CENTRO DA PEÇA PARA O TEOR DE UMIDADE INICIAL MÉDIO DE 125,7%



Como pode ser observado o padrão de aquecimento permaneceu homogêneo, indicando que a velocidade do ar a qualquer que seja a temperatura de aquecimento, tem pouca ou nenhuma influência na temperatura interna medida no centro da peça. Isto se aplica tanto para madeiras com um teor de umidade inicial mais baixo (70,6%) quanto mais alto (125,7%).

Com base nestes resultados fica evidente que a velocidade do ar não interfere de forma significativa no processo de aquecimento e pode-se concluir que, na faixa de velocidades utilizadas (3,5m/s, 4,7m/s e 6,8m/s), é inútil aumentar a vazão de ar durante o período de aquecimento da madeira, pois a condutividade na madeira é a resistência dominante (indicado pelo número de Biot no infinito). Isto significa que não adianta aumentar a velocidade do ar, ou a turbulência do fluido, para aumentar o coeficiente convectivo (KREITH, 1977).

BAI e GARRAHAN (1984) e STAVROS e OLIVEIRA (1993), durante o aquecimento utilizaram velocidades do ar entre 2,0m/s e 2,5m/s, respectivamente. O estudo indicou que, durante o aquecimento da madeira e durante os tratamentos com vapor para recuperação do colapso e condicionamento, se poderia utilizar uma velocidade do ar o mais baixa possível, permitindo com isto reduzir os custos relacionados ao consumo de energia durante o processo de secagem da madeira.

De acordo à discussão geral relativa a esta parte do estudo pode-se indicar que o modelo baseado em Fourier permite descrever a evolução da temperatura no interior da madeira durante o processo de aquecimento.

#### 4.4 APLICAÇÃO DO MODELO

Como uma forma de validar o modelo difusivo desenvolvido no controle do processo de secagem, foram utilizados os gradientes de umidade determinados no momento em que as tábuas apresentaram rachaduras superficiais.

Nas Figuras 33 e 34, podem-se observar os perfis de umidade quando da ocorrência de rachadura superficial em peças secas às temperaturas de 60°C e 80°C.

As informações apresentadas confirmam que o modelo difusivo desenvolvido para este estudo permite prever os gradientes de umidade no momento que as

rachaduras surgem e indica que o modelo tem aplicações práticas importantes no desenvolvimento e controle do processo de secagem.

FIGURA 33 - PERFIL DE UMIDADE NO MOMENTO DO APARECIMENTO DAS RACHADURAS NA TEMPERATURA 60°C

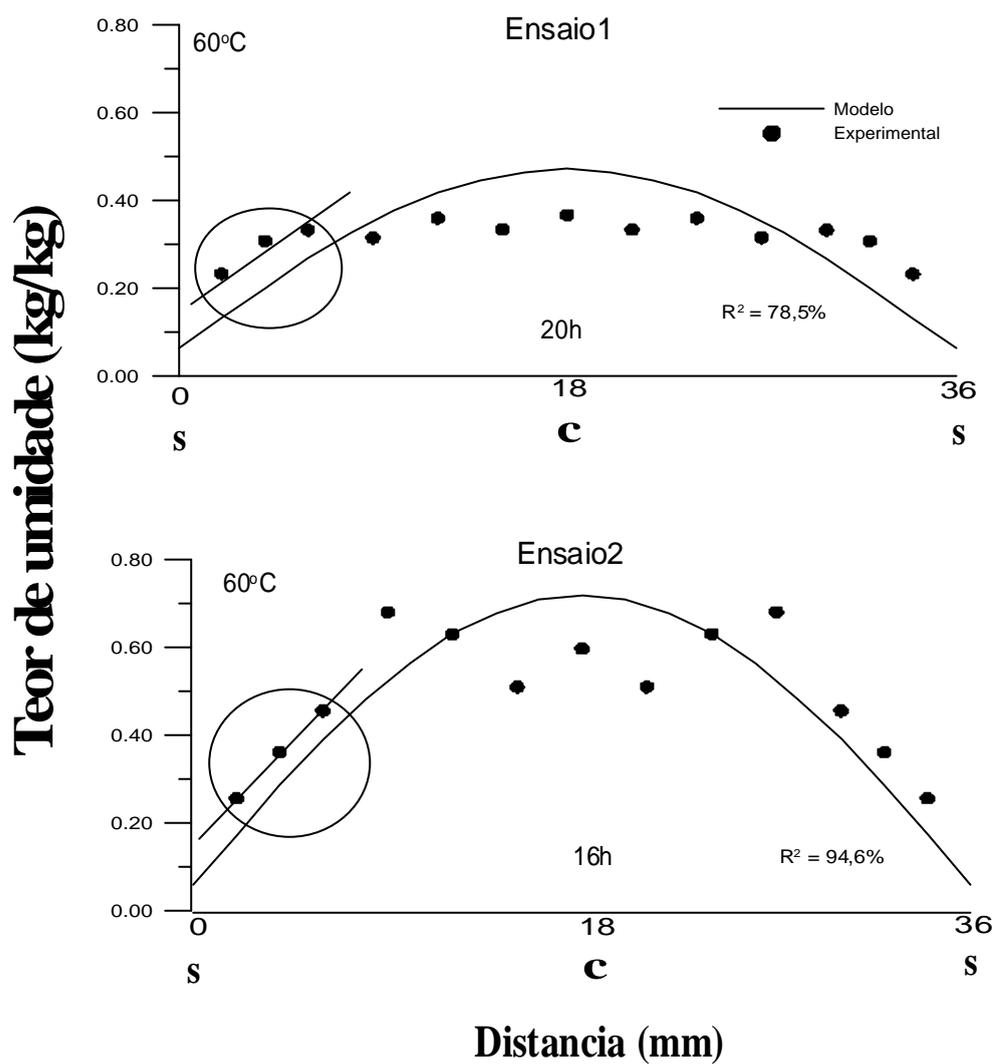
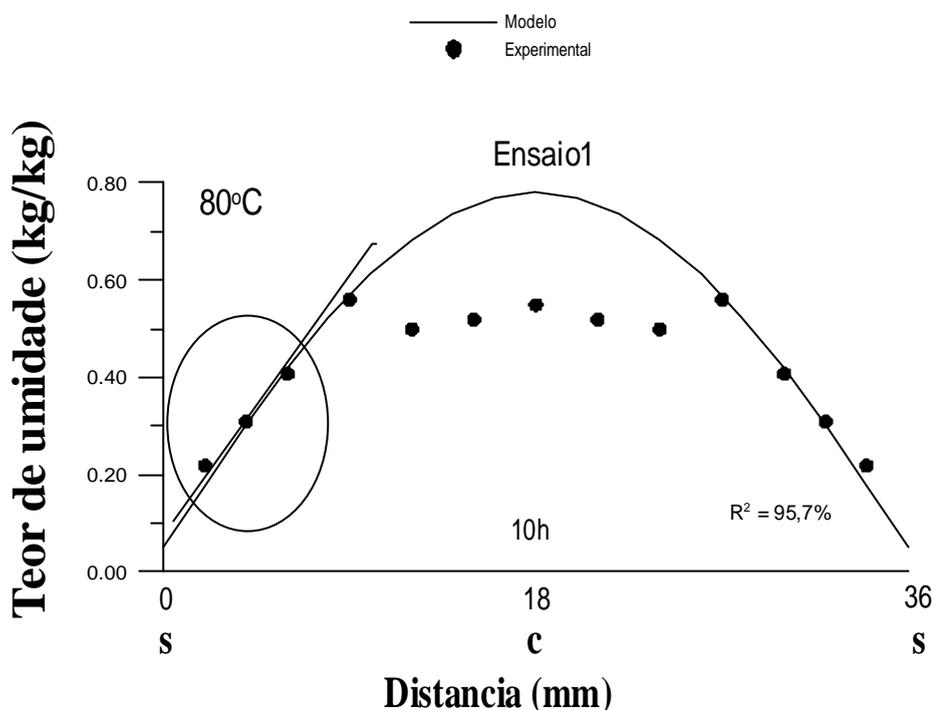


FIGURA 34 - PERFIL DE UMIDADE NO MOMENTO DO APARECIMENTO DAS RACHADURAS NA TEMPERATURA 80°C



Como se pode observar nos gráficos, o modelo, em geral superestima o valor do teor de umidade no centro da madeira; no entanto, na parte mais próxima à superfície (marcado com um círculo), o modelo difusivo desenvolvido pode adequadamente prever os gradientes de umidade, principalmente nos primeiros 6mm desde a superfície na espessura da tábua. Este resultado do modelo desenvolvido é muito relevante, pois se os gradientes de umidade da madeira podem ser determinados com antecedência, então a possibilidade de ocorrer rachaduras superficiais podem ser antecipadas. Isto permite corrigir o processo e, conseqüentemente, mitigar defeitos durante o processo de secagem.

Como um dos principais problemas do processo de secagem são as rachaduras superficiais, segundo PLUMB *et al.* (1985) a habilidade de um modelo numérico para prever a distribuição de umidade na espessura da madeira é de grande interesse, pois gradientes de umidade excessivos podem causar fendas e empenamentos. Desta forma,

as condições de secagem podem ser controladas para prevenir os defeitos de secagem (RESCH *et al.* 1989).

De acordo com NOTHWAY *et al.* (1994), os modelos matemáticos permitem modelar, prever os gradientes de umidade e os esforços de secagem como um amplo intervalo das características da madeira a ser seca. Assim sendo, um sistema de controle inteligente pode então prever o comportamento de toda a carga de madeira no secador, fazendo mudanças nas condições de secagem para alcançar um nível de degradação aceitável ao produto final, considerando principalmente as rachaduras internas e superficiais, que limitam o uso da madeira para produtos de alto valor agregado.

Ainda segundo LANGRISH e BOHM (1997), o conhecimento dos mecanismos de movimento de umidade na madeira é relevante para prever a taxa na qual as tábuas secam e também para prever os esforços de secagem, os quais se desenvolvem na madeira durante a secagem. Estes esforços ocorrem devido à existência de uma contração diferencial entre a superfície e o centro da madeira (causada pelo gradiente de umidade) e podem ser suficientemente elevados para causar rachaduras, levando a degradar a qualidade da madeira. Da mesma forma, YEO *et al.* (2002a), indicam que a determinação do teor de umidade superficial é importante no estudo das tensões desenvolvidas e prevenção de fendas superficiais na madeira durante a secagem.

Na Tabela 13 pode-se observar o teor de umidade inicial médio da tábua e o teor de umidade médio no momento que surgiram as fendas superficiais para as duas temperaturas de secagem de 60°C e 80°C. Os dados obtidos indicam que existe uma correlação entre o teor de umidade inicial da tábua e a umidade média no momento que ocorrem as rachaduras.

Os dados apresentados indicam que os teores de umidade médios das tábuas quando acontecem as rachaduras, estavam acima do ponto de saturação das fibras. De acordo com JANKOWSKY (1990), as rachaduras superficiais podem aparecer quando as condições são muito severas, isto é, baixas umidades relativas provocando a rápida secagem das camadas superficiais até valores inferiores no ponto de saturação das

fibras, enquanto as camadas internas estão ainda com mais de 30% de umidade. Desta forma, a umidade média, como aconteceu neste experimento é em geral maior que o PSF.

TABELA 13 - TEOR DE UMIDADE MÉDIO DAS AMOSTRAS COM RACHADURAS SUPERFICIAIS

AMOSTRAS	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (h)	Tu <sub>i</sub> (kg/kg)	TU <sub>g</sub> (kg/kg)
1	60	16	1,024	0,351
2		16	0,919	0,278
3		16	1,481	0,577
4		20	1,058	0,339
5		20	1,087	0,336
6		20	1,075	0,331
7	80	10	1,421	0,790
8		10	1,532	0,910
9		10	1,120	0,638

NOTAS:

Tu<sub>g</sub>: teor de umidade médio da tábua quando ocorre rachadura superficial, kg/kg.

Tu<sub>i</sub>: teor de umidade médio inicial da tábua, kg/kg.

Ao aplicar uma regressão múltipla às variáveis densidade básica, teor de umidade inicial, temperatura e teor de umidade final para determinar o peso que cada uma destas variáveis tem sobre o tempo de secagem, constatou-se que quando se considera o efeito da temperatura e do teor de umidade inicial, o coeficiente de determinação correspondeu a 97,6% e um erro absoluto de 2,5 (Equação 82). Isto indica que essas duas variáveis são as mais importantes no controle da formação das rachaduras superficiais.

O modelo linear pode ser observado a seguir:

$$Tu_g = -128,456 + 1,661T + 0,560Tu_i$$

Onde:

$Tu_g$ : teor de umidade médio da tábua quando ocorre rachadura superficial, %.

$Tu_i$ : teor de umidade médio inicial da tábua, %.

T: temperatura de secagem dentro da câmara, °c.

Os resultados, portanto indicam claramente que é possível utilizar o modelo difusivo para prever os gradientes de umidade em madeira de *Pinus elliottii*, com isto ter uma indicação de quando inicia o processo de formação das rachaduras superficiais. Conforme a literatura as rachaduras são o principal problema no processo de secagem e a mitigação do problema pode ser alcançada com a otimização dos programas de secagem (HUKKA, 1999).

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

De uma maneira geral com base nos resultados alcançados, conclui-se que a metodologia adotada neste estudo foi apropriada, e que os objetivos estabelecidos foram atingidos.

No relativo à base teórica adotada no desenvolvimento deste estudo foi identificado que:

a) O coeficiente convectivo de calor pode ser obtido do número de Nusselt, considerando um fluxo ao longo de um duto de seção retangular, baseado no diâmetro hidráulico.

b) Os coeficientes convectivos de calor e de massa, podem ser determinados por meio da analogia Chilton-Colburn.

No relativo aos objetivos estabelecidos conclui-se, com base nos resultados obtidos, que os modelos matemáticos podem ser um instrumento importante para melhorar o processo de secagem de madeiras serradas e, com isto, reduzir perdas devido a rachaduras superficiais. Mais especificamente, os resultados deste estudo indicam que:

c) O modelo baseado na Lei de Fourier é adequado para prever o tempo de aquecimento da madeira serrada de *Pinus taeda*.

d) O modelo baseado na segunda Lei de Fick, é adequado para prever os gradientes de umidade e a taxa de perda de umidade durante o processo de secagem.

e) As análises realizadas também indicam que os modelos podem ser aplicados para outras espécies e/ou tipos de madeira. Para tal deve ser adequadamente considerados os coeficientes e propriedades específicas do material em secagem.

f) Fica claro que o gradiente de umidade gerado pelo modelo difusivo pode ser utilizado para prever a formação de rachaduras na superfície das tábuas. Desta forma o modelo tem grandes aplicações práticas no controle do processo, visando a mitigação dos defeitos de secagem.

Considerando os resultados deste estudo recomenda-se a realização de novos ensaios para testar e aprimorar a aplicação do modelo proposto no controle dinâmico do processo de secagem. O objetivo destes estudos complementares será desenvolver tecnologia para aplicação dos gradientes de umidade definidos pelo modelo na prevenção de rachaduras superficiais de madeira serrada, com ganhos em termos de custos e qualidade do produto. Podendo ser utilizado para o controle dos gradientes de umidades medidores elétricos.

## 6 REFERÊNCIAS

AVRAMIDIS, S.; SIAU, J.F. An investigation of the external and internal resistance to moisture diffusion in wood. **Wood Science and Technology**, New York, v.21, p.249-256, 1987.

AVRAMIDIS, S.; KURODA, N.; SIAU, J.F. Experiments in nonisothermal diffusion of moisture in wood. Part II. **Wood and Fiber Science**, Madison, v.19, n.4, p.407-413, 1987.

AVRAMIDIS, S.; OLIVEIRA, L. Influence of pre-steaming on kiln drying of thick hem-fir lumber. **Forest Products Journal**, Madison, v.43, n.11/12, p.7-12, 1993.

AVRAMIDIS, S.; HATZIKIRIAKOS, S.G.; SIAU, J.F. An irreversible thermodynamics model unsteady-state nonisothermal moisture diffusion in wood. **Wood Science and Technology**, New York, v.28, p.349-358, 1994.

BAI, G.L.; GARRAHAN, P. The temperature and moisture content in lumber during preheating and drying. **Wood Science and Technology**, New York, v.18, p.121-135, 1984.

BABBIT, J.D. More on application of Fick's Laws. **Wood Science**, Madison, v.9, n.4, p.149-153, 1977.

BEJAN, A. **Convection heat transfer**. New York: J. Wiley, 2004. 530 p.

BIGGERSTAFF, T. Drying diffusion coefficients in wood: How affected by temperature. **Forest Products Journal**, Madison, p.127-133, 1965.

BRAMHALL, G. Evaporation Rate During "First Stage" of Lumber Drying. **Wood Science**, Madison, v.8, n.1, p.368-369, 1975.

BRAMHALL, G.; WELLWOOD, R.W. Kiln drying of western Canadian lumber. **Information Report, VP-X**, Vancouver, n.156, p1-111, 1976.

BRAMHALL, G. Fick Laws and bound-water diffusion. **Wood Science**, Madison, v.8, n.3, p.154-161, 1976a.

BRAMHALL, G. Semi-empirical method to calculate kiln-schedule modifications for some lumber species. **Wood Science**, Madison, v.8, n.4, p.213-223, 1976b.

BRAMHALL, G.; MACKAY, J.F.G.; SALOMON, M. Kiln drying of timber: Fifteen questions and answers **Information Report, VP-X**, Vancouver, n.161, p.1-17, 1978.

BRAMHALL, G. Mathematical model for lumber drying. I. Principles involved. **Wood Science**, Madison, v.1, n.12, p.14-21, 1979a.

BRAMHALL, G. Mathematical model for lumber drying. II. The model. **Wood Science**, Madison, v.1, n.12, p.22-31, 1979b.

BRAMHALL, G. Sorption diffusion in wood. **Wood Science**, Madison, v.12, n.1, p.3-13, 1979c.

BRAMHALL, G. Diffusion and drying wood. **Wood Science and Technology**, New York, v.29, p.209-215, 1995.

BROWN, N.C.; BETHEL, J.S. El secado de la madera. In: \_\_\_\_\_. **La industria maderera**. México: Limusa, 1975. p. 179-234.

BUI, X.; CHOONG, T.E.; RUDD, G.W. Numerical methods for solving the equation for diffusion through wood during drying. **Wood Science**, Madison, v.13, n.2, p.117-121, 1980.

CECH, M.Y.; PFAFF, F. **Kiln operators manual to the Eastern Canada**. Ontario: Eastern Forest Product Lab., 1977. 189 p.

CHEN, P.; PEI, D.C.T. A mathematical model of drying processes. **International Journal Heat Mass Transfer**, Oxford, v.32, n.2, p.97-310, 1989.

CHEN, J.; CHOOG, T.E.; WETZEL, M.D. Optimum average diffusion coefficient: an objective index in description of wood drying data. **Wood and Fiber Science**, Madison, v.26, n.3, p.412-420, 1994.

CHEN, J.; CHOOG, T.E.; WETZEL, M.D. Evaluation of diffusion coefficients and surface emission coefficient by an optimization technique. **Wood and Fiber Science**, Madison, v.27, n.2, p.178-182, 1995.

CHEN, Y.; CHOOG, T.E.; WETZEL, M.D. A numerical analysis technique to evaluate the moisture dependent diffusion coefficient on moisture movement during drying. **Wood and Fiber Science**, Madison, v.28, n.3, p.338-345, 1996.

CHOONG, E.T. Diffusion coefficients of softwoods by steady-state and theoretical methods. **Forest Product Journal**, Madison, v.15, n.1, p.21-27, 1965.

CHOONG, E.T.; SKAAR, C. Diffusivity and Surface Emissivity in Wood Drying. **Wood Fiber**, Madison, v.4, n.2, p.80-86, 1972.

CHRUSCIEL, L.; MOUGEL, E.; ZOULALIAN, A.; MEUNIER, T. Characterization of water transfer in a low temperature convective wood drier: influence of the operating parameters on the mass transfer coefficient. **Holz als Roch und Werkstoff**, Berlin, v.57, p.439-445, 1999.

CLOUTIER, A.; FORTIN, Y. Moisture content -water potential relationship of wood. From saturated to dry conditions. **Wood Science and Technology**, New York, v.25, p.263-280, 1991.

CLOUTIER, A.; FORTIN, Y. Wood drying modelling based on water potencial: a parametric study: improving wood drying technology. WOOD DRYING CONFERENCE, 1994, Roturoa. **Proceedings...**Roturoa: IUFRO,1994, p.47-54.

CLOUTIER, A.; TREMBLAY, C.; FORTIN, Y. Effect of specimen structural orientation on the moisture content-water potential relationship of wood. **Wood Science and Technology**, New York, v. 29, p.235-242, 1995.

CUNNINGHAM, M.J.; KEEY, R.B.; KERDEMELIDIS, C. Isothermal moisture transfer coefficients in *Pinus radiata* above the fiber-saturation point, using the moment method. . **Wood and Fiber Science**, Madison, v.21, n.2, p.112-122, 1989.

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

DEFO, M.; FORTIN, Y.; CLOUTIER, A. Moisture content-water potential relationship of sugar maple and white spruce wood from green to dry conditions. **Wood and Fiber Science**, Madison, v.31, n.1, p.62-70, 1999.

DROIN, A.; TAVERDET, J.L.; VERGNAUD, J. M. Modeling the kinetics of moisture adsorption by wood. **Wood Science and Technology**, New York, v.22, p.11-20, 1988a.

DROIN-JOSSERAND, A.; TAVERDET, J.L.; VERGNAUD, J. M. Modeling the absorption and desorption of moisture of wood in an atmosphere of constant and programmed relative humidity. **Wood Science and Technology**, New York, v.22, p.299-310, 1988b.

DROIN-JOSSERAND, A.; TAVERDET, J.L.; VERGNAUD, J. M. Modeling the process of moisture adsorption in three dimensions by wood samples of various shapes: cubic, parallelepipedic. **Wood Science and Technology**, New York, v.23, p.259-271, 1989.

EL KOULI, M.; VERGNAUD, J.M. Modeling the process of absorption and desorption of water above and below the fiber saturation point. **Wood Science and Technology**, New York, v.25, p.327-339, 1991.

FERNANDEZ, L.M.; HOWELL, R.J. Convective drying model south pine. **Drying Technology**, New York, v.15, n.10, p.2343-2375, 1997.

FORTIN, Y.; TREMBLAY, C.; FAFARD, M.; DUPLAIN, G. Wood drying modeling based on the water potential concept: simulation results for conventional kiln drying of black spruce lumber. In: WOOD DRYING CONFERENCE, 2001, Tsukuba. **Proceedings...** Tsukuba: IUFRO, 2001. p.28-33.

FOTSING, J. A. M.; TCHAGANG, C. W. Experimental determination of the diffusion coefficients of wood in isothermal conditions. **Heat Mass and Transfer**, Heidelberg, n.41, p.977-980, 2005.

GALVÃO, A.P.M.; JANKOWSKY, I.P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1985. 111 p.

GUI, Q. Y.; JONES, W.E.; TAYLOR, W.F.; ISSA, A.C. An Application of finite element analysis to wood drying. **Wood and Fiber Science**, Madison, v.26, n.2, p.281-293, 1994.

HALL, C.W. The evolution and utilization of mathematical models for drying. **Mathematical Modeling**, New York, v.8 p.1-6, 1987.

HAQUE, N.M.; LANGRISH, T.A.G. Simulation and measurement of stack-wide effects in the modeling of kilns for drying timber. In: WOOD DRYING CONFERENCE, 2001, Tsukuba. **Proceedings...** Tsukuba: IUFRO, 2001. p. 28-33.

HART, A.C.; DARWIN, M.W. The slow drying rate of white oak. **Wood Science**, Madison, v.4, n.1, p.46-54, 1971.

HART, C.A. Effective Surface Moisture Content of Wood During Sorption. **Wood Science**, Madison, v.9, n.4, p.194-201, 1977.

HILDEBRAND, R. **Kiln drying of saw timber**. Germany, R.H.: Maschinenbau, 1970. 198 p.

HOU, Z.Q.; MEI JIANG, X.; GUAN, N.; CHEN, Z. Theoretical determination of moisture and heat transfer to lumber during preheating. **Wood and Fiber Science**, Madison, v.34, n.2, p.287-292, 2002.

HUKKA, A. The Effective Diffusion Coefficient and Mass Transfer Coefficient of Nordic Softwoods as Calculated from Direct Drying Experiments. **Holzforschung**. Berlin, v.53, p.534-540, 1999.

HUNTER, A.J. Wood drying and Fick's second law. **Wood science and technology**, New York, v.30, p.355-359, 1996.

JANKOWSKY, I.P. Fundamentos de secagem de madeiras. Documentos Florestais, Piracicaba, v.10, p.1-13, 1990.

JANKOWSKY, I.P. Equipamentos e processos para secagem de madeiras. In: SEMINARIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, São Paulo, 1995. **Anais...** Piracicaba: IPEF/IPT, 1995. p. 109-118.

KAKAÇ, S.; BERGLES, A.E.; MAYINGER, F. **Heat exchanger: Thermal-hydraulic fundamentals and design**. New York: McGraw-Hill, 1981, 1131 p.

KANG, Y.H.; HART, A.C. Temperature effect on diffusion coefficient in drying. **Wood and fiber Science**, Madison, v.24, n. 4, p.325-332, 1997.

KIRK, C.N.; CHOONG, T.E.; WETZEL, D. Mathematical modeling of the diffusion of water in wood during drying. **Wood and Fiber Science**, Madison, v.17, n.3, p.404-423, 1985.

KLITZKE, R.J. **Uso do inversor de frequência na secagem de madeira**. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002. 218f.

KOTOK; E.S.; LOWERY, D.P.; JENSEN, C.E. Surface temperature as an indicator of wood moisture content during drying. **Forest Products Journal**, Madison, v.19, n.9, p.80-82, 1969.

KOLLMANN, F.F.P. **Tecnología de la Madera y sus Aplicaciones**. 2.ed. Madrid: Reunidas, 1959.

KOLLMANN, F.F.P.; CÔTÉ, W.A. **Principles of wood science and technology solid wood**. New York: Springer, 1968. v.1.

KREITH, F. **Princípios da transmissão de calor**. São Paulo: E. Blücher, 1977. 550p.

LANGRISH, T.A.G.; WALKER, J.C.F. Transport processes in wood. In: WALKER, J.C.F. **Primary wood processing**. Oxford, G B: Alden, 1993. p.121-151.

LANGRISH, T.A.G.; BOHM, N. An experimental assessment of driving forces for drying in hardwoods. **Wood Science and Technology**, New York, v.31, p.415-422, 1997.

LIU, J.Y. A new Method for Separating Diffusion Coefficient and Surface Emission Coefficient. **Wood and Fiber Science**, Madison, v.21, n.2, p.133-141, 1989.

LIU, J.Y.; CHENG, S. Solutions of Luikov equations of heat and mass transfer in capillary – porous bodies. **International Journal Heat Mass Transfer**, Oxford, v.34, n.7, p.1747-1754, 1991.

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

LIU, J.Y.; SIMPSON, W.T. Two-Stage Moisture Diffusion in Wood with Constant Transport Coefficients. **Drying Technology**, New York, v.17, n.1&2, p.257-269, 1999.

LIU, J.Y.; SIMPSON, W.T.; VERRILL, P.S. An inverse moisture diffusion algorithm for the determination of diffusion coefficient. **Drying Technology**, New York, v.19, n.8 p.1555-1568, 2001.

LUIKOV, A.V. **Analytical heat diffusion theory**. New York: Academic, 1968. 685 p.

LUIKOV, A.V. **Heat and mass transfer in capillary-porous bodies**. London: Pergamon, 1966. 523 p.

MORÉN, T. Adaptive kiln control systems based on ct-scanning and industrial practice. In: WOOD DRYING CONFERENCE, 2001, Tsukuba. **Proceedings...** Tsukuba: IUFRO, 2001. p.28-33.

MOUNJI, H.; BOUZON, J.; VERGNAUD, J.M. Modelling the process of absorption and desorption of water in two dimensions (transverse) in a square wood beam. **Wood Science and Technology**, New York, v.26, p.23-37, 1991.

MOYNE, C.; MARTIN, M. Etude experimentale du transfert simultane de chaleur et de masse au cours du sechage par contact sous vide d'un bois resineux. **International Journal Heat Mass Transfer**, Oxford, v.25, n.12, p.1839-1848, 1982.

NELSON, R.M.Jr. Difusion of bound water in wood. Part 1: The driving force. **Wood Science and Technology**, New York, v.20, p.125-135, 1986a.

NELSON, R.M.Jr. Difusion of bound water in wood. Part 2: A model for isothermal diffusion. **Wood Science and Technology**, New York, v.20, p.235-251, 1986b.

NELSON, R.M.Jr. Difusion of bound water in wood. Part 3: A model for nonisothermal diffusion. **Wood Science and Technology**, New York, v.20, p.309-328, 1986c.

NELSON, R.M.Jr. Heat of transfer and activation energy for bound water diffusion in wood. **Wood Science and Technology**, New York, v.25, p.193-202, 1991.

NIJDAM, J.J., LANGRISH, T.A.G. A high-temperature drying model for softwood timber. **Chemical Engineering Science**, Oxford, v.55, p.3585-3598, 2000.

NOTHWAY, R.L.; HARRIS, G.A.; VILJOEN, J.P.S. High temperature drying of radiata pine: drying stresses with two rates of heating: improving wood drying technology. In: WOOD DRYING CONFERENCE, 1994, Rotorua, **Proceedings...** Roturoa: IUFRO, 1994. p. 440-446.

ÖZISIK, M.N. **Transferência de calor**. Rio de Janeiro: Guanabara-Koogan, 1990, 661p.

PANG, S. External heat and mass transfer coefficients for kiln drying of timber. **Drying Technology**, New York, v.14, n.3&4, p.859-871, 1996a.

PANG, S. Moisture content gradient in a softwood board during drying: simulation from a 2-D model and measurement. **Wood Science and Technology**, New York, v.30, p.165-178, 1996b.

PANG, S. Relationship between a diffusion model and a transport model for softwood drying. **Wood and Fiber Science**, Madison, v.29, n.1, p.58-67, 1997.

PANG, S.; SIMPSON, I.G.; HASLETT, A.N. Cooling and steam conditioning after high-temperature drying of *Pinus radiata* board: experimental investigation and mathematical modelling. **Wood Science and Technology**, New York, v.35, p.487-502, 2001.

PERRÉ, P; TURNER, W.I. Transpore: a generic heat and mass transfer computational model for understanding and visualizing the drying of porous media. **Drying Technology**, New York, v.17, n.7&8, p.1273-1289, 1999.

POLING, E.B.; PRAUSNITZ, M.J.; O'CONNELL, P.J. **The properties of gases and liquids**. New York: McGraw-Hill, 2001. 720 p.

PORDAGE, L.J.; LANGRISH. Simulation on the Effect of Air Velocity in the Drying of Hardwood Timber. **Drying Technology**. New York, v.17, n.1&2, p.237-255, 1999.

PLUMB, O.A.; BROWN, C.A.; OLMSTEAD, B.A. Experimental measurements of heat and mass transfer during convective drying of southern pine. **Wood Science and Technology**, New York, v.18, p.187-204, 1984.

PLUMB, O.A.; SPOLEK, G.A.; OLMSTEAD, B.A. Heat and mass transfer in wood during drying. **International Journal Heat Mass Transfer**, Oxford, v.28, n.9, p.1669-1678, 1985.

RASMUSSEN, E.F. **Dry Kiln operator's manual**. Madison: USDA, 1961. 197p. (Agriculture Handbook n.188).

RESCH, H.; KANG, H.; HOAG, L.M. Drying Douglas fir lumber: a computer simulation. **Wood and Fiber Science**, Madison, v.21, n.3, p.207-218, 1989.

ROSEN H.N. Exponential Dependency of the Moisture Diffusion Coefficient on Moisture Content. **Wood Science**, Madison, v.8, n.3, p.174-179, 1976.

ROSEN H.N. The Influence of External Resistance on Moisture Adsorption Rates in Wood. **Wood and Fiber**, Lawrence, v.10, n.3, p.218-228, 1978.

ROSSI, S.J. **Psicrometria**. João Pessoa: FUNAPE, 1987, 60 p.

ROZAS, M.E.C.E. **Contribuição ao desenvolvimento tecnológico para a utilização de madeira serrada de Eucalyptus grandis (Hill Ex Maiden) na geração de produtos com maior valor agregado**. Dissertação (Mestrado em ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1993. 133f.

REID, R.C.; PRAUSNITZ, M.J.; POLING, E.B. **The properties of gases and liquids**. 4.ed. New York: McGraw-Hill, 1987. 225 p.

RICE, W.R., YOUNGS, L.R. One and two dimensional moisture profiles in red oak. **Wood and Fiber Science**, Madison, v.23, n.3, p.328-341, 1991.

SAHIN, A.Z.; DINCER, I. Graphical determination of drying process and moisture transfer parameters for solids drying. **International Journal of Heat Mass transfer**, Oxford, v. 45, p. 3267-3273, 2002.

SALIN, J.G. Prediction of heat and mass transfer coefficients for individual boards and board surfaces. A review. In: WOOD DRYING CONFERENCE, 1996, Quebec. **Proceedings...** Quebec: IUFRO, 1996, p.49-58.

SANTINI, J.E.; HASELEIN, R.C. Efeito da temperatura e velocidade do ar sobre a taxa de secagem da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n.2, p.99-106, 2002.

SANTOS, G. R. V. dos. Curva característica de secagem para madeira de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.63, p.214-220, 2003.

SEVERO, E.T. D. **Efeito da Temperatura e da Velocidade do Ar na Secagem de Madeira Serrada de *Pinus elliottii***. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1986. 109f.

SIAU, J.F. **Flow in wood**. Syracuse: Syracuse University Press, 1971. 245p.

SIAU, J.F. **Transport processes in wood**. New York: Springer-Verlag, 1984. 245p.

SIAU, J.F. **Wood: Influence of moisture on physical properties**. Virginia: Polytechnic Inst. Dep. of Wood Science and Forest Product, 1995, 227 p.

SIAU, J. F.; BAO, F.; AVRAMIDIS, S. Experiments in nonisothermal diffusion of moisture in wood. **Wood and Fiber Science**, Madison, v.18, n.1, p.84-98, 1986.

SIAU, J.F.; AVRAMIDIS, S. The Surface Emission Coefficient of Wood. **Wood and Fiber Science**, Madison, v.28, n.2, p.178-185, 1996.

SIAU, J.F.; JIN, Z. Nonisothermal moisture diffusion experiments analyzed by four alternative equations. **Wood and Fiber Science**, Madison, v.19, n.2, p.151-157, 1985.

SILVA, M.A. A general model for moving boundary problems – application to drying of porous media. **Drying Technology**: New York, v.18, n.3, p.601-624, 2000.

SIMPSON W.T. Effect of presteaming on moisture gradient of northern red oak during drying. **Wood Science**, Madison, v.8, n.4, p.272-276, 1976.

SIMPSON, W.T.; LIU, J.Y. Dependence of the water vapor diffusion coefficient of aspen (*Populus spec.*) on moisture content. **Wood Science and Technology**, New York, v.26, p.9-21, 1991.

SIMPSON, W.T. **Dry kiln operator's manual**. Madison: Forest Products Laboratory, [1991]. (Agriculture Handbook, n. 188).

SIMPSON, W.T. Determination and use of moisture diffusion coefficient to characterize drying of northern red oak (*Quercus rubra*). **Wood Science and Technology**, New York, v.27, p.409-420, 1993.

SIMPSON, W.T.; LIU, J.Y. An optimization technique to determine red oak surface and internal moisture transfer coefficients during drying. **Wood and Fiber Science** Madison, v.29, n.4, p.312-318, 1997.

SISSON, L.E.; PITTS, D.R. **Fenômenos de transporte**. Rio de Janeiro: LTC, 2001. 765 p.

SKAAR, C.J. **Water in Wood**. Syracuse: Syracuse University Press, 1972. 218 p.

SKAAR, C.J.; SIAU, J.F. Thermal Diffusion of Bound Water in Wood. **Wood Science and Technology**, New York, v.15, p.105-112, 1981.

SKAAR, C.J.; BABIAK, M. A model for Bound-Water Transport in Wood. **Wood Science and Technology**, New York, v.16, p.123-138, 1982.

SÖDERSTRÖM, O.; SALIN, J.G. On determination of surface emission factors in wood drying. **Holzforschung**, Berlin, v.46, n.5, p.391-397, 1993.

SONNTAG, R.E.; BORGAROKKE, C. **Introdução à termodinâmica para engenharia**. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 350 p.

SOUZA, M.E. de P. **Transporte de massa e calor na secagem de cavaco de madeira**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

SOUZA, P.E.M.; NEBRA, A.S. Heat and mass transfer model in wood chip drying. **Wood and Fiber Science**, Madison, v.32, n.2, p.153-163, 2000.

SPOLEK, G.A.; PLUMB, O.A. Capillary pressure in softwoods. **Wood Science and Technology**, New York, v.19, p.189-199, 1981.

STAMM, A.J. **Wood and Cellulose Science**. New York: Ronald, 1964. 549 p.

STANISH, M.A. The roles of bound water chemical potential and gas phase diffusion in moisture transport through wood. **Wood Science and Technology**, New York, v.19, p.53-70, 1986.

STANISH, M.A.; SCHAJER, G.S.; KAYIHAN, F. A mathematical model of drying for higroscopic porous media. **Aiche Journal**, Hoboken, v.32, n.8, p.1301-1311, 1986.

TREMBLAY, C.; CLOUTIER, A.; FORTIN, Y. Moisture content-water potential relationship of red pine sapwood above the fiber saturation point and determination of the effective pore size distribution. **Wood Science and Technology**, New York, v.30, p.361-371, 1996.

TREMBLAY, C.; CLOUTIER, A.; FORTIN, Y. Determination of the effective water conductivity of red pine sapwood. **Wood Science and Technology**, New York, v.34, p.109-124, 2000a.

TREMBLAY, C.; CLOUTIER, A.; FORTIN, Y. Experimental determination of the convective heat and mass transfer coefficients for wood drying. **Wood Science and Technology**, New York, v.34, p.253-276, 2000b.

TOMASELLI, I. **Condições da secagem artificial de madeiras serradas no Paraná e Santa Catarina**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1974.

TOMASELLI, I. **Aspectos físicos da secagem da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. Acima de 100°C**. Tese (Professor Titular) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1981.

TOMASELLI, I. Comunicação pessoal, Curitiba/Pr, 2006.

TURNER, W.I. A two-dimensional orthotropic model for simulating wood drying processes. **Applied Mathematical Modelling**, Guildford, v.20, p.60-74, Jan., 1996.

VILLIERE, A. **Sêchage des bois**. 6.ed. Paris: Dunod, 1966. 410 p.

WIBERG, P.; SEHLSTEDT, P.; MORÉN, T.J. Heat and mass transfer during sapwood drying above the fiber saturation point. **Drying Technology**, New York, v.18, n.8, 1647-1664, 2000.

WOOD handbook: wood as an engineering material. Washington, DC: USDA Forest Service Forest Products Laboratory, 1999. 450 p.

YAO, J. A new approach to the study of drying diffusion coefficient of wood. **Forest Product Journal**, Madison, v.1, n.6, p.61-69, 1966.

YEO, H.; SMITH, B.W.; HANNA, B.R. Evaluation of mass transfer in wood utilizing a calorimetric technique and numerical analysis. In: WOOD DRYING CONFERENCE, 2001, Tsukuba. **Proceedings...** Tsukuba: IUFRO, 2001, p.28-33.

YEO, H.; SMITH, B.W.; HANNA, B.R. Mass transfer in wood evaluated with a calorimetric technique and numerical analysis. **Wood and fiber Science**, Madison, v.34, n.4, p.657-665, 2002a.

YEO, H.; SMITH, B.W.; HANNA, B.R. Determination of surface moisture content of wood utilizing a colorimetric technique. **Wood and fiber Science**, Madison, v.34, n.3, p.419-424, 2002b.

ZHANG, J.; PERALTA, P.N. Moisture content-water potential characteristic curves for red oak and loblolly pine. **Wood and fiber Science**, Madison, v.31, n.4, p.360-369, 1999.

ZIELONKA, P; GIERLIK, E. Temperature distribution during conventional and microwave wood heating. **Holz als Roch- und Werkstoff**, Berlin, v.57, n.247-249, 1999.

## ANEXOS

ANEXO 1 - COEFICIENTE CONVECTIVO DE CALOR E MASSA.....	139
ANEXO 2 - SECAGEM EM ESTUFA PILOTO.....	140
ANEXO 3 – AQUECIMENTO DA MADEIRA.....	143
ANEXO 4 – ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	151

## ANEXO 1 - COEFICIENTE CONVECTIVO DE CALOR E MASSA

Valores de densidade básica e teor de umidade inicial em madeira de *Pinus elliottii* Engelm de 36mm de espessura.

Propriedade Amostra/Temperatura	Densidade Básica (kg/m <sup>3</sup> )			
	1	2	3	4
40°C	419	385	412	404
60°C	429	398	411	408
80°C	430	400	405	410
Média	426	394	409	407
Desvio Padrão	6,3	8,1	4,1	3,1
C.V. (%)	1,5	2,1	1,0	0,8
Propriedade Amostra/Temperatura	Teor de Umidade (kg/kg)			
	1	2	3	4
40°C	1,563	1,257	1,092	1,324
60°C	1,358	1,429	0,819	1,328
80°C	1,402	1,435	0,984	1,165
Média	1,441	1,373	0,965	1,272
Desvio Padrão	0,108	0,101	0,137	0,093
C.V. (%)	7,465	7,380	14,236	7,311

Valores de Nusselt, Prandtl e Reynolds para cada temperatura.

Autor Temperatura	Nusselt			Reynolds			Prandtl		
	40°C	60°C	80°C	40°C	60°C	80°C	40°C	60°C	80°C
Chilton- Colburn	25,3	24,5	24,0	7.244	6.875	6.581	0,729	0,758	0,827
McAdams	22,7	21,9	21,6	7.244	6.875	6.581	0,729	0,758	0,827
Gnielinski	22,4	21,0	20,3	6.885	6.248	5.779	0,731	0,761	0,831
Gnielinski simplificado	20,3	18,9	18,3	6.885	6.248	5.779	0,731	0,761	0,831
Valores estudo	26,3	28,3	29,0	7.244	6.875	6.581	0,729	0,758	0,827

## ANEXO 2 - SECAGEM EM ESTUFA PILOTO

Propriedades da madeira de *Pinus elliottii* Engelm e do ar  
nas diferentes condições de ensaios

Amostra	T	Tu <sub>i</sub>	Tu <sub>f</sub>	$\rho_b$	Tu <sub>e</sub>	t <sub>s</sub>	UR	k <sub>m</sub>	T <sub>mi</sub>
1	40°C	1,120	0,141	412	0,070	120	41,6	0,0163	22
2		1,341	0,141	421	0,070	120	41,6	0,0163	22
3		0,996	0,137	398	0,070	120	41,6	0,0163	22
4		1,031	0,136	412	0,070	120	41,6	0,0163	22
5		1,214	0,153	514	0,070	120	41,6	0,0163	22
6		1,085	0,160	424	0,070	120	41,6	0,0163	22
7		1,513	0,159	417	0,070	120	41,6	0,0163	22
8		1,466	0,149	498	0,070	120	41,6	0,0163	22
<b>Média</b>		1,221	0,147	437	0,070	120	41,6	0,0163	22
<b>DP</b>		0,198	0,010	43,5	0,000	0	0,0	0,0000	0
<b>CV</b>		16,241	6,535	10,0	0,000	0	0,0	0,0000	0
1	60°C	1,087	0,137	477	0,060	68	40,7	0,0165	22
2		1,075	0,133	442	0,060	68	40,7	0,0165	22
3		1,058	0,147	474	0,060	68	40,7	0,0165	22
4		1,132	0,135	446	0,060	68	40,7	0,0165	22
5		0,919	0,097	524	0,060	56	40,7	0,0165	22
6		1,481	0,105	415	0,060	56	40,7	0,0165	22
7		1,024	0,103	509	0,060	56	40,7	0,0165	22
8		0,861	0,084	495	0,060	56	40,7	0,0165	22
<b>Média</b>		1,080	0,118	473	0,060	62	40,7	0,0165	22
<b>DP</b>		0,186	0,023	36,7	0,000	6	0,0	0,0000	0
<b>CV</b>		17,189	19,561	7,8	0,000	10	0,0	0,0000	0
1	80°C	1,532	0,161	418	0,050	36	39,3	0,0167	22
2		1,120	0,151	408	0,050	36	39,3	0,0167	22
3		1,421	0,142	398	0,050	36	39,3	0,0167	22
4		1,372	0,140	422	0,050	36	39,3	0,0167	22
5		1,269	0,142	464	0,050	36	39,3	0,0167	22
6		1,309	0,145	440	0,050	36	39,3	0,0167	22
7		1,455	0,142	445	0,050	36	39,3	0,0167	22
8		1,361	0,143	450	0,050	36	39,3	0,0167	22
<b>Média</b>		1,355	0,146	431	0,050	36	39,3	0,0167	22
<b>DP</b>		0,126	0,007	22,7	0,000	0,0	0,0	0,0000	0
<b>CV</b>		9,284	4,806	5,3	0,000	0,0	0,0	0,0000	0

T: Temperatura de secagem, °C.

Tu<sub>f</sub>: Teor de umidade final, kg/kg.

t<sub>s</sub>: Tempo de secagem, h.

UR: umidade relativa, %.

T<sub>mi</sub>: Temperatura inicial da madeira, °C.

CV: Coeficiente de variação, %.

Tu<sub>i</sub>: Teor de umidade inicial, kg/kg.

Tu<sub>e</sub>: Teor de umidade de equilíbrio, kg/kg.

$\rho_b$ : Densidade básica, kg/m<sup>3</sup>.

k<sub>m</sub>: coeficiente convectivo de massa, m/s.

DP: Desvio padrão

Teor de umidade médio das tábuas e das lâminas para a temperatura de 40°C

40_1 Tempo h	Umidade		(T-L)x100/T Erro %	40_2 Tempo h	Umidade		(T-L)x100/T Erro %
	Lâmina kg/kg	Tábua kg/kg			Lâmina kg/kg	Tábua kg/kg	
0	1,120	1,120	0,0	0	1,214	1,214	0,0
8	0,754	0,854	11,7	8	0,580	1,005	42,3
16	0,614	0,682	10,1	16	0,538	0,858	37,3
24	0,511	0,536	4,5	24	0,509	0,706	28,0
40	0,353	0,302	-16,9	32	0,468	0,559	16,2
48	0,265	0,254	-4,2	40	0,412	0,430	4,2
64	0,209	0,202	-3,2	48	0,338	0,325	-3,9
72	0,171	0,189	9,6	56	0,263	0,258	-1,9
88	0,166	0,163	-2,0	64	0,230	0,227	-1,1
96	0,148	0,154	4,1	72	0,209	0,208	-0,7
112	0,139	0,141	1,6	80	0,193	0,196	1,7
120	0,135	0,137	1,1	88	0,184	0,184	0,1
				96	0,166	0,176	5,8
				104	0,169	0,165	-2,9
				112	0,164	0,157	-4,7
				120	0,152	0,153	0,4

Teor de umidade médio das tábuas e das lâminas para a temperatura de 60°C

60_1 Tempo	Umidade		(T-L)x100/T Erro %	60_2 Tempo	Umidade		(T-L)x100/T Erro %
	Lâmina kg/kg	Tábua kg/kg			Lâmina kg/kg	Tábua kg/kg	
0	1,087	1,087	0,0	0	0,919	0,919	0,0
4	0,755	0,922	18,1	4	0,545	0,734	25,8
8	0,641	0,770	16,7	8	0,427	0,552	22,7
12	0,625	0,603	-3,5	12	0,341	0,389	12,4
16	0,380	0,450	5,7	16	0,284	0,278	-2,3
20	0,290	0,336	13,8	20	0,229	0,229	-0,3
24	0,237	0,258	8,3	24	0,158	0,196	19,2
28	0,210	0,226	7,2	32	0,162	0,156	-3,5
36	0,176	0,187	5,5	40	0,120	0,130	7,3
44	0,159	0,162	1,6	48	0,097	0,110	11,8
52	0,143	0,151	5,4	56	0,084	0,097	13,2
60	0,132	0,140	5,8				
68	0,126	0,137	7,6				

Teor de umidade médio das tábuas e das lâminas para a temperatura de 80°C.

80_1 Tempo h	Umidade		(T-L)x100/T Erro %	80_2 Tempo h	Umidade		(T-L)x100/T Erro %
	Lâmina kg/kg	Tábua kg/kg			Lâmina kg/kg	Tábua kg/kg	
0	1,532	1,532	0,0	0	1,269	1,269	0,0
2	0,992	1,390	28,6	2	0,809	1,178	31,3
4	0,875	1,265	30,8	4	0,723	1,071	32,5
6	0,785	1,158	32,2	6	0,615	0,960	35,9
8	0,680	1,018	33,2	8	0,521	0,848	38,6
10	0,645	0,910	29,2	10	0,451	0,740	39,0
12	0,589	0,820	28,1	12	0,394	0,636	38,1
16	0,528	0,634	16,8	16	0,349	0,432	19,1
20	0,425	0,471	9,7	20	0,287	0,311	7,9
24	0,333	0,343	3,1	24	0,214	0,235	8,8
28	0,225	0,243	7,3	28	0,180	0,186	3,5
32	0,187	0,188	0,6	32	0,150	0,158	5,1
36	0,155	0,161	3,7	36	0,125	0,142	11,8

## ANEXO 3 - AQUECIMENTO DA MADEIRA

Propriedades físicas da madeira e do fluido para madeira de *Pinus taeda* L.

Código	Tu <sub>i</sub>	r <sub>b</sub>	C <sub>mad</sub>	k <sub>mad</sub>	a	T <sub>ar</sub>	V <sub>ar</sub>	h <sub>c</sub>	Re	Pr	Nu
	kg/kg	kg/m <sup>3</sup>	J/kg °C	W/m °C	m <sup>2</sup> /s	°C	m/s	W/m <sup>2</sup> °C			
1J	0,477	370	2.270,6	0,175	1,40E-07	40	3,5	19,49	8.501	0,74	28,96
2J	0,819	435	2.630,8	0,252	1,20E-07	40	4,7	24,68	11.416	0,74	36,67
3J	0,939	375	2.727,1	0,243	1,22E-07	40	6,8	33,16	16.517	0,74	49,27
4J	0,575	412	2.389,8	0,234	1,52E-07	60	3,5	19,48	8.154	0,78	28,53
5J	0,689	401	2.511,1	0,248	1,45E-07	60	4,7	24,66	10.950	0,78	36,12
6J	0,972	372	2.751,6	0,280	1,41E-07	60	6,8	33,13	15.842	0,78	48,54
7J	0,446	370	2.229,5	0,214	1,80E-07	80	3,5	20,23	8.000	0,91	29,53
8J	0,645	423	2.466,3	0,273	1,59E-07	80	4,7	25,61	10.742	0,91	37,39
9J	0,789	405	2.604,8	0,290	1,56E-07	80	6,8	34,41	15.542	0,91	50,24
<b>Média</b>	<b>0,706</b>	<b>396</b>	<b>2.509,1</b>	<b>0,246</b>	<b>1,46E-07</b>	<b>60</b>	<b>5,0</b>	<b>26,09</b>	<b>11.741</b>	<b>0,81</b>	<b>38,36</b>
1A	1,297	428	2.954,6	0,322	1,10E-07	40	3,5	19,49	8.501	0,74	28,96
2A	1,255	412	2.931,7	0,315	1,17E-07	40	4,7	24,68	11.416	0,74	36,67
3A	1,454	412	3.033,5	0,347	1,14E-07	40	6,8	33,16	16.517	0,74	49,27
4A	1,127	474	2.856,2	0,349	1,23E-07	60	3,5	19,48	8.154	0,78	28,53
5A	1,012	460	2.780,1	0,339	1,32E-07	60	4,7	24,66	10.950	0,78	36,12
6A	1,563	403	3.082,5	0,403	1,28E-07	60	6,8	33,13	15.842	0,78	48,54
7A	1,203	410	2.902,1	0,376	1,43E-07	80	3,5	20,23	8.000	0,91	29,53
8A	1,159	425	2.875,9	0,377	1,41E-07	80	4,7	25,61	10.742	0,91	37,39
9A	1,244	418	2.925,5	0,389	1,42E-07	80	6,8	34,41	15.542	0,91	50,24
<b>Média</b>	<b>1,257</b>	<b>427</b>	<b>2.922,2</b>	<b>0,369</b>	<b>1,32E-07</b>	<b>60</b>	<b>5,0</b>	<b>26,09</b>	<b>11.741</b>	<b>0,81</b>	<b>38,36</b>

Tu<sub>i</sub>: Teor de umidade inicial da madeira.

T<sub>ar</sub>: Temperatura de aquecimento do fluido (ar-úmido).

C<sub>mad</sub>: Calor específico da madeira.

a: Difusividade térmica da madeira.

Re, Pr, Nu: Número de Reynolds, Prandtl e Nusselt.

A: Madeira adulta (próxima da casca).

ρ<sub>b</sub>: Densidade básica da madeira.

V<sub>ar</sub>: Velocidade do fluido (ar-úmido).

k<sub>mad</sub>: Condutividade térmica da madeira.

h<sub>c</sub>: Coeficiente convectivo de calor do fluido.

J: Madeira juvenil (próxima da medula).

Modelo proposto e solução teórica do modelo da equação de Fourier

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( k_{mad} \frac{\partial T}{\partial z} \right) = r_{av} C_{mad} \frac{\partial T}{\partial t}$$

1

Considerou-se uma tábua de espessura 2L, sendo aquecida por convecção a partir do ar a uma temperatura T<sub>ar</sub> que escoia sobre a placa com uma velocidade.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \mathbf{a}_{mad} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad 2$$

Condição inicial: a temperatura inicial é constante ao longo da espessura da tábua, e igual a  $T_0$ :

$$T(z,0) = T_0$$

Primeira condição de contorno: no centro da placa, a função temperatura que passa por um ponto de mínimo:

Para  $z=0$  (Simetria):

$$\left. \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \quad 3$$

Como o fluxo de calor é no sentido inverso do gradiente de temperatura na espessura da tábua, tem-se a segunda condição de contorno. A troca de calor entre a placa e o ar é por convecção, logo na superfície da mesma ( $z=L$ ). O fluxo de calor por condução da superfície para o interior da tábua iguala-se ao fluxo de calor recebido do ar:

$$k_{mad} \times \left. \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \right|_{z=L} = h_c \times (T_{ar} - T) \quad 4$$

Ou

$$\left. \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \right|_{z=L} = \frac{h_c}{k_{mad}} \times (T_{ar} - T) \quad 5$$

Definindo-se uma temperatura adimensional igual a:

$$\bar{T} = \frac{T_{ar} - T}{T_{ar} - T_0}$$

$$\bar{T} \times (T_{ar} - T_0) = T_{ar} - T \quad 6$$

Derivando (6):

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \times (T_{ar} - T_0) = - \frac{\partial T}{\partial z} \quad 7$$

Substituindo (7) em (3):

$$\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial z^2} = \frac{1}{\mathbf{a}_{mad}} \times \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} \quad 8$$

Reescrevendo a condição de contorno em relação à temperatura adimensional, que se obtém ao substituir (6) e (7) em (5):

$$\left. \frac{\partial \bar{T}(z,t)}{\partial z} \right|_{z=L} = -\frac{h_c}{k_{mad}} \times \bar{T} \quad 9$$

De acordo com OZISIK, (1990), aplicar o método de separação de variáveis na Equação 8, é admitir que a temperatura adimensional, que varia no tempo e no espaço, possa ser representada pelo produto de duas funções, onde  $X(z)$  é uma função somente de  $z$  e  $Y(t)$  é uma função somente de  $t$ . Sendo da forma:

$$\bar{T}(z,t) = X(z) \times Y(t) \quad 10$$

Ao derivar com respeito ao  $z$  obtém-se:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial z}(z) = Y(t) \times X'(z)$$

E a derivada segunda com respeito a  $z$ , obtém-se:

$$\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial z^2}(z) = Y(t) \times X''(z) \quad 11$$

A derivada com respeito ao tempo será:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t}(z) = Y'(t) \times X(z) \quad 12$$

Substituindo estas derivadas em (8):

$$Y(t) \times X''(z) = \frac{1}{a_{mad}} \times X(z) \times Y'(t) \quad 13$$

A igualdade só é possível se ambos os lados forem iguais à mesma constante de separação, neste caso  $\mu = -\lambda^2$ .

$$\frac{X''(z)}{X(z)} = \frac{1}{a_{mad}} \times \frac{Y'(t)}{Y(t)} = m \quad \mu < 0 \rightarrow \bar{T} \rightarrow 0 \quad t_{\infty} \rightarrow 0$$

De esta forma existem duas equações a resolver:

A primeira:

$$\frac{Y'(t)}{Y(t)} = \mathbf{a}_{mad} \times I^2 \quad 14$$

$$Y(t) = c_1 \times \exp(-I^2 \times \mathbf{a}_{mad} \times t) \quad 15$$

A segunda:

$$\frac{X''(z)}{X(z)} = -I^2$$

$$X''(z) + I^2 \times X(z) = 0$$

A solução da equação resulta em raízes complexas conjugadas:

$$X(z) = c_2 \times \text{sen}(Iz) + c_3 \times \cos(Iz)$$

De acordo com o principio de superposição a solução da Equação 14 será:

$$\bar{T}(z, t) = [c_1 \times \exp(-I^2 \times \mathbf{a}_{mad} \times t)] [c_2 \times \cos(Iz) + c_3 \times \text{sen}(Iz)]$$

ou

$$\bar{T}(z, t) = [\exp(-I^2 \times \mathbf{a}_{mad} \times t)] [A \cos(Iz) + B \text{sen}(Iz)] \quad 16$$

Sendo  $\lambda$ , A e B constantes, que serão determinadas considerando as condições de contorno.

Primeira condição de contorno:

$$\left. \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right|_{z=0} = 0$$

Derivando (16) com respeito a z:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial z} = [\exp(-I^2 \times \mathbf{a}_{mad} \times t)] \times [B \cos(zI) \times I - A \text{sen}(zI) \times I]$$

Como:

$\text{sen}(0)=0$  e  $\text{cos}(0)=1$  obtém-se que  $B=0$

Assim:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial z} = [\exp(-I^2 \times \mathbf{a}_{mad} \times t)] \times [-A \text{sen}(zI) \times I] \quad 17$$

Integrando (17):

$$\bar{T}(z,t) = [\exp(-I^2 \times \mathbf{a}_{mad} \times t)] \times [A \text{cos}(zI)] \quad 18$$

Segunda condição de contorno, que corresponde à superfície da placa:

$$\left. \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \right|_{z=L} = -\frac{h_c}{k_{mad}} \times \bar{T} \quad 19$$

Substituindo (17) e (18) em (19):

$$-AI \text{sen}(zI) \times \exp(-I^2 t \mathbf{a}_{mad}) = -\frac{h_c}{k_{mad}} A \times \exp(-I^2 t \mathbf{a}_{mad}) \times \text{cos}(zI)$$

$$I \text{sen}(zI) = \frac{h_c}{k_{mad}} A \text{cos}(zI)$$

$$\frac{\text{cos}(zI)}{\text{sen}(zI)} = \frac{k_{mad} I}{h_c}$$

Sendo  $\lambda$  as infinitas raízes desta equação. Quando  $z = L$  (superfície da madeira) será:

$$\cot g(LI) = \frac{k_{mad} I}{h_c} \quad 20$$

Dividindo e multiplicando por  $L$  no lado direito da equação (20):

$$\cot g(LI) = \frac{k_{mad} I}{h_c} \times \frac{L}{L} \quad \mathbf{h} = IL$$

$$\cot g(\mathbf{h}) = \frac{\mathbf{h}}{Bi}$$

Onde:

$$Bi = \frac{h_c L}{k_{mad}} \quad (\text{número de Biot adimensional}).$$

O adimensional de Biot, é um parâmetro que compõe as resistências à troca de calor por condução no sólido com a resistência à troca por convecção entre o sólido e o ar.

Da equação (18) tem-se:

$$\bar{T}(z, t) = [\exp(-I^2 \times \mathbf{a}_{mad} \times t)] \times [A \cos(zI)]$$

Como existem infinitas raízes ( $I_n$ ) a solução será representada pela serie:

$$\bar{T}(z, t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos(z I_n) \exp(-I_n^2 \mathbf{a}_{mad} t) \quad 21$$

Da condição inicial tem-se que:  $T = T_0$  em  $t = 0$

Portanto para  $t = 0$ :

$$\bar{T} = \frac{T_{ar} - T}{T_{ar} - T_0} = 1$$

E a equação (21) resulta:

$$1 = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos(z I_n)$$

O valor de  $A_n$  poderá assim ser descrito como:

$$A_n = \frac{\int_0^L \cos(z I_n) dz}{\int_0^L \cos^2(z I_n) dz}$$

As integrais da equação 22 podem ser resolvidas como:

$$\int_0^L \cos(zI_n) dz = \frac{1}{I_n} \text{sen}(LI_n) \quad 23$$

$$\int_0^L \cos^2(zI_n) dz = \frac{2I_n L + \text{sen}(2I_n L)}{4I_n} \quad 24$$

Substituindo (23) e (24) em (22), obtém-se a função que descreve a variável  $A_n$  em função da raiz característica  $I_n$ :

$$A_n = \frac{2 \text{sen}(LI_n)}{LI_n + \text{sen}(LI_n) \times \cos(LI_n)} \quad 25$$

Substituindo (25) em (21):

$$\bar{T}(z, t) = 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\text{sen}(LI_n) \times \cos(zI)}{LI_n + \text{sen}(LI_n) \times \cos(LI_n)} \exp(-I_n^2 \mathbf{a}_{mad} t)$$

Finalmente, a equação que descreve a temperatura em qualquer posição no interior da placa e em qualquer tempo pode ser escrita como:

$$T(z, t) = T_{ar} + (T_0 - T_{ar}) \times 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\text{sen}(LI_n) \times \cos(zI)}{LI_n + \text{sen}(LI_n) \times \cos(LI_n)} \exp(-I_n^2 \mathbf{a}_{mad} t)$$

Onde:

$T(z, t)$ : variação da temperatura no tempo e no espaço.

$T_{ar}$ : temperatura ambiente.

$L$ : metade da espessura da tábua.

$z$ : direção no eixo  $z$ .

$I$ : raízes da equação característica.

$\mathbf{a}_{mad}$ : difusividade térmica

De acordo com LUIKOV (1968), os valores das raízes ( $I$  ( $\text{m}^{-1}$ )) da equação característica segundo o número de Biot pode ser observada na Tabela 3.

O adimensional de Biot, é um parâmetro que compõe as resistências à troca de calor por condução no sólido com a resistência à troca por convecção entre o sólido e o ar.

$$Bi = \frac{h_c L}{k_{mad}} \quad (\text{número de Biot adimensional}).$$

Valores das raízes dependente do número de Biot

Biot	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$	$I_6$	$I_7$	$I_8$	$I_9$
2,65	50,47349	163,53540	289,86690	421,56280	555,41160	690,27420	825,68370	961,41770	1.097,36000
2,30	48,52548	160,71930	287,70450	419,92920	554,12300	689,21730	824,79060	960,64560	1.096,68100
3,06	52,09612	166,09840	291,93830	423,15980	556,68270	691,32160	826,57100	962,18620	1.098,03700
1,85	46,06097	157,54100	285,41910	418,24720	552,81160	688,14860	823,89040	959,86910	1.095,99900
2,34	48,52548	160,71930	287,70450	419,92920	554,12300	689,21730	824,79060	960,64560	1.096,68100
2,65	50,47349	163,53540	289,86690	421,56280	555,41160	690,27420	825,68370	961,41770	1.097,36000
2,19	47,95713	159,95200	287,14110	419,51170	553,79650	688,95090	824,56590	960,45170	1.096,51000
2,08	47,38878	159,18470	286,57770	419,09410	553,47000	688,68430	824,34120	960,25780	1.096,34000
2,85	50,87915	164,17610	290,38480	421,96210	555,72940	690,53600	825,90550	961,60980	1.097,52900
1,44	41,79679	152,97620	282,39690	416,08400	551,14480	686,79790	822,75680	958,89320	1.095,14200
1,84	45,30152	156,66470	284,82390	417,81790	552,47980	687,87930	823,66420	959,67430	1.095,82800
2,14	47,38878	159,18470	286,57770	419,09410	553,47000	688,68430	824,34120	960,25780	1.096,34000
1,24	39,60122	150,95810	281,13980	415,20140	550,47000	686,25290	822,30040	958,50100	1.094,79800
1,71	44,54206	155,78840	284,22860	417,38850	552,14800	687,61010	823,43810	959,47950	1.095,65700
1,85	45,30152	156,66470	284,82390	417,81790	552,47980	687,87930	823,66420	959,67430	1.095,82800
1,25	39,60122	150,95810	281,13980	415,20140	550,47000	686,25290	822,30040	958,50100	1.094,79800
1,50	42,89458	153,98520	283,02550	416,52530	551,48220	687,07040	822,98500	959,08940	1.095,31400
2,12	47,38878	159,18470	286,57770	419,09410	553,47000	688,68430	824,34120	960,25780	1.096,34000
BIINF	68,29565	204,88652	341,47739	478,06826	614,65957	751,25044	887,84130	1.024,43217	1.161,02347

### ANEXO 4 - ANÁLISE ESTATÍSTICA

Análise de regressão múltipla (backward stepwise) da variável dependente tempo de secagem ( $t_s$ ) e as variáveis independentes: densidade básica (DB), teor de umidade inicial ( $Tu_i$ ), teor de umidade final ( $Tu_f$ ) e temperatura de secagem (T).

#### a) Todas as variáveis

	<b>B</b>	<b>t(19)</b>	<b>p</b>
Intercepto	167,973	10,4254	$2,68 \times 10^{-9}$
$Tu_i$	$2,66 \times 10^6$	$5,05 \times 10^5$	0,9999
$Tu_f$	3,4515	6,4823	$3,27 \times 10^{-6}$
DB	-0,0376	-1,5111	0,1472
T	-2,0995	-38,4166	$1,77 \times 10^{-19}$

#### b) Sem a variável $Tu_i$

	<b>B</b>	<b>t(20)</b>	<b>p</b>
Intercepto	167,9730	11,0149	$6,08 \times 10^{-10}$
$Tu_f$	3,4515	7,4085	$3,74 \times 10^{-7}$
DB	-00258	-1,5691	0,1323
T	0,0233	-41,6892	$6,43 \times 10^{-21}$

#### c) Sem a variável $Tu_i$ e DB (Análise Final)

	<b>B</b>	<b>t(21)</b>	<b>p</b>
Intercepto	146,401	21,4539	$9,18 \times 10^{-16}$
$Tu_f$	3,7692	8,685739	$2,15 \times 10^{-8}$
T	-2,0882	-403339	$2,21 \times 10^{-21}$

	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>EPE</b>	<b>EAM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
				(%)	(ajustado)				
Regressão	2	29.517,32	14.758,66	98,80	98,68	4,1404	3,4600	860,9007	$7,08 \times 10^{-21}$
Resíduo	21	360,0089	17,1433						

Relação entre os valores de teor de umidade média da tábua e os valores determinados pelo modelo difusivo:

Temperatura de 40 °C  
Variável dependente: tábua  
Análise regressão múltipla

Parâmetro	Estimado	Erro padrão	P
constante	0,00198006	0,0186571	0,9176
Modelo	0,92918	0,0317688	0,0000

Análise de Variância

	GL	SQ	QM	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> (ajustado)	EPE	EAM	F	P
Regressão	1	1,3491	1,3491	98,84%	98,73%	0,03971	0,02969	855,46	0,0000
Resíduo	10	0,01577	0,001577						

Variável dependente: lâmina  
Análise regressão múltipla

Parâmetro	Estimado	Erro Padrão	P
constante	0,0304533	0,0472379	0,5336
Modelo	0,768806	0,0804356	0,0000

Análise de Variância

	GL	SQ	QM	R <sup>2</sup> (%)	R <sup>2</sup> (ajustado)	EPE	EAM	F	P
Regressão	1	0,923585	0,92359	90,13	89,15	0,10055	0,05407	91,36	0,0000
Resíduo	10	0,101010	0,01011						

Temperatura de 60 °C  
 Variável dependente: tábua  
 Análise regressão múltipla

<b>Parâmetro</b>	<b>Estimado</b>	<b>Erro padrão</b>	<b>P</b>
constante	0,0103948	0,027079	0,7084
Modelo	1,006986	0,0638665	0,0000

Análise de Variância

	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>R<sup>2</sup></b> (%)	<b>R<sup>2</sup></b> (ajustado)	<b>EPE</b>	<b>EAM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regressão	1	0,95407	0,95407	96,23	95,89	0,05831	0,04249	280,61	0,0000
Resíduo	11	0,03740	0,00340						

Variável dependente: lâmina  
 Análise regressão múltipla

<b>Parâmetro</b>	<b>Estimado</b>	<b>Erro Padrão</b>	<b>P</b>
constante	0,00741276	0,0130863	0,5825
Modelo	0,983631	0,0308644	0,0000

Análise de Variância

	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>R<sup>2</sup></b> (%)	<b>R<sup>2</sup></b> (ajustado)	<b>EPE</b>	<b>EAM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regressão	1	0,80647	0,80647	98,93	98,83	0,02818	0,02167	1015,66	0,0000
Resíduo	11	0,00873	0,00079						

Temperatura de 80 °C  
 Variável dependente: tábua  
 Análise regressão múltipla

<b>Parâmetro</b>	<b>Estimado</b>	<b>Erro padrão</b>	<b>P</b>
constante	0,17839	0,07569	0,0380
Modelo	1,09413	0,12564	0,0000

Análise de Variância

	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>R<sup>2</sup></b> (%)	<b>R<sup>2</sup></b> (ajustado)	<b>EPE</b>	<b>EAM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regressão	1	2,05888	2,05888	87,33	86,18	0,16477	0,13534	75,84	0,0000
Resíduo	11	0,29864	0,02715						

Variável dependente: lâmina  
 Análise regressão múltipla

<b>Parâmetro</b>	<b>Estimado</b>	<b>Erro Padrão</b>	<b>P</b>
constante	0,094946	0,01999	0,0006
Modelo	0,92667	0,03318	0,0000

Análise de Variância

	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>R<sup>2</sup></b> (%)	<b>R<sup>2</sup></b> (ajustado)	<b>EPE</b>	<b>EAM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regressão	1	1,47696	1,47696	98,61	98,48	0,04352	0,03307	779,94	0,0000
Resíduo	11	0,02083	0,00189						

Análise de regressão múltipla (backward stepwise) da variável dependente tempo de secagem ( $t_s$ ) e as variáveis independentes: densidade básica (DB), teor de umidade inicial ( $Tu_i$ ), teor de umidade final ( $Tu_f$ ) e temperatura de secagem (T).

**a) Todas as variáveis**

	<b>B</b>	<b>t(19)</b>	<b>p</b>
Intercepto	167,973	10,4254	$2,68 \times 10^{-9}$
$Tu_i$	$2,66 \times 10^6$	$5,05 \times 10^5$	0,9999
$Tu_f$	3,4515	6,4823	$3,27 \times 10^6$
DB	-0,0376	-1,5111	0,1472
T	-2,0995	-38,4166	$1,77 \times 10^{-19}$

**b) Sem a variável  $Tu_i$**

	<b>B</b>	<b>t(20)</b>	<b>p</b>
Intercepto	167,9730	11,0149	$6,08 \times 10^{-10}$
$Tu_f$	3,4515	7,4085	$3,74 \times 10^{-7}$
DB	-00258	-1,5691	0,1323
T	0,0233	-41,6892	$6,43 \times 10^{-21}$

**c) Sem a variável  $Tu_i$  e DB (Análise Final)**

	<b>B</b>	<b>t(21)</b>	<b>p</b>
Intercepto	146,401	21,4539	$9,18 \times 10^{-16}$
$Tu_f$	3,7692	8,685739	$2,15 \times 10^{-8}$
T	-2,0882	-403339	$2,21 \times 10^{-21}$

	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>R<sup>2</sup></b> <b>(%)</b>	<b>R<sup>2</sup></b> <b>(ajustado)</b>	<b>EPE</b>	<b>EAM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regressão	2	29.517,32	14.758,66	98,80	98,68	4,1404	3,4600	860,9007	$7,08 \times 10^{-21}$
Resíduo	21	360,0089	17,1433						