

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM DE MADEIRA
EM ESTUFA COM BANHO DE VAPOR

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

SANDRO KEINE

FLORIANÓPOLIS, AGOSTO DE 1997.

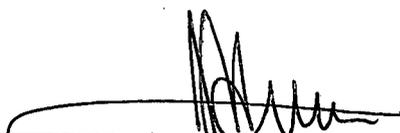
**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM DE MADEIRA
EM ESTUFA COM BANHO DE VAPOR**

SANDRO KEINE

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
ENGENHARIA E CIÊNCIAS TÉRMICAS, APROVADA EM SUA FORMA FINAL
PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**



Prof. José A. Bellini da Cunha Neto, Dr.

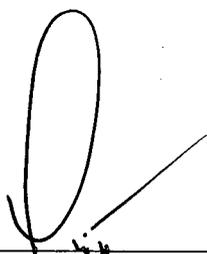
(Orientador)



Prof. Abelardo Alves de Queiroz, PhD

(Coordenador do Curso)

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Paulo César Philippi, Dr. Ing.



Prof. Sérgio Colle, D.Sc.



Prof. Carlos Alberto Szücs, Dr.

Aos meus pais, Levino e Maria

pelo amor e dedicação na minha formação

Ao meu irmão

Márcio

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao professor Sérgio Colle pela orientação inicial no desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor José Antônio Bellini da Cunha Neto pela orientação, dedicação, apoio e participação efetiva durante o desenvolvimento e conclusão do trabalho.

À Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela aceitação no referido curso.

À Banca Examinadora pela gentileza de aceitar o convite para avaliar o trabalho e pela aprovação da Dissertação de Mestrado.

A Rogério Lopes Buch, pela oportunidade concedida de iniciar minhas atividades profissionais no setor moveleiro e pelo incentivo recebido no início do Mestrado.

À diretoria do Grupo Rudnick, que permitiu e apoiou a realização do trabalho na empresa Móveis Alpes Ltda., incentivando a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico.

Aos meus amigos Alcides Grosch (Gerente Geral da Móveis Alpes Ltda.) e João P. B. Albuquerque (Mestre do Pátio e Secagem da Móveis Alpes Ltda.) pelo apoio, incentivo e liberdade concedidos, assim como pela oportunidade de realizar um trabalho científico com aplicação prática no ambiente industrial. Agradeço também toda a confiança depositada, contribuindo de forma fundamental no meu desenvolvimento pessoal.

Aos amigos Oliver Barge e Sílvio Rudnick, que tive a oportunidade de conhecer e admirar durante o período de execução deste trabalho.

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

MUITO OBRIGADO

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
NOMENCLATURA	x
LISTA DE FIGURAS	xvii
LISTA DE TABELAS	xxiii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - A ESTRUTURA DA MADEIRA	6
2.1 - Estrutura Macroscópica da Madeira	7
2.2 - Estrutura Microscópica da Madeira	14
2.2.1 - A Estrutura das Gimnospermas	16
2.2.2 - A Estrutura das Angiospermas	22
CAPÍTULO 3 - TRANSPORTE DE CALOR E UMIDADE NA MADEIRA	27
3.1 - A Madeira e a Umidade	27
3.1.1 - Umidade Relativa	29
3.1.2 - Umidade de Equilíbrio da Madeira	30
3.1.3 - Densidade e Gravidade Específica	34
3.1.4 - Conteúdo de Ar	35
3.1.5 - Retração e Inchamento	36
3.2 - Condutividade Térmica	40
3.3 - Capilaridade e Potencial da Água	40
3.3.1 - Tensão Superficial	40
3.3.2 - Tensão e Pressão Capilar	42
3.3.3 - Colapso na Madeira	48
3.3.4 - Aspiração das Pontoações	50
3.3.5 - Relação entre Potencial e Movimento da Umidade	51

3.3.6 - Comentários sobre Potencial da Água, Umidade de Equilíbrio e Ponto de Saturação das Fibras da Madeira _____	58
3.4 - Permeabilidade _____	61
3.4.1 - Lei de Darcy _____	62
3.4.2 - Tipos de Escoamento na Madeira _____	69
3.4.3 - Permeabilidade Específica _____	71
3.4.4 - Escoamento Não-Linear _____	76
3.4.5 - Efeito do Conteúdo de Umidade na Permeabilidade _____	77
3.4.6 - Permeabilidade da Parede Celular _____	77
3.4.7 - Variação da Permeabilidade com as Espécies _____	78
3.5 - Difusão na Madeira - Movimento da Umidade em Regime Permanente ____	80
3.5.1 - Coeficiente de Difusão da Água Higroscópica no Interior da Parede Celular _____	81
3.5.2 - A Influência do Conteúdo de Umidade e da Temperatura ____	86
3.5.3 - Coeficiente de Difusão do Vapor no Lumen _____	87
CAPÍTULO 4 - O PROCESSO DE SECAGEM _____	91
4.1 - Definição de Secagem _____	91
4.2 - Características Gerais _____	91
4.3 - Gradiente de Umidade _____	93
4.4 - Fatores que influenciam a Taxa de Secagem _____	95
4.5 - Métodos de Secagem _____	97
4.5.1 - Secagem Natural _____	97
4.5.2 - Secagem Artificial Controlada _____	99
4.5.2.1 - Secagem Forçada ou Pré-Secagem _____	99
4.5.2.2 - Secagem Convencional _____	101
4.5.2.3 - Secagem por Desumidificação _____	105
4.5.2.4 - Secagem a Altas Temperaturas _____	105
4.5.2.5 - Secagem com Aumento Constante de Temperatura ____	107
4.5.2.6 - Secagem a Vácuo _____	108

4.5.2.7 - Secagem Solar	110
4.5.3 - Vaporização na Secagem	110
4.5.3.1 - Pré-Vaporização	111
4.5.3.2 - Vaporização Final	112
4.6 - Variáveis do Processo de Secagem inerentes à Estufa	114
4.6.1 - Circulação do Ar	115
4.6.2 - Temperatura	116
4.6.3 - Umidade Relativa	116
4.7 - Relacionamento entre as Variáveis	117
4.8 - Defeitos de Secagem	118
4.8.1 - Empenamento	119
4.8.2 - Rachaduras	121
4.8.3 - Encruamento	123
4.8.4 - Colapso	123
CAPÍTULO 5 - OBSERVAÇÕES EXPERIMENTAIS	125
5.1 - Estufas utilizadas	125
5.2 - Madeiras utilizadas	129
5.3 - Processos de Secagem	129
5.3.1 - Processo de Secagem com Banho de Vapor	130
5.3.2 - Processo de Secagem Convencional	131
5.4 - Medição das Temperaturas	132
5.5 - Medição de Umidade da Madeira	133
5.5.1 - Amostragem	133
5.5.2 - Pesagem	137
5.5.3 - Método da Pesagem x Método Elétrico	137
5.6 - Sentido dos Anéis de Crescimento nas Amostras	139
5.7 - Registro dos Dados	139
5.8 - Qualificação da Secagem	140

5.9 - Secagem Natural	144
CAPÍTULO 6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	146
6.1 - Processo Convencional	146
6.1.1 - Programa de Secagem	146
6.1.2 - Tempo de Secagem	146
6.1.3 - Qualificação da Secagem	147
6.2 - Processo de Secagem com Banho de Vapor (CRT)	148
6.2.1 - Primeira Secagem do Curupixá em Estufa	148
6.2.2 - Segunda Secagem do Curupixá em Estufa	153
6.2.3 - Terceira Secagem do Curupixá em Estufa	154
6.2.4 - Quarta Secagem do Curupixá em Estufa	157
6.2.5 - Quinta Secagem do Curupixá em Estufa	158
6.2.6 - Sexta Secagem do Curupixá em Estufa	159
6.2.7 - Sétima Secagem do Curupixá em Estufa	160
6.2.8 - Oitava Secagem do Curupixá em Estufa	162
6.2.9 - Nona Secagem do Curupixá em Estufa	163
6.2.10 - Primeira Secagem do Eucalipto em Estufa	164
6.2.11 - Segunda Secagem do Eucalipto em Estufa	166
6.2.12 - Terceira Secagem do Eucalipto em Estufa	167
6.2.13 - Heterogeneidades na Secagem em Estufa	168
6.3 - Secagem Natural	170
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES	174
APÊNDICE A - CONDUTIVIDADE TÉRMICA	177
APÊNDICE B - MODELOS DE PERMEABILIDADE APLICÁVEIS À	
MADEIRA	197
APÊNDICE C - MODELOS DE DIFUSÃO NA MADEIRA	205
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	211

RESUMO

O presente trabalho trata da secagem artificial de madeiras tropicais em estufas. Uma revisão da teoria dos processos de transporte de calor e massa na estrutura da madeira é apresentada. Os procedimentos usuais de secagem são descritos e alguns modelos para a estimação das propriedades de transporte são indicados.

Foram observados em campo os procedimentos de secagem de duas espécies de madeira, curupixá (*Rauwolfia Paraensis Ducke*) e eucalipto (*Eucalyptus Grandis*), em pranchas com espessuras entre 27 mm e 50 mm. As condições iniciais da madeira foram: verde (conteúdo mássico de umidade acima de 30%) e pré-seca (conteúdo mássico de umidade inferior a 30%). O processo observado é de secagem com banho de vapor saturado, com aumento constante de temperatura. As evoluções das temperaturas de bulbo seco e úmido do ar no interior da estufa, assim como os conteúdos de umidade das amostras de controle foram registrados e analisados.

O trabalho foi desenvolvido no ambiente industrial, valendo-se apenas dos equipamentos de medida já instalados. O controle do processo é manual e empírico, submetido à experiência pessoal do operador.

Ao final de algumas secagens foi realizada uma inspeção da distribuição da umidade da carga para as duas espécies observadas. Os processos de secagem em estufa, convencional e com banho de vapor, são comparados em termos do tempo de secagem e da homogeneidade final de umidade na carga de madeira. Adicionalmente, a secagem natural de pranchas de eucalipto de diferentes espessuras foi comparada com a secagem em estufa com banho de vapor da mesma madeira.

Os resultados obtidos indicam que o processo com banho de vapor saturado resulta numa redução considerável do tempo de secagem e numa melhor qualidade do produto para uso na indústria moveleira, quando comparado à secagem natural e à secagem artificial em estufa pelo processo convencional.

ABSTRACT

This work is about kiln thermal drying of lumber. At first, a review of wood structure and its roles in heat and mass transport phenomena are presented. Some usual drying process are described and, in the Appendix, some models to estimate wood transport properties are suggested.

Industrial drying of two specimens were observed: a tropical wood, known as “curupixá” (*Rauwolfia Paraensis Ducke*) and an eucalyptus (*Eucalyptus Grandis*). Initial conditions of lumber were green wood (moisture content above 30%) and pre-dried wood (moisture content below 30%). It is emphasized a sort of “Continuously Rising Temperature” process associated to presteaming and final saturated steam bath.

Time evolutions of dry-bulb and wet-bulb temperatures of recirculating air in the kiln, as well as, mass reduction of lumber samples, were acquired and explored.

All the field work has been developed in industrial environment, using ordinary equipment available in the plant. Drying process control is manual, subjected to the personal feeling of operator.

Inspections of moisture content distribution in kiln load, performed at the end of drying process shows advantages of presteaming and steam-relief vapor bath over conventional oven drying. Additionally, natural (weather exposure) drying of eucalyptus lumber is compared to kiln vapor drying of same wood, in terms of drying time and final moisture content.

NOMENCLATURA

A	Área da seção transversal perpendicular ao fluxo	(m ²)
a	Razão entre a dimensão do lumen e da célula da madeira	
a _i	Fração de área de cada componente da condutância	
a _v	Fração de área de capilares circulares, paralelos e uniformes	
AH	Umidade absoluta do ar	(kg/m ³)
Ah _o	Umidade absoluta de saturação do ar	(kg/m ³)
C	Constante	
d _L	Diâmetro da cavidade celular	(m)
D	Coefficiente de difusão do vapor na madeira	(m ² /s)
D _a	Coefficiente de interdifusão do vapor no ar	(m ² /s)
D _{BL}	Coefficiente de difusão longitudinal da água de adesão	(m ² /s)
D _{BT}	Coefficiente de difusão transversal da água de adesão	(m ² /s)
D _T	Coefficiente de difusão transversal do vapor	(m ² /s)
D _L	Coefficiente de difusão longitudinal do vapor	(m ² /s)
D _{TM}	Coefficiente de difusão transversal médio	(m ² /s)
D _v	Coefficiente de interdifusão de acordo com isoterma de sorção	(m ² /s)
dA	Diferencial de área	(m ²)
dx	Diferencial da distância X	(m)
dW	Trabalho	(W)
e	Espessura	(m)
E _b	Energia de ativação	(J/mol)
F	Força	(N)
g	Condutância	(J/sK)

g^*	Aceleração da gravidade	(m/s ²)
g_T	Condutância transversal da madeira	(J/sK)
g_t	Condutância da traqueide	(J/sK)
g_p	Condutância da pontoação	(J/sK)
g_1	Condutância da seção 1	(J/sK)
g_2	Condutância da seção 2	(J/sK)
g_3	Condutância da seção 3	(J/sK)
g_4	Condutância da seção 4	(J/sK)
g_5	Condutância da seção 5	(J/sK)
g_6	Condutância da seção 6	(J/sK)
G	Gravidade específica da madeira	
G_f	Gravidade específica da madeira no PSF	
G_o	Gravidade específica da madeira seca em estufa	
G_M	Gravidade específica da parede celular úmida	
h^*	Coefficiente de convecção	(W/m ² K)
h	Pressão relativa do vapor	
k	Permeabilidade da madeira	(m/Ns)
k^*	Correção para a expansão do gás	
k_g	Permeabilidade superficial ao gás	(m/Ns)
k_{gl}	Permeabilidade longitudinal ao gás	(m/Ns)
k_L	Permeabilidade longitudinal	(m/Ns)
k_T	Permeabilidade transversal	(m/Ns)
k_{L_t}	Permeabilidade superficial ao gás na traqueide	(m/Ns)
k_{L_p}	Permeabilidade superficial ao gás na pontoação	(m/Ns)
K	Condutividade térmica	(W/mK)

K^*	Permeabilidade específica da madeira	(m^3/m)
K_a	Condutividade térmica do ar	(W/mK)
K_c	Fator de <i>Clausing</i>	
K_{gl}	Condutividade térmica longitudinal da madeira	(W/mK)
K_{gT}	Condutividade térmica transversal da madeira	(W/mK)
K_T	Condutividade térmica transversal do material da parede celular	(W/mK)
K_L	Condutividade térmica longitudinal do material da parede celular	(W/mK)
L	Comprimento	(m)
L^*	Comprimento efetivo onde a camada limite se desenvolve	(m)
L'	Correção para o efeito de borda em capilares curtos	(m)
L_t	Comprimento da traqueíde	(m)
L_{lt}	Comprimento total da parte da traqueíde	(m)
L_{lp}	Comprimento total da parte da pontoação	(m)
m	Coefficiente para as perdas de energia cinética e efeito de bordas	
m_a	Massa de água que se movimenta na madeira	(kg)
M	Conteúdo mássico de umidade da madeira	(%)
M_i	Conteúdo mássico de umidade inicial da madeira	(%)
M_m	Conteúdo mássico médio de umidade da madeira	(%)
M_1	Conteúdo mássico de umidade mais elevado	(%)
M_2	Conteúdo mássico de umidade mais baixo	(%)
M_{max}	Máximo conteúdo mássico de umidade da madeira	(%)
M_{psf}	Conteúdo mássico de umidade da madeira no PSF	(%)
M^*	Lamela média da parede celular	
$M+P$	Lamela média primária	
M_w	Peso molecular da água	(kg/mol)

n	Número de moles do gás	
n'	Número de capilares por unidade de área	(m^{-2})
N	Número de capilares circulares paralelos	
P	Pressão	(Pa)
P_o	Pressão na fase gasosa	(Pa)
P_1	Pressão na saída do material	(Pa)
P_2	Pressão na entrada do material	(Pa)
P'	Parede celular primária	
p	Pressão parcial do vapor	(Pa)
P_a	Pressão atmosférica	(Pa)
p_{ar}	Pressão parcial do ar	(Pa)
p_o	Pressão do vapor saturado	(Pa)
P_a	Massa da água removida durante a secagem	(kg)
P_{umido}	Massa da madeira na condição úmida	(kg)
P_{uc}	Massa da madeira úmida corrente	(kg)
P_{seco}	Massa da madeira na condição seca em estufa a 103°C	(kg)
P_m	Pressão média	(Pa)
PS	Quociente de Secagem	
PSF	Ponto de saturação das fibras	(%)
Q	Vazão	(m^3/s)
Q'	Quantidade de calor transferido	(J)
R	Resistência elétrica da madeira	(sK/J)
R_1	Resistência térmica da seção 1	(sK/J)
R_2	Resistência térmica da seção 2	(sK/J)

R_3	Resistência térmica da seção 3	(sK/J)
R_c	Raio do cilindro	(m)
r	Raio do capilar	(m)
r_c	Raio externo do cilindro	(m)
r_i	Raio da interface gás/líquido	(m)
r_{ic}	Raio interno do cilindro	(m)
Re	Número de Reynolds	
Re'	Número de Reynolds crítico para escoamento não-linear	
Re''	Número de Reynolds crítico para escoamento turbulento	
rs	Rapidez da secagem	
R_T	Resistência térmica da madeira na direção transversal	(sK/J)
R_t	Resistência térmica total da madeira	(sK/J)
R^*	Constante universal dos gases	(J/mol K)
r^*	Resistividade	(mKs/J)
r_t	Raio da traqueíde	(m)
s	Fator para a difusão de Knudsen	
$S1$	Camada externa da parede secundária	
$S2$	Camada intermediária da parede secundária	
$S3$	Camada interna da parede secundária	
T	Temperatura	(K)
t	Intervalo de tempo	(s)
U	Condutância	(W/m ² K)
U_m	Condutância média da área total	(W/m ² K)
U_i	Condutância de cada fração de área	(W/m ² K)
UE	Umidade de Equilíbrio da Madeira	(%)

UR	Umidade relativa do ar	(%)
UR ₁	Umidade relativa do ar na condição 1	(%)
UR ₂	Umidade relativa do ar na condição 2	(%)
V	Volume da madeira	(m ³)
V _{úmido}	Volume da madeira na condição úmida	(m ³)
V _{seco}	Volume da madeira na condição seca	(m ³)
v	Velocidade média do escoamento do ar	(m/s)
v _a	Conteúdo de ar	
v _m	Velocidade média do escoamento do fluido	(m/s)
v _w	Porosidade da madeira	
W	Conteúdo de umidade do ar	(kg/kg)
w	Massa de vapor	(kg)
w ₁	Fração da parede celular adjacente ao lumen que é condutiva	
X	Distância na direção do escoamento	(m)
Y	Logaritmo da pressão de saturação de vapor	
Z	Coefficiente de correção	
z	Diferença de altura	(m)
α	Fator de sobreposição entre as células adjacentes da madeira	
α _{VU}	Fator de inchamento volumétrico de 0% até M%	(%)
α _{Vmax}	Inchamento volumétrico máximo da madeira	(%)
β _{Vmax}	Retração volumétrica máxima da madeira	(%)
Δc	Diferença de concentração	(kg/m ³)
ΔM	Diferença de conteúdo mássico de umidade	(%)
ΔT	Diferença de temperatura entre faces	(K)

ΔP	Diferença de pressão entre faces	(Pa)
ΔUR	Diferença de umidade relativa do ar	(%)
ψ	Potencial da água	(Pa)
ψ_s	Potencial químico	(Pa)
ψ_p	Potencial de pressão	(Pa)
ψ_g	Potencial gravitacional	(Pa)
ψ_m	Potencial matricial	(Pa)
λ	Caminho livre médio das moléculas de gás	(m)
μ	Viscosidade do fluido	(Ns/m ²)
μ_1	Potencial químico do vapor	(Pa)
μ_1°	Potencial químico do vapor saturado	(Pa)
ρ	Densidade da madeira	(kg/m ³)
ρ_w	Densidade da água	(kg/m ³)
ρ_{seco}	Massa específica da madeira seca em estufa	(kg/m ³)
π	Pi = 3.1415	
σ	Tensão superficial	(N/m)
θ	Correção de temperatura	

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Direções preferenciais da madeira.	9
Figura 2.2 - Seção de um tronco típico de árvore.	10
Figura 2.3 - Anel de crescimento de uma gimnosperma (<i>Tsuga canadensis</i>).	12
Figura 2.4 - Relação entre os constituintes da parede celular de uma conífera.	15
Figura 2.5 - Estrutura macroscópica de uma conífera nos três planos anatômicos da madeira.	17
Figura 2.6 - Relação entre a traqueíde e as direções da madeira. Onde L é a direção longitudinal e T é a tangencial	19
Figura 2.7 - Par de pontoação areolada: A- Toro em posição normal; B: Pontoação aspirada; C: Vista frontal do toro no centro da pontoação.	20
Figura 2.8 - Estrutura macroscópica de uma madeira dura mostrando os três planos anatômicos.	24
Figura 2.9 -Micrografia eletrônica de uma madeira dura mostrando seus elementos.	25
Figura 2.10 - Pontoação areolada no vaso de uma madeira dura.	26
Figura 3.1 - Isoterma de sorção da madeira para três temperaturas.	34
Figura 3.2 -Ilustração do aumento de uma bolha gasosa em um líquido através do trabalho pressão-volume para aumentar a área da interface líquido-gás.	43
Figura 3.3 - Capilaridade: a) Líquido molha o capilar; b) Líquido não molha o capilar.	44
Figura 3.4 - Pressão diferencial ou potencial de água negativo através de um menisco em um capilar de raio r .	47
Figura 3.5 - Mecanismo do colapso.	50
Figura 3.6 - Potencial da água do ar insaturado versus pressão relativa de vapor.	54

Figura 3.7 - Relação entre o raio r do capilar cheio de água e a pressão de vapor reduzida em equilíbrio a 40°C .	58
Figura 3.8 - Corpo permeável ilustrando os termos da lei de Darcy.	65
Figura 3.9 - Fluxo através de um cilindro. Fluxo é perpendicular à superfície cilíndrica.	69
Figura 3.10 - Modelo de escoamento longitudinal baseado em capilares circulares, uniformes e paralelos.	75
Figura 3.11 - Coeficiente de difusão longitudinal da substância da parede celular como função do conteúdo de umidade da madeira.	82
Figura 3.12 - Relação entre os coeficientes de difusão e o conteúdo de umidade para uma temperatura constante.	85
Figura 3.13 - Diminuição do ponto de saturação das fibras com a temperatura.	85
Figura 3.14 - Valores para os coeficientes de difusão para várias temperaturas.	88
Figura 3.15 - Diferenças de concentração entre as paredes celulares e o lumen.	89
Figura 4.1 - Curvas de secagem esquemáticas dos processos de secagem CRT e convencional.	108
Figura 4.2 - Curvas de umidade de equilíbrio da madeira para diferentes temperaturas de bulbo seco e úmido	118
Figura 4.3 - Encanoamento da peça de madeira.	119
Figura 4.4 - Encurvamento simples e complexo da peça de madeira.	120
Figura 4.5 - Arqueamento da peça de madeira.	120
Figura 4.6 - Torcimento da peça de madeira.	121
Figura 4.7 - Rachaduras em favos na madeira.	122
Figura 4.8 - Colapso em uma peça de madeira.	124
Figura 5.1 - Foto ilustrando a vista frontal da estufa de secagem de madeira	127

Figura 5.2 - Foto ilustrando a vista interna da estufa de secagem de madeira	127
Figura 5.3 - Seção transversal esquemática das estufas de secagem de madeira	128
Figura 5.4 - Seção longitudinal esquemática das estufas de secagem de madeira.	128
Figura 5.5 - Preparação das amostras de controle e seções de madeira.	135
Figura 5.6 - Foto que ilustra a sala de controle das estufas de secagem de madeira.	136
Figura 5.7 - Foto que ilustra a porta de inspeção e 4 amostras de controle.	136
Figura 5.8 - Comparação dos métodos de medição de umidade elétrico e gravimétrico.	138
Figura 5.9 - Retirada dos corpos de prova de uma tábua.	141
Figura 5.10 - Preparo do corpo de prova para o teste de tensões.	142
Figura 5.11 - Resultados preliminares do teste de tensão. II - A madeira está provavelmente livre de tensões; I e III - A madeira está com tensões.	143
Figura 5.12 - Resultados finais do teste de tensões. I - A madeira está com encruamento; II - Madeira livre de tensões; III - A madeira está com encruamento.	143
Figura 5.13 - Madeira sendo gradeada em pilha para a secagem natural.	144
Figura 5.14 - Foto ilustrando o pátio de secagem de madeira natural.	145
Figura 6.1 - Variação de umidade na carga de madeira de curupixá 40 mm. Secagem convencional.	147
Figura 6.2 - Primeira secagem em estufa de curupixá 27 mm. Secagem com banho de vapor.	149
Figura 6.3 - Temperaturas de bulbo seco, úmido e umidade relativa no insuflamento e no retorno durante a secagem com banho de vapor.	152
Figura 6.4 - Temperaturas de bulbo seco, úmido e umidade relativa no insuflamento e no retorno durante a secagem com banho de vapor.	152

- Figura 6.5** - Segunda secagem em estufa de curupixá 27mm. Secagem com banho de vapor. 154
- Figura 6.6** - Terceira secagem em estufa de curupixá 27mm. Secagem com banho de vapor. 156
- Figura 6.7** - Sentido do corte da prancha em relação aos anéis de crescimento, para as amostras da terceira secagem com banho de vapor. 156
- Figura 6.8** - Quarta secagem em estufa de curupixá 27mm. Secagem com banho de vapor. 158
- Figura 6.9** - Quinta secagem em estufa de curupixá 40mm. Secagem com banho de vapor. 159
- Figura 6.10** - Sexta secagem em estufa de curupixá 27mm. Secagem com banho de vapor. 160
- Figura 6.11** - Sétima secagem em estufa de curupixá 27mm. Secagem com banho de vapor. 161
- Figura 6.12** - Oitava secagem em estufa de curupixá 27mm. Secagem com banho de vapor. 162
- Figura 6.13** - Nona secagem em estufa de curupixá 27mm. Secagem com banho de vapor. 163
- Figura 6.14** - Primeira secagem em estufa de eucalipto 52mm. Secagem com banho de vapor. 165
- Figura 6.15** - Segunda secagem em estufa de eucalipto 52mm. Secagem com banho de vapor. 166
- Figura 6.16** - Terceira secagem em estufa de eucalipto 27 e 40mm. Secagem com banho de vapor. 167

Figura 6.17 - Distribuição espacial do conteúdo de umidade na pilha de madeira de curupixá 27mm após secagem em estufa com banho de vapor.	169
Figura 6.18 - Distribuição espacial do conteúdo de umidade na pilha de madeira de eucalipto 27mm após secagem em estufa com banho de vapor.	170
Figura 6.19 - Secagem natural do eucalipto de 40 mm (1.5 polegadas)	172
Figura 6.20 - Comparação das taxas de secagem natural e em estufa com banho de vapor em função do conteúdo de umidade para eucalipto de diferentes espessuras.	173
Figura A.1 - Significado dos termos da lei de Fourier.	179
Figura A.2 - Modelo geométrico que representa a equação (A.3).	182
Figura A.3 - Modelo geométrico para uma célula unitária da madeira.	183
Figura A.4 - Circuito elétrico análogo para a condutância.	183
Figura A.5 - Concentração de fluxos aproximados através das paredes celulares.	187
Figura A.6 - Modelo de condução transversal.	188
Figura A.7 - Parâmetro Z como função da variável a para a porosidade.	190
Figura A.8 - Parâmetro a como função da gravidade específica e densidade para vários conteúdos de umidade. As linhas contínuas representam a gravidade específica e as linhas tracejadas representam a densidade.	190
Figura A.9 - Porosidade como função da gravidade específica.	191
Figura A.10 - Condutividade térmica transversal da literatura, como uma função da fração de volume da substância da parede celular.	191
Figura A.11 - Condutividade térmica transversal da madeira versus fração de volume da substância da parede celular.	192
Figura A.12 - Relação entre as condutividades térmicas longitudinais e transversais	

como função da fração do volume da substância da parede celular.	193
Figura B.1 - Permeabilidade longitudinal em regime estacionário versus pressão média.	200
Figura B.2 - Ilustração do modelo de Comstock para uma madeira mole. Seção tangencial mostra as pontoações nas superfícies radiais das extremidades sobrepostas das traqueídes.	203
Figura C.1 - Modelo de difusão longitudinal. (a) Geometria celular e (b) elementos significantes do modelo geométrico.	209
Figura C.2 - Coeficientes de difusão longitudinal e transversal para a madeira com gravidade específica de 0.5.	210

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Condutividades Térmicas de diversos materiais.	40
Tabela 3.2 - Valor do Potencial da Água para vários raios de Capilares com a correspondente valor da umidade relativa do ar.	57
Tabela 6.1 - Programa de Secagem do Curupixá 40 mm.	146

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A madeira pode ser considerada como um dos mais antigos materiais, juntamente com a pedra e as folhas das árvores, utilizados pelo homem. A madeira sempre esteve colocada à disposição do homem pela natureza.

Ela é um material que acompanha o homem em praticamente todas as atividades ao longo de sua existência, ou seja, do berço ao túmulo. É um material encontrado, com raras exceções, em praticamente todas as partes da terra, em maior ou menor quantidade. Existe uma grande variedade de árvores, cada uma com características especiais, possibilitando uma ampla faixa de aplicações. Pode-se dizer que todos os estilos arquitetônicos tem na madeira, em maior ou menor quantidade, o material para a estrutura, acabamento ou decoração. Como exemplo pode-se citar as casas, portas, janelas, móveis, barcos, cercas, lambris, assoalhos, instrumentos musicais, carrocerias de caminhão, etc.

Nas eras atômica e da informática com seus desenvolvimentos tecnológicos revolucionários, a madeira como matéria-prima ocupa uma importante posição na indústria. Em diversos campos novos materiais na forma de produtos sintéticos (ligas metálicas, plásticos, etc.) tem se constituído sérios competidores para a madeira, mesmo substituindo-a em muitas aplicações. Porém, o uso da madeira tem crescido muito após a Segunda Guerra Mundial.

A produção de tábuas de madeira a partir de florestas em países altamente desenvolvidos não é suficiente para suprir suas necessidades. A Alemanha, por exemplo, que possui uma área florestal de 28% e que não pode ser considerada como um país pobre em recursos florestais, tem que importar mais de 2 milhões de metros cúbicos de madeira na forma de toras e aproximadamente 2.8 milhões de metros cúbicos de tábuas serradas anualmente.

Com o desenvolvimento de plásticos de alta resistência, novas aplicações foram desenvolvidas para a madeira, que poderiam ser inconcebíveis a alguns anos atrás. Como exemplo

pode-se citar o desenvolvimento das placas de partículas de madeira (aglomerado), a placa de fibras de madeira de média densidade (MDF ou *Medium Density Fiberboard*), compensados a prova d'água, construções com madeira colada e modernas técnicas de revestimento de superfícies, resultando em muitas alternativas de novas matérias-primas para a indústria do mobiliário.

As propriedades específicas de aplicação tais como boa resistência com baixo peso específico, facilidade de usinagem e boa capacidade de isolamento térmico, tem se constituído em importantes argumentos para consolidar a aplicação da madeira na indústria da construção civil. Cada peça de madeira dentro de uma sala é sempre uma parte de uma floresta. A madeira irradia sua tranquilidade, calor, porte e beleza, ou seja, a madeira é viva e ela tem sua alma.

A importância da madeira na economia mundial é mostrada nas seguintes estatísticas da FAO (*Food and Agricultural Organization* da ONU) (1996).

Região	Área Total de Floresta milhões ha	Crescimento Anual milhões m ³	Produção Anual de madeira, milhões m ³
Europa	138	297	233
Ex-URSS	738	750	277
América do Norte	710	536	370
América Central e do Sul	901	87	35
África	700	56	26
Ásia	500	335	128
Zona do Pacífico	92	19	18
Total Mundial	3779	2080	1087

As estatísticas mostram a quantidade de produção de madeira e de produtos de madeira usados cada ano. Florestas virgens dos países em desenvolvimento possuem grandes reservas de madeira que, no futuro próximo, tornar-se-ão reservas florestais. Esta perspectiva tem incentivado o desenvolvimento de espécies reflorestáveis com rápidos desenvolvimento e retorno

financeiro. É importante ressaltar que a maioria dos produtos da madeira estão concentrados nas tábuas serradas de diferentes tamanhos.

A madeira difere dos demais materiais utilizados pelo homem em sua origem biológica, a árvore. Como a maior parte dos seres vivos, a madeira é formada em um ambiente saturado de umidade. Após o corte, exposta ao ambiente, a madeira começa a perder água em virtude da interrupção de seu contato com o solo e da transformação da árvore em tábuas (fatias). Associadas às perdas de umidade estão as variações das propriedades físicas da madeira, importantes em sua aplicação subsequente.

A utilização da madeira como material estrutural está relacionada à sua estabilidade dimensional, que por sua vez depende diretamente da umidade contida em suas células. A umidade ideal para as aplicações, notadamente na indústria moveleira, é consideravelmente menor do que aquelas apresentadas pela árvore viva. A umidade das tábuas de madeira recém cortadas fica entre 95 a 120% de sua massa seca para as madeiras duras, sendo que a umidade pode chegar a 200% para as madeiras moles como o pinus. A aplicação na indústria moveleira exige, para as condições brasileiras, que a madeira possua uma umidade entre 8 a 12%. Para o mercado mobiliário exportador, esta faixa restringe-se entre 6 a 10%. Assim, a madeira deverá necessariamente passar por um processo de secagem conveniente antes de qualquer outra operação manufatureira.

A secagem da madeira apresenta uma série de importantes vantagens, que podem ser vistas a seguir:

- substancial redução do peso, com a conseqüente diminuição dos custos de transporte;
- aumento da resistência da madeira após a secagem contra fungos manchadores e apodrecedores, os bolores e a maioria dos insetos que a atacam;
- as contrações que acompanham a secagem ocorrem antes da madeira ser transformada no produto final;

-a secagem melhora a maioria das propriedades mecânicas da madeira, tais como resistência à compressão, resistência à flexão, dureza, etc.;

-a resistência das uniões ou juntas feitas com pregos e parafusos é maior em madeira seca do que em madeira em estado verde (umidade acima de 35%);

-a madeira úmida não é adequada para a colagem ou tratamento com preservantes pela maioria dos processos;

-a maioria das deformações, empenamentos e rachamentos da madeira ocorrem durante a secagem. Produtos de madeira feitos com madeira seca estarão livres da ocorrência desses defeitos;

-a madeira somente pode receber pintura, verniz, laca e outros acabamentos se, pelo menos for seca ao ar (umidade aproximada de 15 a 20%);

-a secagem aumenta a resistência elétrica da madeira, tornando-a isolante e melhorando sua propriedade de isolamento térmico;

-a secagem é fundamental para a usinagem, ou seja, torneamento, fresagem, furação, lixamento, etc.;

Somente o desconhecimento das características da madeira pode justificar o uso da madeira com elevados teores de umidade, principalmente nas suas aplicações mais nobres.

O trabalho será desenvolvido de modo a fornecer uma visão geral sobre o material poroso madeira, onde serão abordados tópicos como a estrutura da madeira, transporte de calor e massa nesse meio (capilaridade, condutividade, permeabilidade, difusão), o processo de secagem e as observações experimentais. A fundamentação teórica será desenvolvida com relativo aprofundamento para permitir o conhecimento deste material, para que se possa compreender sua complexidade. As observações experimentais mostram resultados verificados em experimentos no campo (plantas industriais) do processo de secagem com banho de vapor, onde foram registrados dados de diversas secagem de madeira das espécies Curupixá e Eucalipto para espessuras

variadas. Estes resultados não possuem toda a precisão que se pode obter em laboratório, mas servem como uma boa orientação na qualificação e descrição deste processo de secagem. Estes resultados são discutidos e analisados com base na fundamentação anteriormente apresentada. O presente trabalho não estuda em detalhes todos os parâmetros envolvidos, mas apresenta uma visão ampla de um processo industrial que não possui muitos dados e informações disponíveis no Brasil, especialmente para a secagem do Eucalipto.

CAPÍTULO 2 - A ESTRUTURA DA MADEIRA

Existem diversos tipos de árvores na natureza e que possibilitam ao homem uma exploração e conseqüente utilização variada em função dos objetivos que se deseja. Para se classificar as diversas espécies, usualmente consideram-se as características comuns para agrupá-las em famílias. Normalmente utiliza-se características como formato dos frutos, tipos de folhas, estrutura interna da madeira, dentre outros considerados pela botânica.

Desta forma, as madeiras podem ser classificadas em Gimnospermas e Angiospermas. A família das Angiospermas divide-se em duas classes: Monocotiledôneas e Dicotiledôneas. As principais fontes de madeiras comerciais são as árvores coníferas, da família das Gimnospermas e Dicotiledôneas. As coníferas originam as madeiras conhecidas como coníferas, como por exemplo o pinheiro araucária e o pinus. As dicotiledôneas originam usualmente as madeiras conhecidas como dicotiledôneas, como por exemplo imbuia, cedro, curupixá, eucalipto, jatobá e cerejeira. Dentre as monocotiledôneas tem-se o bambu e a palmeira, que são uma importante fonte de material estrutural usada para construções simples. O tecido lenhoso destas monocotiledôneas não permite que sejam produzidas tábuas em função de seu aspecto fibroso. Nas árvores de dicotiledôneas e coníferas, o tecido lenhoso é contínuo e sua homogeneidade permite a conversão em tábuas. Existem diversas diferenças estruturais entre coníferas (conífera) e dicotiledôneas (dicotiledôneas). Estas diferenças podem ser analisadas com maiores detalhes na seqüência deste capítulo.

Uma árvore adulta, seja de conífera ou de dicotiledônea, geralmente consiste de um único caule que é revestido com uma camada externa de proteção denominada casca, a qual protege um tronco central. Este tronco central é a principal fonte de tecido lenhoso para a produção de madeira serrada na forma de tábuas e outros produtos. Quando existe a intenção da utilização da maior parte da árvore, a conversão dos topos e galhos da árvore em material útil é feita somente

se é economicamente viável. Estas partes podem ser convertidas em cavacos para a formação de pasta mecânica para papel ou de birutas (partículas de madeira com dimensões definidas) para a fabricação de madeira aglomerada.

2.1 - Estrutura Macroscópica da Madeira

As características macroscópicas da madeira são definidas como aquelas que são visíveis a olho nu ou com a ajuda de lupas. Como exemplo destas características, pode-se enumerar os anéis de crescimento, diferenças entre alburno (brancal) e cerne, raios, padrões de distribuição de células e casca (Kollmann e Côté, 1968).

Composição celular. O tronco de uma árvore é formado de milhões de células lenhosas individuais, diferenciadas entre si em tamanho e formato, dependendo da fisiologia da árvore. Elas estão arranjadas em padrões reconhecíveis de distribuição de células, sendo que a organização varia dependendo da espécie considerada. As células compridas que estão alinhadas longitudinalmente formam a maior parte do tecido lenhoso e estabelecem desta forma os veios (grã) da madeira. Na maior parte dos casos, as células do tecido lenhoso são mais compridas que largas.

Raios. Existem também células mais curtas na árvore, células que são orientadas perpendicularmente aos elementos longitudinais e organizadas em faixas de tecido denominadas raios. As células encontradas nos raios são células parenquimáticas, especializadas no armazenamento de alimento. A presença e estrutura deste elemento, o comprimento, a largura e a composição do raio são configurações freqüentemente utilizadas para a identificação de espécies de madeira. Além da função de armazenamento, os raios também fazem o transporte horizontal de

nutrientes na árvore. Rachaduras superficiais (fendilhado) na madeira ocorrem mais facilmente no sentido das fibras (grã) e particularmente no plano dos raios (Richter, 1991).

Planos da madeira. Quando se fala em elementos estruturais e características da madeira, é conveniente especificar a referência ou ponto de vista, com respeito aos três planos principais, seção transversal, radial e tangencial. Cortando perpendicularmente à direção do comprimento do caule obtém-se uma superfície que é denominada seção transversal. A seção radial resulta do corte na direção longitudinal no plano dos raios da medula até a casca. O plano que é perpendicular aos raios e tangente aos anéis de crescimento é conhecido como seção tangencial. A direção longitudinal é perpendicular ao plano transversal. A direção tangencial é perpendicular ao plano radial, enquanto que a direção radial é perpendicular ao plano tangencial. As direções preferenciais da madeira, perpendiculares aos respectivos planos acima descritos, podem ser vistos na figura 2.1(Richter, 1991).

A extremidade da grã e os raios são visíveis na seção transversal. Neste plano também é possível visualizar os incrementos de crescimento como anéis concêntricos. A extensão do desenvolvimento do cerne também pode ser observada neste plano, mas ambas as estruturas podem ser observadas na seção radial. As extremidades dos raios tornam-se visíveis na seção tangencial e o padrão formado por eles nesta superfície proporcionam evidências para diagnósticos em algumas situações. Os raios na seção radial dão a aparência de faixas quebradas e, dependendo do seu tamanho e contraste, podem produzir padrões distintos.

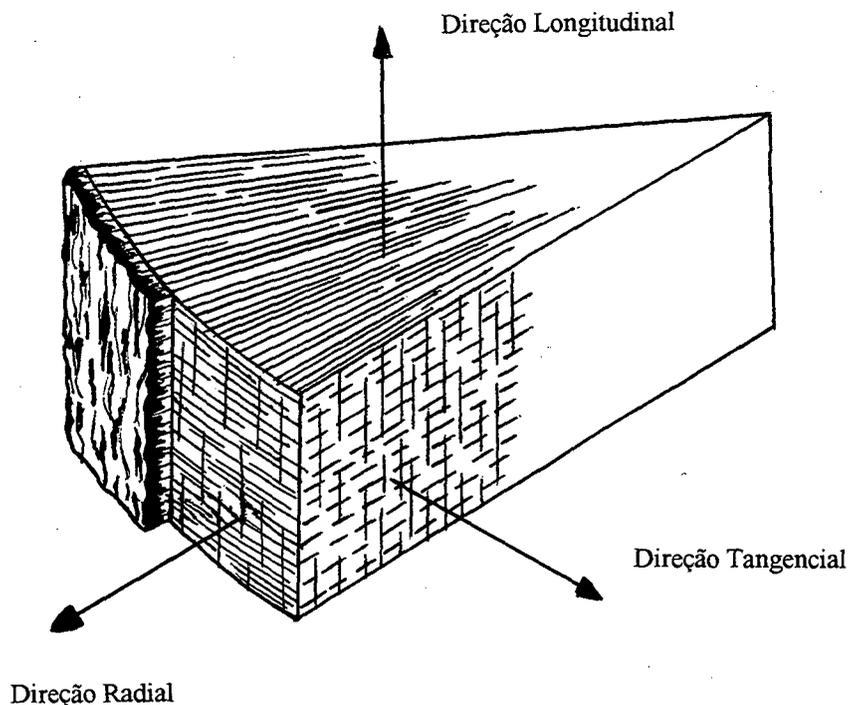


Figura 2.1 - Direções preferenciais da madeira.

Alburno e cerne. O padrão de tecido lenhoso alburno - cerne é uma das mais óbvias configurações que podem ser observadas na seção transversal ou radial de um tronco de árvore adulta. Embora não possa ser diferenciado em todas as espécies, a maioria das árvores têm as camadas mais internas com uma coloração mais escura na madeira, denominado como cerne. Elas também possuem as camadas mais externas com uma coloração mais clara no tecido lenhoso, denominado como alburno ou brancal. Este contraste na coloração do tecido lenhoso possui significado fisiológico de um modo geral, mas não é correto determinar o limite de separação entre cerne e alburno somente com base na cor do tecido, pois isto pode conduzir a afirmações errôneas em algumas espécies de madeira. O contraste acima mencionado pode ser observado na figura 2.2.

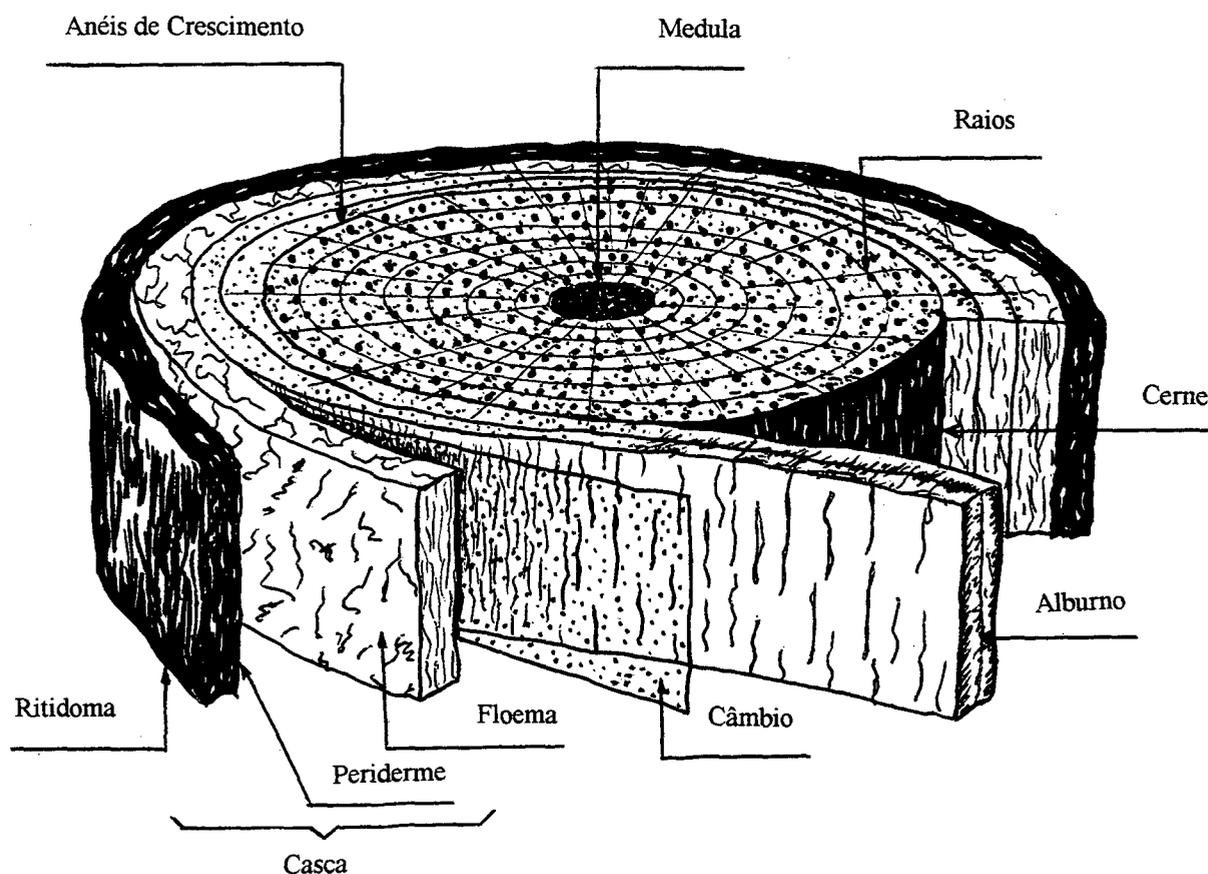


Figura 2.2- Seção de um tronco típico de árvore.

Como pode ser visto na figura 2.2, a casca é formada por ritidoma, periderme e floema. O floema é constituído por células vivas que conduzem a seiva elaborada, enquanto que os outros tecidos revestem o tronco, protegendo-o contra o ressecamento, ataques fúngicos, injúrias mecânicas e variações climáticas. O câmbio é um tecido que possui a capacidade de gerar novos elementos celulares.

Um critério mais preciso para a determinação do cerne é a ausência de células vivas dentro de sua região de localização. Para propósitos exclusivamente comerciais, entretanto, a cor é o

fator determinante utilizado para a separação entre o alburno e o cerne. Enquanto o cerne é caracterizado basicamente pela ausência de células ativas, ou seja, possui células saturadas de resinas, o alburno é a parte do tecido lenhoso constituído de células ativas que são responsáveis pelo crescimento da árvore no sentido radial, aumentando o seu diâmetro com o passar do tempo (Kollmann e Côté, 1968).

Certas diferenças características podem ser encontradas entre o alburno e o cerne de uma mesma árvore. Como exemplo pode-se citar o peso, a resistência e a permeabilidade, que são muito diferentes e podem ser relacionadas com as mudanças que acompanham a transformação alburno-cerne.

Anéis de crescimento Outra característica facilmente observada na seção transversal são os incrementos de crescimento ou anéis de crescimento. Os limites destes incrementos são geralmente relacionados com o crescimento anual no desenvolvimento de árvores em climas temperados. Nas regiões tropicais, entretanto, os incrementos de crescimento podem ser o resultado de estações úmidas e secas e o termo “anel anual” muitas vezes usado por serradores ou madeireiros das regiões temperadas não deveria ser estritamente aplicável, pois não traduz a realidade em todas as situações (Kollmann e Côté, 1968).

A natureza da camada de crescimento pode ser de grande utilidade para auxiliar na identificação de uma determinada madeira. Nas regiões temperadas as dicotiledôneas, por exemplo, oferecem padrões que podem muitas vezes ser observados a olho nu, examinando o tecido dentro do incremento de crescimento anual. Estes padrões podem ser atribuídos ao tamanho e distribuição de poros, o termo dado a abertura dos vasos como vistos na seção transversal. Em um anel de crescimento típico, distinguem-se normalmente o lenho inicial (lenho primaveril) e o lenho tardio (lenho outonal ou estival), os quais podem ser observados na figura 2.3. Quando os poros no lenho inicial são muito maiores que os formados por último na estação,

e quando o tamanho de transição entre poros dos lenhos inicial e tardio é abrupta, a madeira é classificada como tendo porosidade em anel. Se existe pouca ou nenhuma transição no tamanho dos poros entre os lenhos inicial e tardio, o termo porosidade difusa é aplicado. Os termos porosidade semi anelada ou porosidade semi difusa são utilizados para descrever a madeira na qual os padrões de poros não são distintamente do tipo porosidade em anel nem do tipo porosidade difusa.

Um padrão de transição pode também ser observado como uma característica macroscópica na madeira das coníferas. Neste caso isto é associado com a redução na dimensão radial dos traqueídeos, células alongadas e estreitas com extremidades pontiagudas que ocupam aproximadamente 95% do volume da madeira, bem como na espessura da parede das células. Os traqueídeos do lenho inicial possuem paredes finas e de formato poligonal na seção transversal enquanto que as células do lenho tardio possuem paredes mais grossas e são planas radialmente, dando uma tonalidade mais escura para a porção de lenho tardio do anel anual.

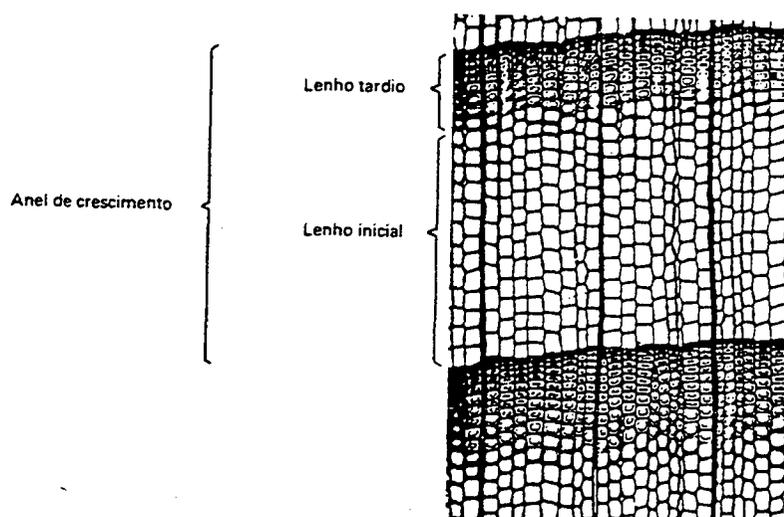


Figura 2.3 - Anel de crescimento de uma gimnosperma (*Tsuga canadensis*) (Richter, 1991)

Parênquima axial. As células do parênquima axial ou longitudinal são encontradas em várias concentrações e padrões de distribuição nos anéis de crescimento das coníferas e das dicotiledôneas. As células do parênquima são geralmente curtas e possuem parede fina com pontoações simples. Os parênquimas dos raios são encontrados quando o parênquima longitudinal ocorre em feixes ao longo da grã da madeira. Na seção transversal eles aparecem como pontos, bandas ou faixas (Kollmann e Côté, 1968).

Canais intercelulares. Diversas madeiras da classe das coníferas, como por exemplo o Pinus, possuem canais para resina como característica anatômica normal. Estes canais são compridos e tubulares ou cavidades orientadas longitudinalmente na madeira e revestidas por tecido epitelial que secreta resina dentro do canal. O tecido epitelial pode ser composto de uma ou mais camadas células especializadas de parênquima que são de parede fina em alguns gêneros, e de parede grossa em outros. Na seção transversal, os canais para resina aparecem a olho nu como pontos. Seu tamanho, localização e distribuição são muitas vezes de valioso diagnóstico. Canais para resina normais também ocorrem nos raios (chamados raios fusiformes) de certos gêneros, mas quando os dutos de resina estão danificados (causado por ferimento), eles estão geralmente restritos a ocorrência axial.

Nas madeiras da classe das dicotiledôneas, os canais intercelulares são geralmente denominados dutos de goma ou cola. Eles podem conter produtos oleosos, resinosos ou mucilaginosos. Num primeiro momento, o canal é formado por uma dissolução de células do parênquima axial (Kollmann e Côté, 1968).

Considerando as características macroscópicas descritas anteriormente, ainda existem algumas outras características de significativa importância na seleção de uma madeira para uma determinada aplicação, como por exemplo textura, cor e brilho. Seria muito impreciso classificar

odor, sabor, dureza ou peso da madeira como características macroscópicas, mas estas são características auxiliares para a descrição e identificação de madeiras das diversas espécies. As características supracitadas são definidas como propriedades organolépticas da madeira.

2.2- Estrutura Microscópica da Madeira

A maior parte das características estruturais macroscópicas consideradas na seção anterior tem sua origem na distribuição dos vários tipos de células encontradas na madeira. Quando finas seções de madeira são examinadas em um microscópio, a composição celular pode ser facilmente observada. Exames microscópicos de amostras da polpa de dicotiledôneas e de coníferas revelam que existem significativas diferenças nos tamanhos e formatos das células destas duas fontes, portanto na estrutura porosa (Kollmann e Côté, 1968).

Parede celular. A relação entre os vários elementos constituintes da parede celular no traqueídeo longitudinal de uma conífera é ilustrada na figura 2.4. As microfibrilas estão agregadas dentro das grandes macrofibrilas, organizadas em lamelas dentro das diferentes camadas da parede da célula.

A parede das células da madeira (traqueídeos, vasos e fibras) é composta por uma camada primária e uma secundária. A camada secundária é formada por camadas denominadas S1, S2 e S3. A parte interna da camada S3, que faz contato com a cavidade celular (lumen) é rugosa e possui muita influência no fenômeno de difusão da água através da parede celular. A camada primária possui espessura entre 0.1 e 0.2 μm . Para a parede secundária, tem-se S1 variando de 0.2 a 0.5 μm , S2 variando de 1.0 a 8.0 μm e S3 variando de 0.1 a 0.2 μm (Siau, 1984).

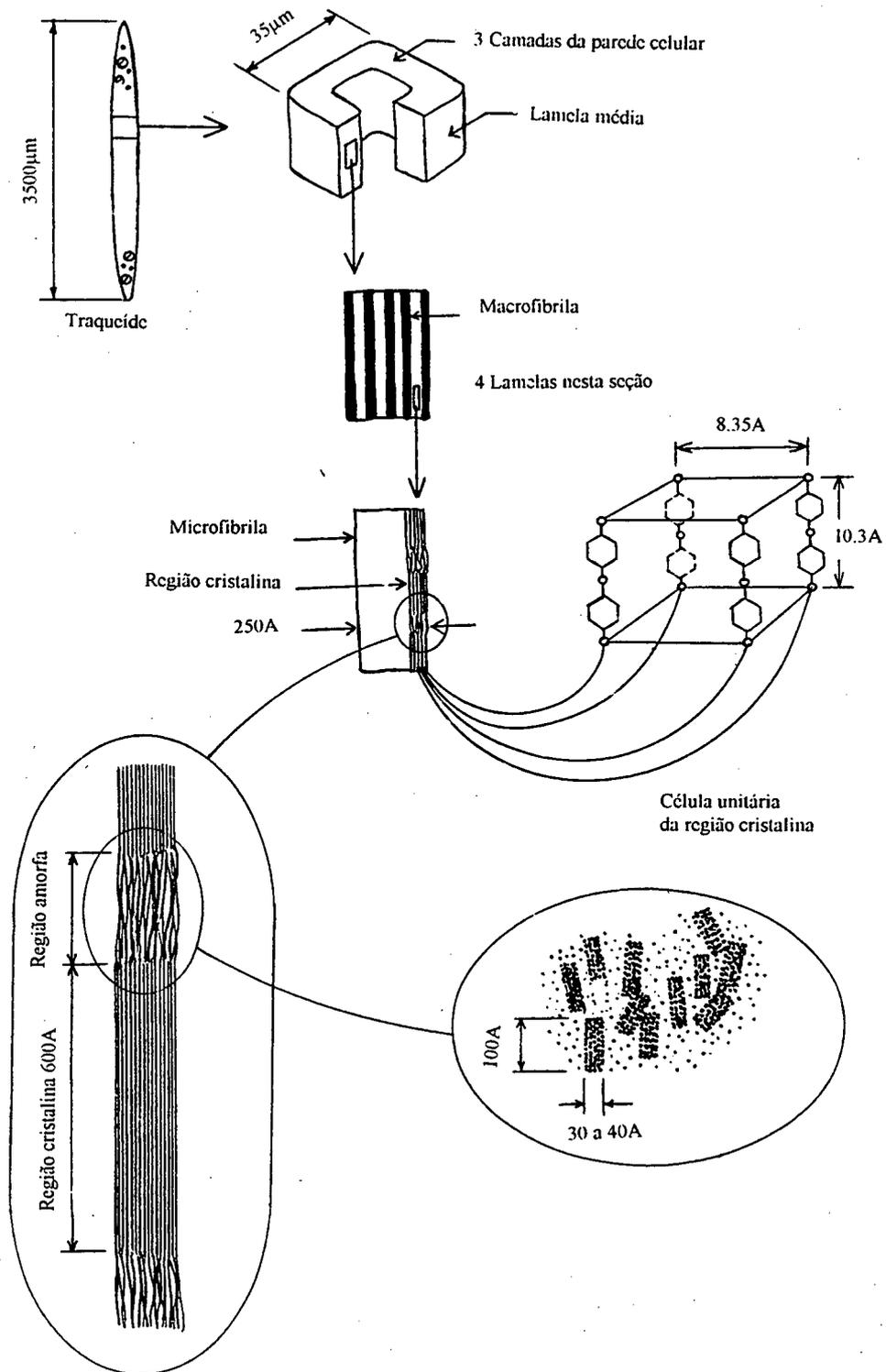


Figura 2.4 - Relação entre os elementos constituintes da parede celular de uma conífera.

2.2.1- A Estrutura das Gimnospermas

A estrutura típica de uma conífera é apresentada na figura 2.5, representando a madeira do *Pinus taeda*. O prosênquima ou tecido condutor de fluido consiste de traqueídeos longitudinais e radiais. O parênquima, cuja função na árvore viva é a de um tecido de armazenamento para alimento e transporte radial, inclui o parênquima longitudinal, as células epiteliais revestindo os canais para resina, e o parênquima do raio. Canais para resina longitudinais e horizontais também estão presentes nas outras espécies de coníferas. Estes não são considerados células desde que eles são espaços intercelulares (Siau, 1984).

Os traqueídeos longitudinais compõem a maior parte da estrutura. Estas são compridas, com células estreitas cujas extremidades são afiladas gradualmente ao longo das superfícies radiais por uma considerável porção de seus comprimentos onde elas estão em contato com outros traqueídeos. A maioria dos pares de pontoações areoladas estão localizados ao longo destas regiões afiladas (sobrepostas) das superfícies radiais. A maior parte do fluido flui entre traqueídeos localizadas na direção tangencial se o fluxo através dos raios não for considerado. O número de pontoações por traqueídeo varia de 50 a 300 (Stamm, 1964).

A estrutura microscópica da conífera apresentada na figura 2.5 possui na vista transversal: 1-1a raio; B traqueídeo; C parênquima; E células epiteliais; 3-3a e 4-4a traqueídeos; F pontoação areolada; G e H pontoações. A vista radial apresenta: 5-5a raios; J e M traqueídeos; K e N parênquima; L células epiteliais; O, P e S pontoações; 6-6a raios. A vista tangencial apresenta: 7-7a traqueídeos; 8-8a parênquima; T parênquima; 9-9a canal de resina longitudinal; 10 raio; U traqueídeo; W células epiteliais; X canal de resina horizontal; Y abertura no canal de resina; 12 raios não seriados; Z pontoações.

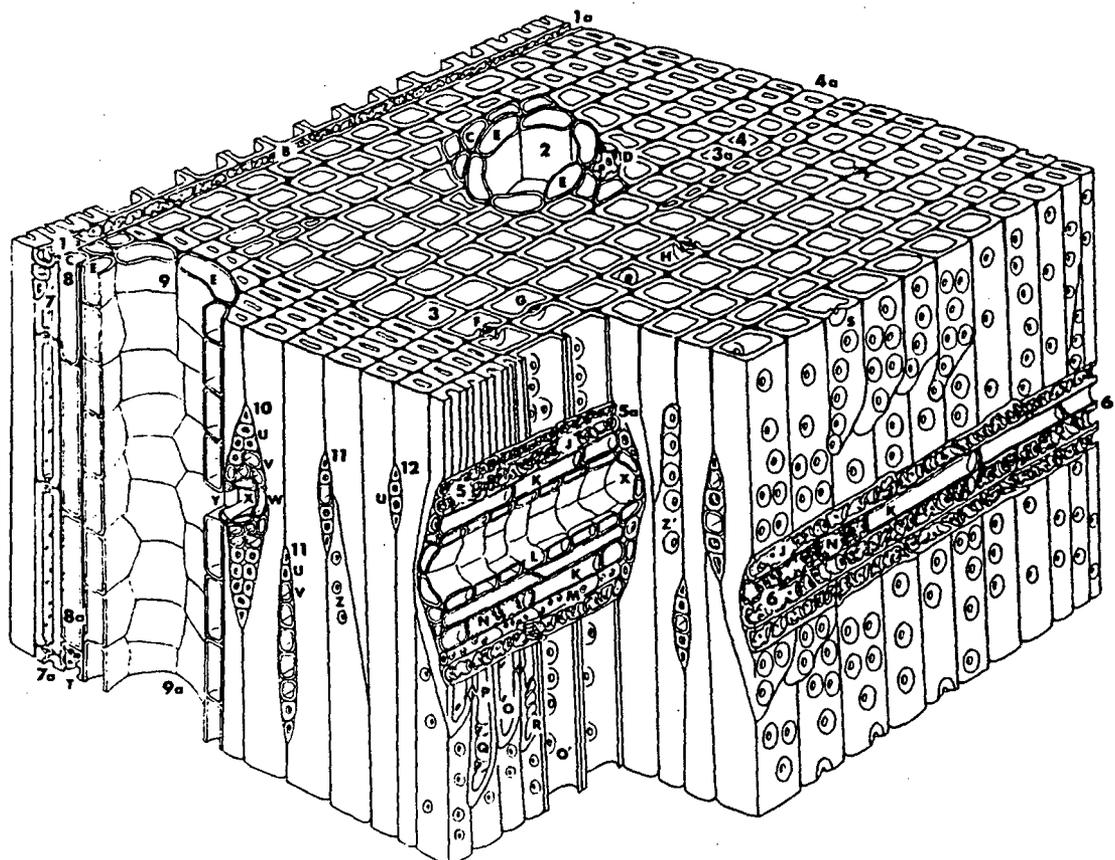


Figura 2.5 - Estrutura microscópica de uma conífera típica (pinus) (Howard e Manwiller, 1969).

Aproximadamente 95% do volume da madeira é formado por traqueídeos dispostas na direção longitudinal. Desta forma, tem-se traqueídeos adjacentes lateralmente e sobrepostas em suas extremidades. Na direção longitudinal, as extremidades dos traqueídeos são sobrepostas. Existem estruturas, pontoações, na madeira que permitem a comunicação entre estas células tanto lateralmente quanto longitudinalmente, nas regiões sobrepostas. Esta comunicação entre

traqueídeos permite o desenvolvimento do escoamento de fluidos nas direções longitudinal e tangencial (Richter, 1991; Spolek, 1980).

O diâmetro tangencial dos traqueídeos pode variar de 15 até 80 μm de acordo com a espécie, e o comprimento pode estar na faixa de 1200 a 7500 μm (1.2 a 7.5 mm). Valores médios do diâmetro e comprimento podem ser considerados como 35 μm e 3500 μm respectivamente, com uma razão comprimento-diâmetro de aproximadamente 100. O diâmetro da cavidade celular ou lumen varia de 20 a 30 μm . O diâmetro efetivo das aberturas das pontoações varia de 0.02 a 4.00 μm . Deve-se considerar, no entanto, que as dimensões citadas acima referem-se a coníferas normais. As considerações feitas anteriormente servem de base para o conhecido modelo de Comstock para coníferas. Existem pares de pontoações areoladas controlando o fluxo dos traqueídeos longitudinais até os traqueídeos dos raios e pares de pontoações semi-areoladas permitindo o fluxo para células adjacentes de parênquima dos raios. A maior parte do fluxo radial ocorre provavelmente através dos raios e dos traqueídeos.

A título de ilustração, pode-se citar a composição volumétrica aproximada da madeira do *Pinus strobus*, onde os traqueídeos longitudinais ocupam 93 % do volume, os canais para resina longitudinais ocupam 1 % e os raios ocupam 6 %. Esta é uma composição típica de uma conífera. A faixa de variação para os raios no volume é de 3.4 a 11.7 % para as espécies de coníferas com uma médias de 7 %, enquanto que as dicotiledôneas apresentam uma média de 17 % para o volume ocupado pelos raios.

Desde que os raios e os canais para resina formam uma pequena fração do volume, suas contribuições para o conjunto do escoamento do fluido pode ser classificado como de importância secundária. Se estes caminhos de fluxo são negligenciados, o que resulta disto é um modelo de fluxo muito simples para as coníferas, nas quais os fluidos fluem de uma para outro traqueídeo através das pontoações areoladas. De acordo com as observações microscópicas feitas por Wardrop e Davies (1961), o exposto acima pode ser aceito. Existem algumas evidências,

entretanto, de que os raios podem ser um importante caminho para o fluxo de líquidos preservativos em amostras finas e compridas. Se não existisse fluxo através dos raios, a permeabilidade tangencial excederia a permeabilidade radial porque a maioria das pontoações estão nas superfícies radiais dos traqueídeos. Entretanto, Banks (1970) encontrou a permeabilidade radial do *Pinus sylvestris* como sendo maior que a permeabilidade tangencial, e pode concluir que esta característica é devido ao fluxo através dos raios.

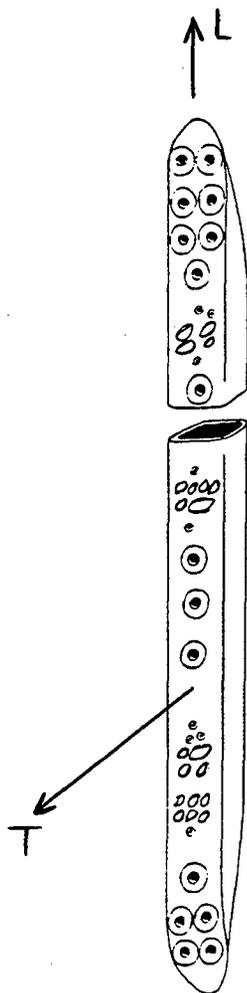


Figura 2.6 - Relação entre o traqueídeo e as direções da madeira (Howard e Manwiller, 1969). Onde L é a direção longitudinal e T a tangencial.

A permeabilidade longitudinal das coníferas é muito maior que a permeabilidade tangencial, em função de existirem poucas pontoações nas paredes na direção tangencial em comparação com a direção longitudinal (Siau, 1984).

Pontoações das coníferas. Um par de pontoação é formado por aberturas complementares na paredes secundárias de duas células (traqueídeos) adjacentes, junto com uma membrana da pontoação que é constituída por uma lamela média revestida por uma parede primária de cada lado. Existem basicamente três tipos de pontoações: o par de pontoação simples, areolada e semi-areolada.

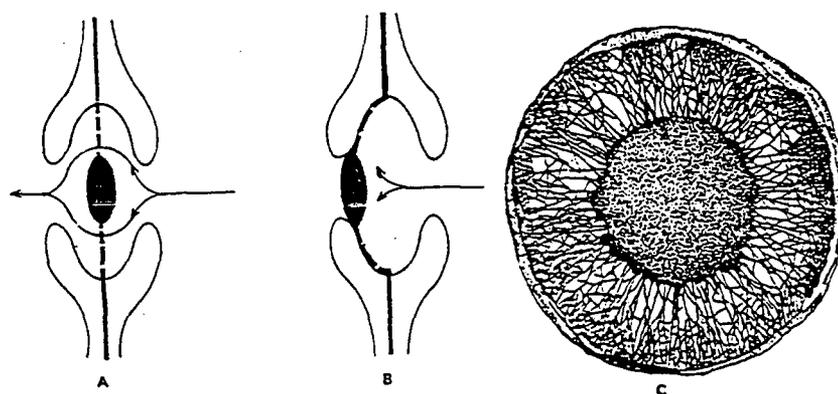


Figura 2.7 - Par de pontoação areolada: A- Toro em posição normal; B: Pontoação aspirada; C: Vista frontal do toro no centro da pontoação (Richter, 1991).

O par de pontoações areoladas é o que possui a maior influência nas propriedades de transporte dos fluidos porque quase todo o tecido das coníferas é constituído de células de prosênquima. Um par de pontoação é ilustrado em seção transversal na figura 2.7. O diâmetro total da câmara das pontoações de uma conífera com pontoações areoladas varia de 6 até 30 μm . O diâmetro do torus, quando presente, varia entre um terço até um meio do diâmetro da câmara e

a abertura é aproximadamente um meio do diâmetro do torus. O torus é uma porção central mais espessa da membrana da pontoação, que é composta por material da parede primária. Esta característica é bastante típica nas famílias de Pinus. Geralmente o torus apresenta a característica de ser impermeável aos fluidos, como mostrado pela correlação estabelecida entre a aspiração da pontoação e a baixa permeabilidade. A membrana de revestimento do torus é denominada margo, e ela consiste de fios de microfibrilas de celulose partindo do torus para a periferia da câmara da pontoação. As aberturas entre as microfibrilas permitem a passagem de fluidos e de pequenas partículas através da membrana da pontoação. Medições microscópicas indicam que as aberturas das pontoações das coníferas possuem um diâmetro efetivo entre que varia de 0.02 até 8 μm (Siau, 1984).

Para o par de pontoação areolada, um diâmetro global menor com um torus e uma membrana da pontoação mais espessos faz com que a estrutura resultante seja mais rígida e assim, esteja mais habilitada a resistir às forças capilares causadas na aspiração da pontoação. As aberturas no tecido lenhoso têm semelhança com tubos capilares em algumas regiões e em outras parecem com orifícios. Esta variação poderia produzir diferenças significativas nas propriedades de escoamento de fluidos.

Existem mudanças nas membranas das pontoações das coníferas, observadas particularmente durante a formação do lenho, que justificam a diminuição da permeabilidade. A primeira destas mudanças é a aspiração da pontoação, mostrada na figura 2.7, na qual o torus está sustentado rigidamente contra a borda, bloqueando a abertura e impedindo a penetração de fluidos. O torus está sustentado provavelmente nesta posição pelas pontes de hidrogênio entre as correntes adjacentes de celulose. A segunda condição de mudança é a incrustação com extratos.

A pontoação aspirada dificulta ou bloqueia completamente o escoamento de fluidos, reduzindo significativamente a permeabilidade da madeira. A pontoação aspirada constitui um

também um recurso do vegetal para impedir a penetração de ar na coluna ascendente de fluidos em caso de ferimentos.

2.2.2- Estrutura das Angiospermas

A estrutura de uma típica dicotiledônea encontra-se ilustrada na figura 2.8 com identificação das principais células e tipos de tecidos englobando vasos, fibras e raios nos lenhos inicial e tardio. As dicotiledôneas são muito mais variadas e complexas que as coníferas e estão divididas nos tipos que possuem porosidade difusa e em anel. O primeiro tipo possui vasos que são relativamente uniformes no tamanho e distribuição (Siau, 1984).

Entre os vasos, células com formato e função semelhante aos traqueídeos das coníferas, do tecido lenhoso podem ser vistas placas de perfuração escalariformes bem como diversas pontoações permitindo o escoamento de fluidos entre células. Os vasos possuem um diâmetro que varia de 50 até 100 μm e são revestidos por células fibrosas de parede fina. Séries de raios podem ser vistos na vista axial na superfície da seção transversal e da seção transversal da superfície tangencial. Séries de raios são vistos na superfície radial, e alguns raios também são evidentes na seção transversal. Muitas espécies de dicotiledôneas possuem estruturas porosas que podem ser definidas como um estágio intermediário entre os tipos de porosidade difusa e em anel.

Panshin e Xeeuw (1980) revelaram a composição volumétrica de uma espécie de dicotiledônea que possui tipicamente os poros difusos. De acordo com este trabalho, as fibras (vasos) ocupam 55 % do volume, os traqueídeos 26 %, o parênquima longitudinal 1% e os raios ocupam 18 % do volume.

Os vasos das madeiras com porosidade difusa geralmente ocupam uma fração volumétrica maior que nas madeiras com porosidade em anel com uma variação que vai de 20 % até 60 %. Os diâmetros dos vasos são relativamente uniformes dentro de uma espécie e pode variar de 20 até

100 μm na maioria das dicotiledôneas de regiões temperadas. Vasos com dimensões maiores podem ser encontrados em algumas dicotiledôneas da região tropical. Considerando as concentrações de vasos entre as diversas espécies de dicotiledôneas, pode-se ter como um valor médio, como visto na seção transversal, 15.000/cm². Nas madeiras de porosidade em anel os vasos ocupam frações volumétricas relativamente baixas em torno de 5 a 25 % .

A placa de perfuração simples possui uma única abertura quase tão larga quanto o tamanho do lúmen (figura 2.9), e a placa de perfuração escalariforme difere da anterior por possuir diversas aberturas separadas por barras finas e transversalmente orientadas. A resistência ao escoamento imposta pelas placas de perfuração é baixa porque as aberturas são relativamente grandes e também devido ao fato das placas serem finas. Portanto, os vasos comportam-se como longos tubos abertos ou capilares. Os vasos possuem um comprimento limitado, além disso, existem freqüentes ramificações, e existe comunicação entre diversos vasos através de pontoações distribuídos ao longo dos vasos. Nas árvores da madeira conhecida como carvalho existe comunicação entre vasos através dos traqueídeos vasicêntricos (Wheeler e Thomas, 1981).

As tiloses, membranas celulares que entram nos vasos das células adjacentes através das pontoações, podem aumentar grandemente a resistência ao escoamento de fluidos através do cerne e às vezes dos vasos da alburno de muitas espécies de dicotiledôneas. As tiloses são consideradas de baixa permeabilidade no carvalho branco. Substâncias pegajosas tais como resinas avermelhadas e o material preto em ébano também podem contribuir para a obstrução dos vasos. Os fluidos escoam na madeira na direção longitudinal transversal através das pontoações, que permitem a comunicação entre as diversas células do tecido lenhoso (Pashin e Zeeuw, 1980).

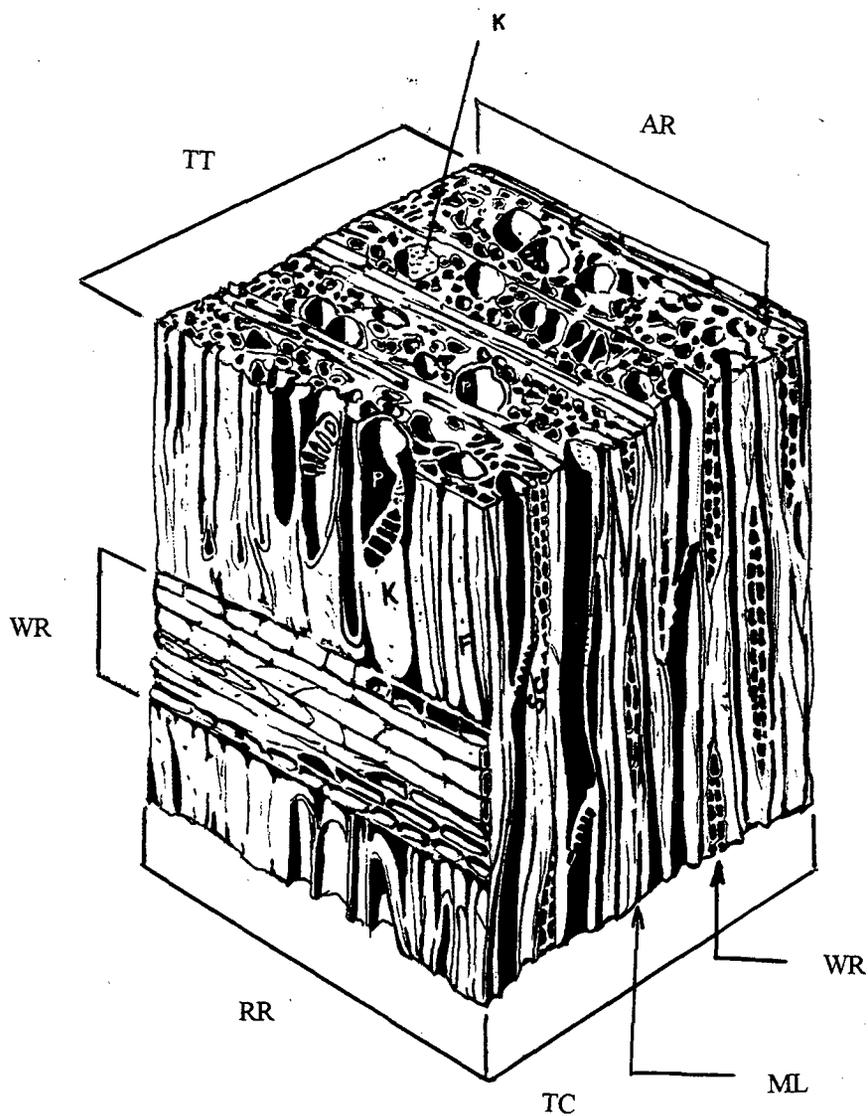


Figura 2.8 - Estrutura microscópica de uma dicotiledônea mostrando os três planos anatômicos. Plano TT seção transversal; RR superfície radial; TC superfície tangencial. Os vasos ou poros são indicados por P. As fibras F tem pequenas cavidades. As pontoações são K e WR são os raios. AR indica o anel anual e ML indica a lamela média

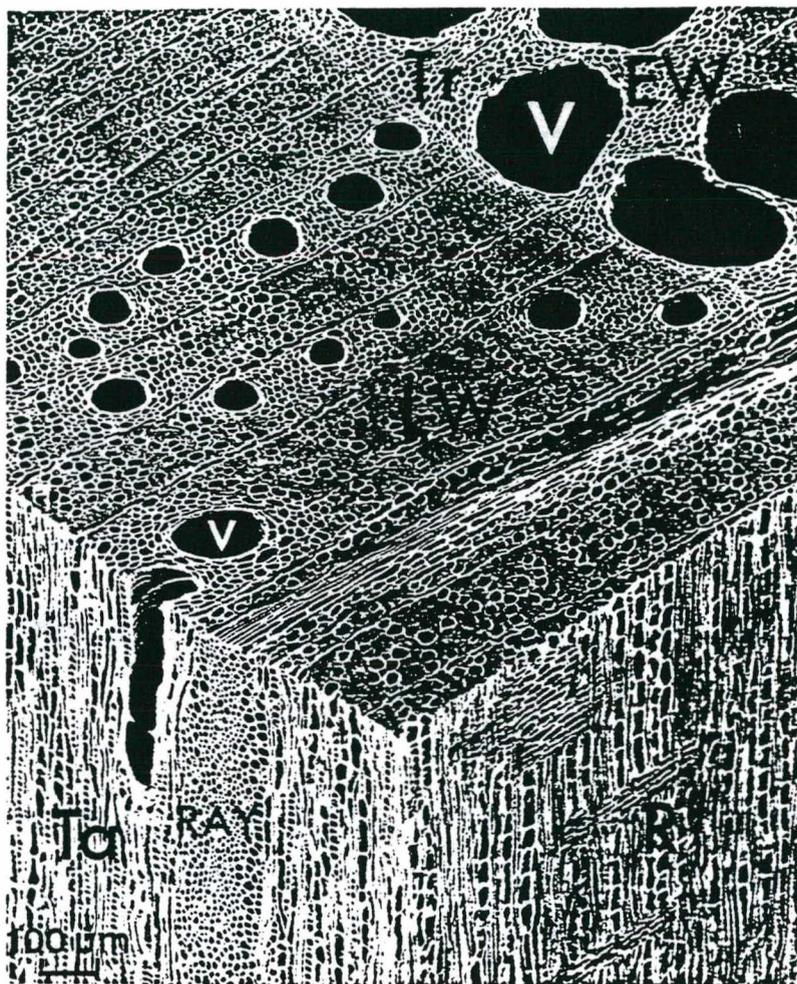


Figura 2.9 - Micrografia eletrônica de uma dicotiledônea, mostrando seus elementos. EW lenho inicial; V vasos; Tr, Ta e R superfícies transversal, tangencial e radial (Siau, 1984).

Pontoações das dicotiledôneas. Ilustração das pontoações das dicotiledôneas pode ser vista na figura 2.10. Geralmente não existem torus nas pontoações das dicotiledôneas e as membranas são contínuas através da câmara completa da pontoação. Estas membranas são compostas por uma parede primária com material orientado aleatoriamente, como mostrado na figura 2.10. As pontoações das espécies de dicotiledôneas são geralmente menores que as pontoações das espécies de coníferas, com o diâmetro das câmaras das pontoações ficando em

torno de 6 μm . Embora as membranas das pontoações das dicotiledôneas normalmente não tenha aberturas aparentes comparáveis com as existentes entre os fios de microfibrilas no margo das membranas das coníferas, existem evidências suficientes para afirmar que as aberturas estão presentes. Para exemplificar o que foi exposto acima, pode-se citar o fato de que as dicotiledôneas são permeáveis aos gases e líquidos nas direções tangenciais e radiais. Bonner e Thomas (1972) publicaram que o diâmetro destas aberturas seria de 100 nm nas membranas das pontoações.

Existe uma grande variação nas dimensões dos poros das membranas das pontoações das dicotiledôneas assim como existe nas coníferas. Convém lembrar ainda que os valores obtidos na medições dependem muito do método utilizado. Se uma dimensão mínima é considerada da ordem de 5 μm , observa-se que se possui uma escala que varia de 5 até 170 μm (Murmanis e Chudnoff, 1979).

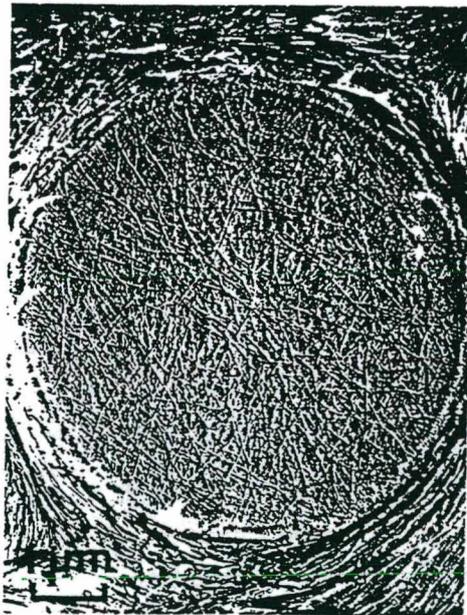


Figura 2.10 - Pontoação areolada no vaso de uma dicotiledônea (Wheeler e Thomas, 1972).

CAPÍTULO 3 - TRANSPORTE DE CALOR E UMIDADE NA MADEIRA

3.1 - A Madeira e a Umidade

A madeira apresenta a água dentro de sua estrutura nas formas líquida e gasosa (vapor). Detalhando as formas de água líquida, pode-se dizer que existem a água de capilaridade nos espaços da estrutura da madeira e a água de impregnação ou higroscópica, que está impregnada nas cadeias de celulose da parede celular. A umidade na forma de vapor será considerada nos próximos capítulos. Inicialmente, serão consideradas basicamente a umidade nas formas de água capilar e higroscópica.

Quando se estabelece um equilíbrio entre a madeira contendo água higroscópica e um ambiente onde o ar possui umidade relativa zero (0%), observa-se que o conteúdo de umidade da madeira torna-se zero também. Este equilíbrio da umidade da madeira com a umidade do meio ambiente que a envolve pode ser entendido como sendo uma resposta da madeira a um estímulo do meio ambiente. Sendo assim, este equilíbrio pode ser melhor definido como Umidade de Equilíbrio da madeira (UE). A umidade de equilíbrio da madeira aumenta com a umidade relativa até que as paredes celulares fiquem saturadas, quando a umidade relativa do ar aproxima-se de 100%. A partir deste ponto, equivalente ao conteúdo mássico de 33%, como tem-se a acumulação de água na forma líquida, define-se o ponto de saturação das fibras. Sabe-se que a madeira verde, ou melhor, recém derrubada possui elevados teores de umidade na forma de água capilar na sua estrutura.

A influência da umidade nas características e no comportamento das propriedades físicas e térmicas da madeira serão estudadas nos próximos capítulos.

De acordo com a lei da pressão parcial do gases de Dalton, cada elemento da mistura de um gás perfeito exerce sua pressão como se estivesse sozinho na mesma temperatura da mistura. Desta forma, a pressão atmosférica pode ser calculada conforme a equação a seguir:

$$P_a = p_o + p_{ar} \quad (3.1)$$

onde: P_a : pressão atmosférica, Pa;
 p_o : pressão do vapor saturado, Pa;
 p_{ar} : pressão parcial do ar, Pa.

A pressão do vapor saturado pode ser calculada, de acordo ASHRAE, através da seguinte correlação:

$$\begin{aligned} \log_{10}(p_o) = & 10.79586(1 - \theta) + 5.02808 \log_{10}(\theta) + \\ & + 1.50474 \times 10^{-4}(1 - 10^{-8.29692[(1/\theta) - 1]}) + \\ & + 0.42873 \times 10^{-3}(10^{4.76955(1 - \theta)}) - 2.2195983 \end{aligned} \quad (3.2a)$$

$$\theta = \frac{273.16}{(t + 273.15)} \quad (3.2b)$$

$$\log_{10}(p_o) = Y \quad ; \quad p_o = 10^Y \times 101325 \quad (3.2c)$$

onde: p_o : pressão do vapor saturado, Pa;
 t : temperatura de bulbo seco, °C;
 θ : correção de temperatura.

O conteúdo de vapor presente no ar pode ser expresso pelo conteúdo de umidade (W).

O conteúdo de umidade (W) é definido como sendo igual a massa de umidade por unidade de massa de ar seco. Este conteúdo de umidade pode ser calculado a partir da equação a seguir:

$$W = \frac{0.622p}{P_a - p} \quad (3.3)$$

onde: W: conteúdo de umidade, kg/kg;

P_a : pressão atmosférica, Pa;

p: pressão parcial do vapor, Pa.

3.1.1 - Umidade Relativa

A umidade relativa do ar (UR) pode ser definida como sendo a razão entre a pressão parcial do vapor e a pressão do vapor saturado. A umidade relativa, normalmente apresentada em forma percentual, é expressa por:

$$UR = \frac{p}{p_o} \times 100 \quad (3.4)$$

onde: p: pressão parcial do vapor, Pa;

p_o : pressão do vapor saturado, Pa.

Carta psicrométrica. A carta psicrométrica é um diagrama que apresenta de forma gráfica as relações existentes entre as temperaturas de bulbo seco, bulbo úmido e do ponto de orvalho, umidade relativa, volume específico e conteúdo de umidade. Usualmente a carta psicrométrica é baseada na pressão atmosférica padrão, ou seja, 101325 Pa (Carpentes, 1982).

Medição da umidade relativa. A umidade relativa pode ser medida através de dois métodos práticos que são o psicrômetro e o método do ponto de orvalho.

O método do psicrômetro baseia-se na leitura de dois termômetros, sendo um denominado termômetro de bulbo seco e outro termômetro de bulbo úmido. O termômetro de bulbo úmido possui uma mecha de pano umidecida em água. Deve haver uma circulação de ar na velocidade em torno de 3 m/s, para que haja a evaporação da umidade do bulbo úmido.

O segundo método para a determinação da umidade relativa consiste na utilização da definição do ponto de orvalho. A temperatura do ponto de orvalho é aquela onde a pressão do vapor saturado é igual a pressão parcial do vapor. Esta é a temperatura de aparecimento da condensação. A umidade relativa pode ser lida a partir de uma carta psicrométrica para uma condição(estado) do ar. Este método possui a vantagem de que o resultado não é afetado pela altitude do local onde está sendo medida a umidade relativa (Carpentes, 1982).

3.1.2 - Umidade de Equilíbrio da Madeira

A umidade da madeira ou conteúdo de umidade (M) pode ser definido como sendo um percentual com base na massa seca. A massa seca é obtida após se deixar a amostra de madeira dentro de uma estufa na temperatura de 102 ± 3 °C até que seu peso não se altere mais. A equação a seguir permite o cálculo da umidade da madeira.

$$M = \frac{(P_{\text{úmido}} - P_{\text{seco}}) \times 100}{P_{\text{seco}}} \quad (3.5)$$

onde: $P_{\text{úmido}}$: massa da madeira úmida ou massa da madeira verde (kg);

P_{seco} : massa da madeira seca em estufa a 103°C (kg).

De acordo com Siau (1984), o conteúdo de umidade ou a umidade está presente na madeira basicamente nas formas de água higroscópica ou de impregnação e a água de capilaridade. A água higroscópica está localizada dentro da parede celular, onde está ligada através de pontes de hidrogênio nos grupos hidroxila das moléculas de celulose e hemicelulose. É importante lembrar que a característica de receber ou perder água é exclusiva das regiões amorfas dos feixes de celulose ou micelas, enquanto que as regiões cristalinas destes feixes de celulose não absorvem nem perdem água (vide figura 2.4). Quando a madeira possui somente a água higroscópica, existe um equilíbrio entre a umidade da madeira e a umidade relativa do ar ambiente que a envolve. Esta umidade da madeira em equilíbrio com o ar ambiente é definida como umidade de equilíbrio (UE). A umidade de equilíbrio (UE) é a resposta dinâmica da umidade da madeira a uma variação nas condições ambientais (TBS,UR). Além da umidade relativa do ar ambiente, exercem influência sobre a umidade de equilíbrio os esforços mecânicos, o histórico da secagem, a espécie da madeira, o conteúdo de extrativos e a temperatura (Skaar, 1972).

O ponto de saturação da fibra (PSF), pode ser definido como o ponto que representa a condição onde as paredes celulares estão saturadas com a água de impregnação, ou seja, quando não existe água capilar na cavidade celular. O ponto de saturação das fibras também pode ser

entendido como o conteúdo de umidade da madeira responsável pelas mudanças significativas nas propriedades como retração, resistência mecânica, condutividade elétrica e calor de umidecimento (Tiemann, 1906).

Desta forma, pode-se definir que o ponto de saturação da fibra é aquele onde percebem-se variações abruptas nas propriedades físicas da madeira. O conteúdo de umidade da madeira responsável por estas modificações pode ser aceito como sendo em média 30% para a maioria das madeiras originárias de regiões com clima temperado. Relacionando a umidade de equilíbrio da madeira (UE) e a umidade relativa do ar (UR) para uma dada temperatura, obtém-se as curvas conhecidas como isotermas de sorção, as quais são ilustradas na figura 3.1 (Stamm, 1964).

A água de capilaridade está presente na forma líquida dentro da cavidade celular ou dos espaços da madeira. A quantidade de água capilar que pode ser retida na madeira depende de sua porosidade. Não existem pontes de hidrogênio entre a água capilar e as paredes celulares, pois a água capilar é retida somente pelas forças capilares. A água capilar não causa retração ou inchamento da madeira ou alteração em outras propriedades físicas, uma vez que, se existe água capilar, as paredes celulares estão saturadas com a água higroscópica ou de impregnação (Siau, 1984).

O quociente de secagem (PS) é um parâmetro que auxilia no controle da condução do processo de secagem e é definido, de acordo com Jankowsky (1988), por:

$$PS = UM / UE \quad (3.6)$$

onde: UM: umidade da madeira, %;

UE: umidade de equilíbrio da madeira com o ar da estufa nas condições de secagem, %

Este quociente (PS) varia entre 1.5 a 2.5 para dicotiledôneas, enquanto para coníferas assume valores entre 2.5 a 3.3 (Kollmann & Côté, 1968).

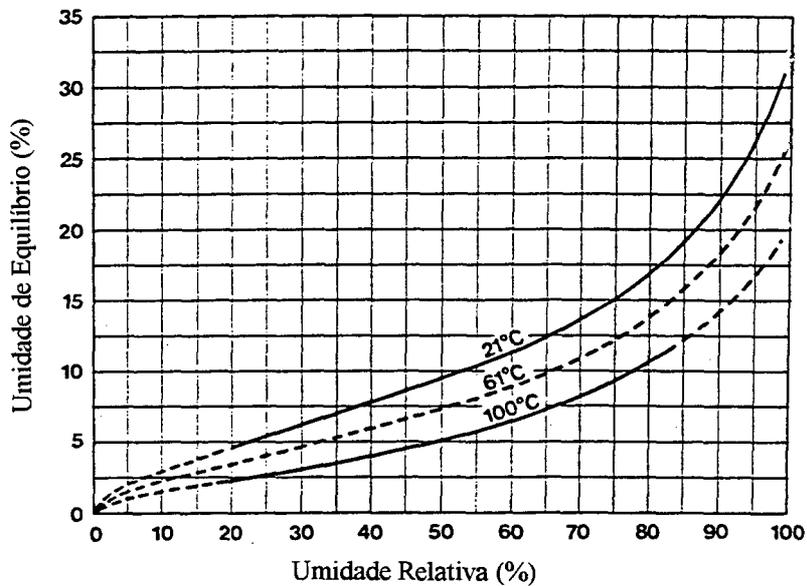


Figura 3.1 - Isoterma de sorção da madeira para três temperaturas (Rasmussem, 1961).

3.1.3 - Densidade e Gravidade Específica

Gravidade específica. A gravidade específica (G) é definida numericamente como sendo a relação entre a massa seca em estufa e o volume da madeira úmida. Assim, tem-se:

$$G = \frac{P_s}{V\rho_w} \quad (3.7)$$

onde: V: volume da madeira úmida (m³);

ρ_w : densidade da água = 1000 kg/m³

P_s : massa da madeira seca em estufa a 103 °C (kg)

A gravidade específica da madeira indica que um aumento no volume úmido, além de causar um inchamento na madeira, diminui a gravidade específica. Isto ocorre até que se atinja o ponto de saturação das fibras, onde a partir do qual a gravidade específica permanece constante, conhecido como G_f .

A gravidade específica pode ser medida através do método de deslocamento de fluidos. Os fluidos podem ser água, hélio e benzeno. De acordo com Stamm (1937) e Siau (1984), a gravidade específica possui um valor de 0.66 para o deslocamento da água, 0.69 para o deslocamento do hélio e 0.70 para o deslocamento do benzeno, em função do tamanho da molécula e de sua afinidade com o sólido. De acordo com Stamm, o resultado mais indicado é o obtido através do método que utiliza o benzeno.

Densidade. A densidade da madeira é definida como sendo a massa por unidade de volume para uma dada umidade da madeira. Assim, qualquer aumento na umidade da madeira

aumenta a massa da madeira. O aumento da densidade com a umidade da madeira ocorre de forma mais acentuada acima do ponto de saturação da fibra, pois nesta condição não há mais o inchamento da madeira (Siau, 1984). Desta forma, tem-se:

$$\rho = \frac{P}{V} \quad (3.8a)$$

onde: P: massa na condição úmida = $P_s(1+0.01M)$, kg.

Com isto, a equação anterior adquire a forma:

$$\rho = \frac{P_s(1+0.01M)}{V} \quad (3.8b)$$

Relacionando-se as equações (3.7) e (3.8b), pode-se obter:

$$\rho = G(1+0.01M)\rho_w \quad (3.9)$$

3.1.4 - Conteúdo de Ar

A porosidade é definida como a relação entre o volume vazio e o volume total, ou seja, é a fração de volume vazio. Considerando o valor de 0.667 para a gravidade específica, pode-se determinar a porosidade para todos os teores de umidade da madeira através da equação (Siau, 1984):

$$v_a = 1 - G(0.667 + 0.01M) \quad (3.12)$$

onde: v_a : conteúdo volumétrico de ar (volume de ar/volume total),

M: conteúdo de umidade da madeira (%).

O conteúdo de umidade da madeira quando todas as paredes das células e cavidades celulares estão saturados com água pode ser calculada através da seguinte equação (Siau, 1984):

$$M_{\max} = \frac{100}{G} - 66.7 \quad (3.13)$$

3.1.5 - Retração e Inchamento

A mudança de volume da madeira que se verifica entre os teores de umidade variando de 0% (zero) até o ponto de saturação das fibras (28 - 30 %), devido à desorção e adsorção de água, é considerada uma de suas propriedades físicas mais importantes. Isto justifica-se, uma vez que esta mudança de volume afeta e limita seu uso industrial em diversos segmentos.

O aumento de volume, também conhecido como inchamento, deve-se principalmente à inclusão de moléculas de água nos espaços microscópicos entre as micelas (feixes formados por moléculas de celulose), afastando-as e, conseqüentemente, alterando as dimensões da madeira.

De modo semelhante, a diminuição do volume (retração ou contração) deve-se à retirada das moléculas de água dos espaços entre as micelas através do processo de evaporação. Esta retirada das moléculas de água causa a aproximação das micelas e, portanto, a retração da madeira.

É interessante observar que as regiões cristalinas nos feixes de celulose não possuem a característica de receber ou perder água. Esta característica fica concentrada exclusivamente nas regiões amorfas dos feixes de celulose ou micelas (vide figura 2.4).

Sendo assim, pode-se concluir que o aumento de volume é proporcional ao aumento do teor de umidade (0% a 28-30%) e ao peso específico. Desta forma, tem-se:

$$\alpha_{vu} = \rho_{seco} M \quad (3.12)$$

onde: α_{vu} : fator de inchamento volumétrico de 0% até M% de umidade baseado em volume a 0%;

M: conteúdo mássico de umidade, %.

ρ_{seco} : massa específica seca (em estufa), kg/m³.

De modo geral, percebe-se que quanto maior a massa específica, maior é o fator de inchamento volumétrico.

Como a retração e o inchamento da madeira dependem unicamente da água contida dentro dos espaços microscópicos da parede celular, a ocorrência destes fenômenos só se inicia a um teor de umidade definido pelo ponto de saturação das fibras, ou seja, num teor de umidade que varia entre 28 a 30%. Nota-se que acima deste ponto não há mudanças significativas de volume. Sendo assim, tem-se o inchamento ocorrendo de 0% até 28-30%, enquanto que a retração ocorre de 28-30% até 0% de umidade da madeira.

O máximo inchamento da madeira é definido pela diferença entre suas dimensões no ponto de saturação das fibras e suas dimensões no estado absolutamente seco, ou seja, 0%. Assim, tem-se:

$$\alpha_{vmax} = \frac{(V_{umido} - V_{seco}) \times 100}{V_{seco}} \quad (3.13)$$

onde: α_{vmax} : máximo inchamento, %;

V_{umido} : volume do corpo de prova em estado úmido, m³;

V_{seco} : volume do corpo de prova em estado seco (0%), m³.

Com base na equação 3.12, tem-se que a seguinte relação é válida:

$$\alpha_{vmax} = \rho_{seco} M_{psf} \quad (3.14)$$

Desenvolvendo de maneira análoga ao que foi feito para o inchamento volumétrico, pode-se obter para a retração volumétrica máxima a seguinte equação:

$$\beta_{vmax} = \frac{(V_{umido} - V_{seco}) \times 100}{V_{umido}} \quad (3.15)$$

É importante observar que as equações dos máximos inchamentos e retração volumétricos não são idênticas, uma vez que para o inchamento a diferença entre o volume úmido e seco é baseada no volume seco, enquanto que para a retração tem-se a diferença anterior baseada no volume úmido (Knock, 1978).

A relação entre o fator de inchamento máximo e o fator de retração máxima pode ser expressa pelas equações abaixo:

$$\beta_{vmax} = \frac{\alpha_{vmax}}{1 + \alpha_{vmax}} \times 100 \quad (3.16a)$$

$$\alpha_{v_{\max}} = \frac{\beta_{v_{\max}}}{1 - \beta_{v_{\max}}} \times 100 \quad (3.16b)$$

3.2 - Condutividade Térmica

A condutividade térmica é uma propriedade muito importante no estudo do processo de secagem da madeira. Ela influencia diretamente neste processo e é variável com a espécie de madeira, conteúdo de umidade e direção, sendo desta forma, uma propriedade anisotrópica. Alguns valores estão ilustrados na tabela 3.1. Modelos de condutividade térmica podem ser vistos com maiores detalhes no Apêndice A.

Tabela 3.1 - Condutividades térmicas de diversos materiais (Siau, 1984).

Material	K (W/mK)
Madeira, G = 0.45; M = 12% \perp	0.13
Madeira, G = 0.45; M = 12%	0.31
Madeira, G = 0.70; M = 12% \perp	0.18
Madeira, G = 0.70; M = 12%	0.44
Parede celular \perp	0.44
Parede celular	0.88
Água	0.59
Ar parado	0.02
Compensado (<i>Douglas-fir</i>)	0.12
Madeira maciça (G = 0.60)	0.10
Aglomerado (G = 0.60)	0.13
Vidro	1.05
Cobre	385.81

3.3 - Capilaridade e Potencial da Água

3.3.1 - Tensão Superficial

A tensão superficial pode ser definida como uma característica do comportamento da interface entre um líquido e um gás. Isto pode ser devido a um desequilíbrio de forças intermoleculares de atração, mais especificamente as forças de Van der Waals.

Dentro do corpo do líquido as forças de Van der Waals encontram-se essencialmente balanceadas, enquanto que na superfície não existe componente das forças para cima (ascendentes). Portanto, existe uma força líquida para baixo, normal à superfície, e a superfície está aparentemente sob tensão. Se uma linha é visualizada ao longo da superfície de um líquido, as forças de um lado estão balanceadas pelas que estão no outro lado e a tensão superficial na interface é igual a magnitude da força total ao longo de um lado da linha dividida pelo comprimento. A tensão superficial pode ser expressa como força por unidade de comprimento. Assim, tem-se:

$$\sigma = F / L \quad (3.17)$$

onde: σ : tensão superficial na interface, N/m;

F: força ao longo de uma linha de comprimento x , N;

L: comprimento, m.

A tensão superficial também pode ser definida como a energia superficial por unidade de área, ou energia superficial específica. Em função da tensão superficial, uma quantidade de líquido buscará a menor área superficial possível representando o estado de mais baixa energia. Desta forma, uma gota ou uma bolha é esférica na ausência de outras forças. O trabalho é requerido para aumentar a área de uma interface e toda a energia pode ser recuperada quando a área é reduzida novamente. Portanto, a energia armazenada numa superfície é energia potencial similar à energia presente numa mola comprimida. As unidades para energia superficial específica são aquelas da energia por unidade de área, ou J/m^2 , que são equivalentes a N/m. A forma matemática derivada para a expressão da tensão superficial é:

$$\sigma = dW / dA \quad (3.18)$$

onde: σ : tensão superficial ou energia superficial específica, J/m²;

dW : trabalho requerido para aumentar a área, J;

dA : área, m².

3.3.2 - Tensão e Pressão Capilar

Considere inicialmente uma bolha esférica em um líquido, conforme pode ser visto na figura 3.2. Para fazer a bolha aumentar de tamanho, deve-se realizar trabalho sobre o pistão (Siau, 1971). O trabalho realizado pode ser calculado como sendo o produto entre o diferencial de pressão e o aumento no volume. Considerando a definição de energia superficial específica, tem-se:

$$\sigma = dW / dA = (P_0 - P_1) dV / dA \quad (3.19)$$

onde: P_0 : pressão na fase gasosa, Pa

P_1 : pressão na fase líquida adjacente à superfície, Pa

A área da interface é definida por:

$$A = 4 \pi r_i^2 \quad (3.20)$$

onde : r_i : raio da interface gás-líquido.

e dA pode ser:

$$dA = 8 \pi r_i dr_i \quad (3.21)$$

Com isto, tem-se:

$$P_0 - P_1 = 2 \sigma / r_i \quad (3.22)$$

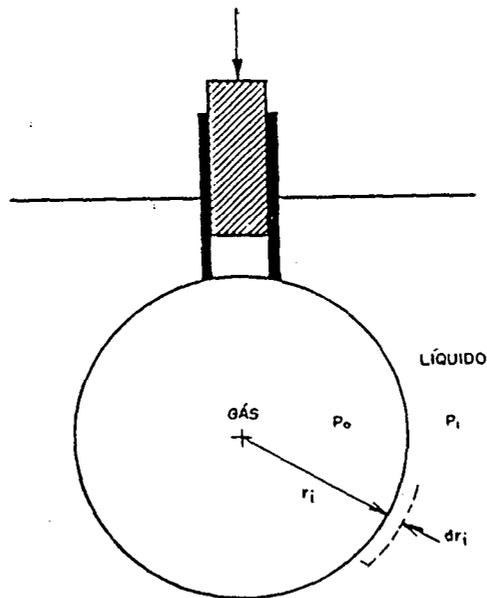


Figura 3.2 - Ilustração do aumento de uma bolha gasosa em um líquido através do trabalho pressão-volume para aumentar a área da interface líquido-gás (Siau, 1971).

A equação da pressão capilar também pode ser derivada a partir do balanço de forças que atuam no líquido que está no capilar mostrado na figura 3.3. Um líquido sobe no tubo capilar quando ele molha as paredes do tubo devido a enorme força de adesão entre o líquido e a parede

deste tubo. No caso de se considerar a água em contato com o vidro ou madeira, sabe-se que a força exercida pela tensão superficial que age para cima deve ser equilibrada pela força devido ao diferencial de pressão que age para baixo. Desta forma, tem-se:

$$2 \pi r \sigma \cos\theta = (P_0 - P_1) \pi r^2 \quad (3.23)$$

e

$$P_0 - P_1 = (2 \sigma \cos\theta) / r \quad (3.24)$$

onde θ : ângulo de molhamento;

r : raio do capilar, μm .

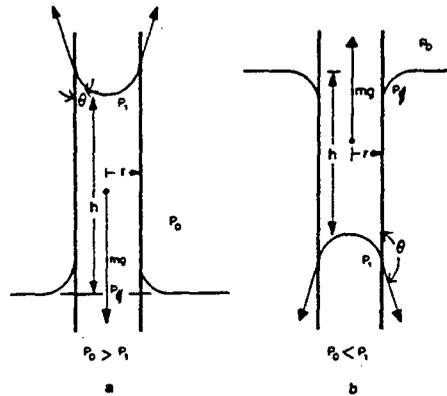


Figura 3.3 - Capilaridade. a) Líquido molha o capilar; b) Líquido não molha o capilar.

A equação apresentada anteriormente, (3.24), também é conhecida como equação de Young-Laplace. A partir da equação 3.24 pode-se fazer algumas considerações. Conclui-se que quando o ângulo de molhamento, θ , for igual a zero, a equação 3.24 será idêntica à equação 3.22. Quando o ângulo θ está entre 0° e 90° , o raio do menisco, r_1 , é maior que o raio do capilar, r .

Igualando as equações 3.22 e 3.24, obtém-se uma relação entre os raios do menisco e do capilar, como segue:

$$r_i = r / \cos\theta \quad (3.25)$$

A partir da figura 3.3, tem-se que a força devido a tensão superficial deve ser balanceada pelo peso do líquido no tubo. Assim:

$$2 \pi r \cos\theta = w g \quad (3.26)$$

onde : w : massa de líquido, kg;

: g : aceleração da gravidade = 9.80 m/s²;

Reescrevendo a equação acima em termos de densidade, ρ , e volume, V , tem-se:

$$2 \pi r \cos\theta = \rho V g = \pi r^2 \rho g z \quad (3.27)$$

onde : z : altura da coluna de líquido capilar, m.

Desta forma, obtém-se:

$$\gamma = (r \rho g z) / (2 \cos\theta) \quad (3.28)$$

O ângulo de contato é menor que 90° para líquidos que molham a parede do capilar, e para a água em contato com o vidro o ângulo de contato é aproximadamente zero. Se um tubo capilar de vidro é colocado dentro de um recipiente com mercúrio, não há molhamento e o ângulo de molhamento é aproximadamente 130° . Para os líquidos não-molhantes, o menisco é côncavo para o lado do líquido. O ângulo de molhamento fica entre 90° e 180° e a pressão P_1 é maior que P_0 . Para os líquidos molhantes, o menisco é convexo para o lado do líquido e a pressão P_0 é maior que P_1 .

A equação 3.24 pode ser simplificada para facilitar o cálculo do diferencial de pressão capilar através da interface água / ar dentro de um capilar circular. Considerando um ângulo de molhamento de 0° e σ com o valor de 0.073 N/m , chega-se a:

$$P_0 - P_1 = 146000 / r \quad (3.29)$$

onde r : raio, μm .

Pode-se fazer algumas considerações a respeito da equação anterior. Para um típico traqueídeo de conífera, tem-se um raio de $10 \mu\text{m}$. Desta forma, o diferencial de pressão, $P_0 - P_1$, é de 14600 Pa , enquanto que para o raio de uma grande pontuação, em torno de $1 \mu\text{m}$, o valor deste diferencial de pressão assume o valor de 146000 Pa . Considerando a pressão P_0 como sendo 101325 Pa , tem-se que a pressão P_1 , a partir da equação 3.29, é de -44675 Pa . O sinal negativo para o resultado da pressão do líquido determinada que esta pressão negativa é a tensão capilar. Com base no que foi exposto acima, conclui-se que com pequenos raios de capilares, as tensões capilares são as maiores possíveis e este aspecto pode explicar o colapso da madeira durante a secagem e a aspiração das pontuações. Quando o valor da pressão do líquido (P_1) é negativa, a

pressão no lado gasoso do menisco (P_0) será sempre positiva. Pode-se reduzir a pressão do gás até valores muito baixos com a utilização de bombas de vácuo.

A variação do diferencial de pressão em função dos raios dos capilares numa interface de menisco água / ar pode ser observada na figura 3.4. Os valores deste gráfico foram obtidos de acordo com o que expressa a equação 3.29.

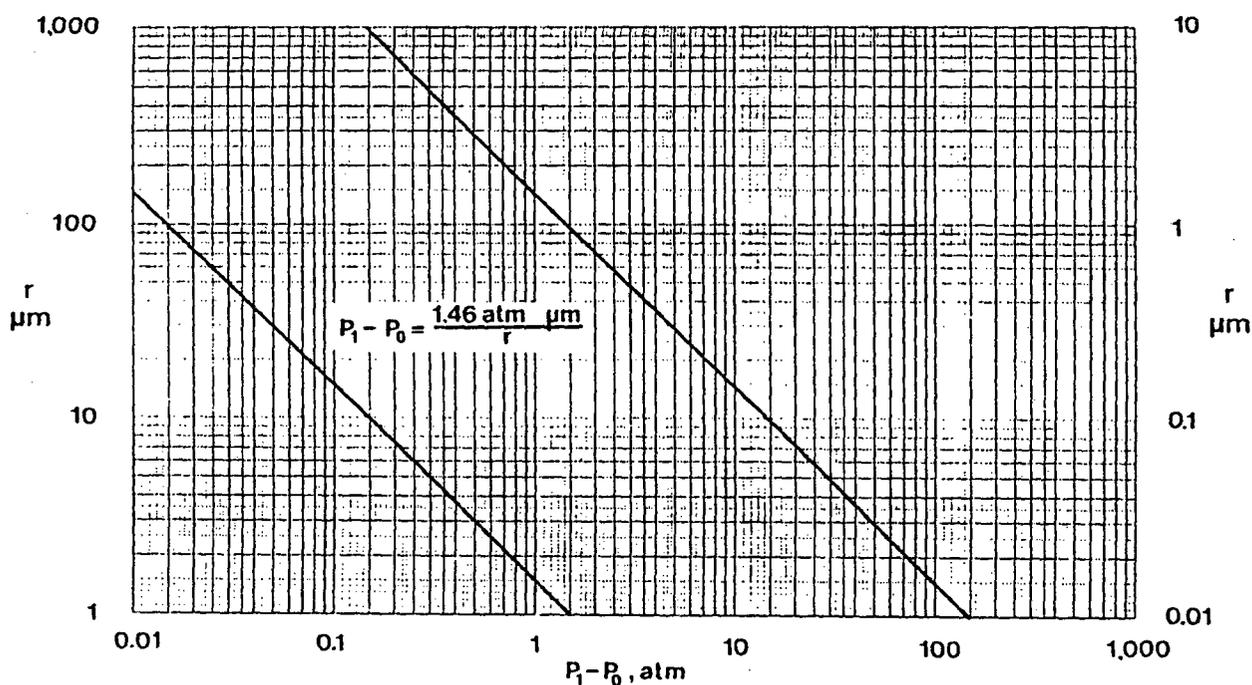


Figura 3.4 - Pressão diferencial ou potencial de água negativo através de um menisco água-ar em um capilar de raio r (Siau, 1984).

Quando se deseja aplicar mercúrio na madeira, deve-se considerar um ângulo de contato de 130° . Assumindo ainda a tensão superficial de $53.4 N/m$ na equação 3.23, tem-se:

$$P_1 - P_0 = 600.4 / r \quad (3.30)$$

3.3.3 - Colapso na Madeira

Dentre as investigações realizadas para explicar o colapso na madeira durante sua secagem, a principal causa identificada foi a tensão capilar.

O colapso ocorre na madeira quando a tensão capilar é maior que o esforço compressivo perpendicular aos veios (grã) da madeira. A análise da figura 3.4 revela que o colapso pode ocorrer se os raios das pontuações forem menores que $0.04 \mu\text{m}$.

Já foi definido que existe a água de capilaridade ou livre (líquida) no lúmen das células; a água higroscópica ou de adesão (associada a elementos celulares) e o vapor d'água (quando o lúmen não está repleto de água capilar).

O mecanismo através do qual ocorre o colapso na madeira foi explicado por Skaar (1972), cuja descrição dá-se a seguir. O fator limitante na eliminação da água durante a secagem está muitas vezes associado com a remoção da água de capilaridade. Portanto, é muito importante a compreensão do movimento da água capilar durante o processo de secagem e como ele está relacionado com a tensão capilar. Os princípios do colapso foram descritos por Hawley (1931) e citados por Skaar (1972), figura 3.5.

As forças capilares causam a subida de líquidos em tubos de pequeno diâmetro; a tensão superficial e a interface água-ar causam a tração (representada pela seta dirigida para cima, figura 3.5 a) da água imediatamente abaixo desta interface. Durante o equilíbrio na interface, a água exerce tração tanto na superfície quanto nas paredes do tubo.

A figura 3.5 b ilustra o início da evaporação do líquido da superfície capilar e neste estágio o raio de curvatura é grande e, portanto, a tensão capilar é pequena. Com a continuação da evaporação, o raio de curvatura diminui, fazendo aumentar a tensão capilar, atingindo o máximo

valor na figura 3.5 c. A figura 3.5 d ilustra o aumento do raio de curvatura do menisco da interface em função da seqüência do processo de evaporação do líquido.

As figuras 3.5 e até 3.5 l ilustram como se supõe a movimentação da água capilar na madeira com umidade acima do PSF. Para este modelo, considera-se inicialmente as células cheias de água com exceção de duas bolhas de ar de tamanhos diferentes (figura 3.5 l).

A evaporação da água das células superficiais faz com que a interface ar-líquido penetre nas aberturas (figura 3.5 f), que possuem raios menores, fazendo aumentar a força de tração que atua em todo o sistema. O aumento da tensão origina a expansão da bolha maior, uma vez que esta é mais instável. A expansão da bolha maior promove o esvaziamento da célula. A água da célula migra principalmente através da célula contígua para a superfície evaporante. Portanto, é possível para uma célula profunda da madeira perder sua água capilar mais cedo do que uma localizada próxima à superfície. Isto pode explicar a presença de bolsas úmidas em madeira parcialmente seca.

Após a expansão da bolha maior, as curvaturas das superfícies são novamente reduzidas quando o menisco penetra nas aberturas da membrana. Novamente a tensão aumenta no sistema até causar a expansão da bolha menor. Ao passo que a bolha se expande (figura 3.5 i), a água que é deslocada migra através da parede celular adjacente e evapora-se na superfície. Conforme a evaporação continua (figura 3.5 i), a tensão capilar aumenta para valores maiores que os anteriores, desde que não haja nenhuma bolha de ar para aliviar a tensão por meio da expansão. A tensão máxima é determinada pelo tamanho da menor abertura do sistema. Geralmente, a madeira pode suportar a tensão capilar máxima. Neste caso, o menisco retrai-se da célula vazia para a cheia através das aberturas das pontoações. Quando a superfície evaporante atinge a célula cheia, ela se expande dentro da célula (figura 3.5 k).

Isso resulta no aumento gradual do raio de curvatura, acompanhado por uma redução na tensão capilar. A água se evapora para o espaço de ar e evapora para fora da madeira, esvaziando

a célula (figura 3.5 l). Outras células mais profundas perdem sua água capilar de modo semelhante. Em alguns casos, as forças de tensão capilar podem causar colapso nas células cheias de água, se as aberturas da membrana forem muito pequenas e a parede celular fraca. Uma única célula ou um grupo destas pode sofrer colapso (figuras 3.5 m e 3.5 n). Este efeito é mais pronunciado a altas temperaturas, quando a parede celular perde resistência mecânica pelo aumento da temperatura.

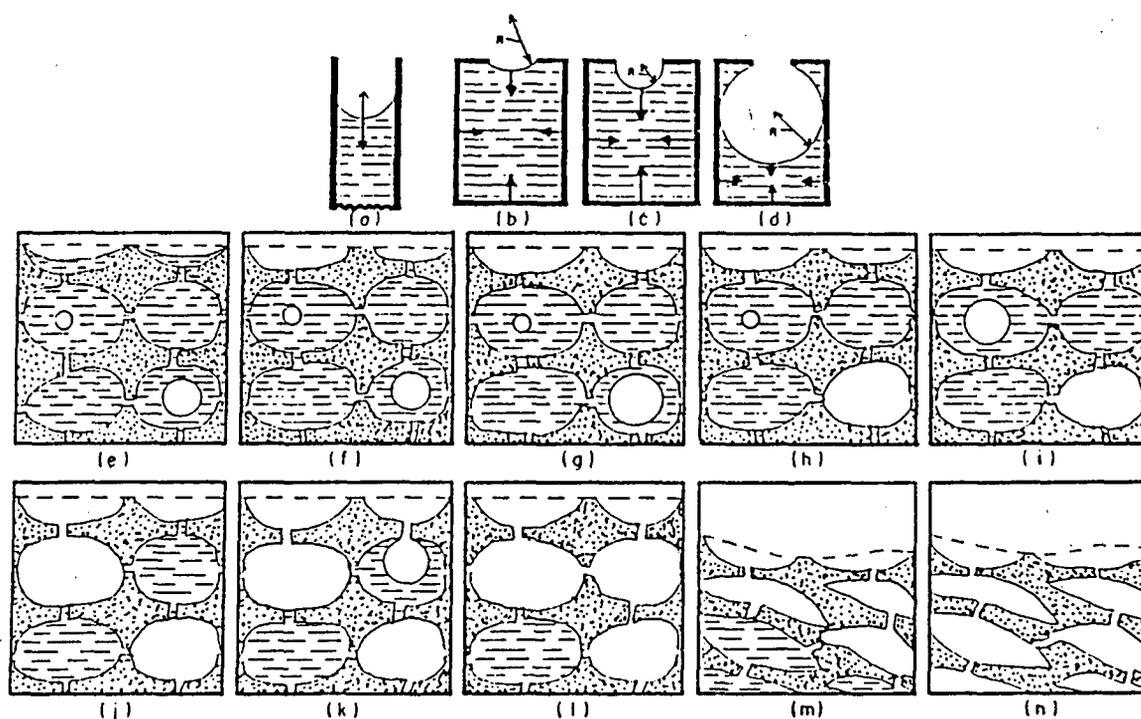


Figura 3.5 - Mecanismo do Colapso (Siau, 1971).

3.3.4- Aspiração das Pontuações

As pontuações aspiradas possuem como principal característica a redução da permeabilidade. Esta conclusão foi obtida através de estudos que relacionam a aspiração das pontuações com a tensão capilar (Siau, 1971), onde mostrou para a madeira com teor de

umidade superior ao PSF que a proporção de pontoações não-aspiradas diminui gradualmente com a redução do teor de umidade (retirada da água capilar), aproximando-se do PSF. Provou também que não há aspiração significativa abaixo do PSF para as madeiras moles. A fração de pontoações não-aspiradas foi aproximadamente proporcional à gravidade específica da madeira.

Os fatores que contribuem para a aspiração das pontoações, de acordo com Siau (1984), são:

- a evaporação do líquido deve ser capaz de formar pontes de hidrogênio;
- a evaporação do líquido deve molhar a madeira tanto quanto a água;
- a abertura da membrana da pontoação deve ser pequena;
- a relação entre a tensão superficial e o ângulo de contato deve ser tal que a força capilar inicial seja suficiente para causar o deslocamento da membrana da pontoação;
- a membrana da pontoação deve ter baixa rigidez, que é uma característica das madeiras moles.

3.3.5- Relação entre Potencial e Movimento da Umidade

Será descrito em capítulos mais adiante que o movimento da umidade em regime permanente na madeira abaixo do Ponto de Saturação das Fibras (PSF) é devido ao gradiente de umidade. De um modo mais abrangente, pode-se definir o potencial da água como a força responsável pela movimentação da água nas fases líquida (livre e higroscópica) e vapor. Este potencial é definido como zero para uma superfície de água pura a 0°C. Quando tem-se esta superfície localizada em um local fechado, permitindo que o ar fique saturado com o vapor d'água, tem-se um estado de equilíbrio estabelecido quando os potenciais das fases líquido e vapor igualam-se. Desta forma, pode-se concluir que o potencial da água do vapor saturado na temperatura de 0°C é zero.

Os principais componentes do potencial d'água em um sistema, são:

- a) ψ_s - potencial químico, devido à redução na pressão de vapor de equilíbrio sobre uma solução;
- b) ψ_p - potencial de pressão, devido à diferença de pressão estática na fase fluida;
- c) ψ_g - potencial gravitacional, devido à diferença de altura;
- d) ψ_m - potencial matricial, devido às diferenças na pressão capilar.

O componente ψ_s é normalmente o mais significativo nas relações entre madeira e umidade.

Este componente pode ser definido através de:

$$\psi_s = \psi_1^0 + \frac{RT}{18 \text{ cm}^3 / \text{mol}} \ln h \quad (3.31)$$

onde: ψ_1^0 : potencial do vapor saturado em equilíbrio com a solução apresentando uma superfície plana a 101325 Pa e a temperatura T, com ψ_1^0 assumido como zero a 0°C, para a água pura;

R: constante universal dos gases = 8.372 J/mol K;

h: pressão relativa do vapor = p/p_0 .

O potencial da água do ar úmido a 0°C é mostrado na figura 3.6 como uma função da pressão relativa do vapor. Através figura anteriormente mencionada, percebe-se que valores negativos muito elevados do potencial da água ψ_s resultam de valores moderadamente altos da pressão relativa do vapor. Esta condição indica a presença de elevados gradientes disponíveis

para causar a evaporação da umidade da água superficial da madeira saturada. Para o caso específico da secagem da madeira, o equilíbrio vai ocorrer na condição onde o potencial da água da madeira torna-se igual ao potencial do ar que a circunda, ou seja, na umidade de equilíbrio da madeira. O termo ψ_1^0 , de acordo com Castellan (1966), pode ser calculado através de:

$$\psi_1^0 = (23.77 T + 0.018 T^2) 98100 \quad (3.32)$$

onde : ψ_1^0 : expresso em Pa;

T : temperatura em Celsius.

Expressando as equações 3.31 e 3.32 em termos do potencial químico (μ), elas assumem as formas:

$$\mu = \mu_1^0 + R T \ln h \quad (3.33)$$

onde : μ : potencial químico, J/mol

R : constante universal dos gases = 8.372 J/mol K

e

$$\mu_1^0 = (10.37 T + 0.0077 T^2) 4.18 \quad (3.34)$$

onde : μ_1^0 : potencial químico do vapor saturado em equilíbrio com uma superfície de água pura na temperatura T, J/mol.

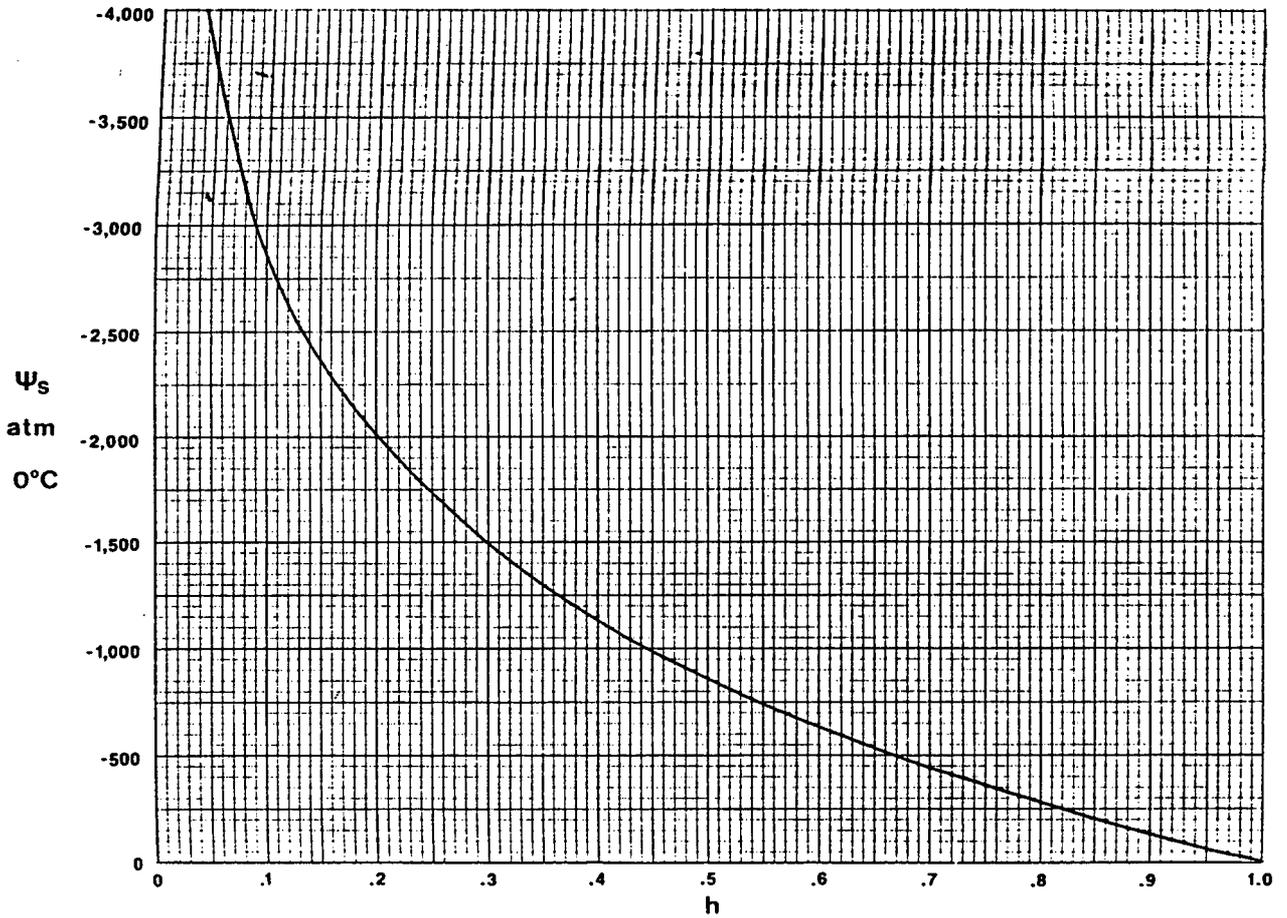


Figura 3.6 - Potencial da água do ar insaturado versus pressão relativa de vapor (h) (Siau, 1984).

O componente gravitacional pode ser calculado através de:

$$\psi_g = \rho_w g z \quad (3.35)$$

onde ρ_w : densidade da água, kg/m^3 ;

g : aceleração da gravidade, 9.80 m/s^2 ;

z : diferença de altura, m.

O componente ψ_m é representado pela diferença entre as pressões nas fases líquida e gasosa em ambos os lados de um menisco conforme definido na equação 3.24. Quando o ângulo de contato for menor que 90° , o valor desta componente será negativo no molhamento por líquido. Assim:

$$\psi_m = - \frac{2\sigma\cos\theta}{r} \quad (3.36)$$

O valor negativo do potencial acima existe na água capilar dentro da estrutura capilar da madeira. Portanto, vapor saturado pode se condensar como água capilar para umidades relativas elevadas, onde o potencial da umidade do ar é mais positivo do que o dos capilares. Desta forma, a madeira deverá ficar totalmente saturada com água capilar quando estiver exposta a um ambiente com ar saturado com umidade relativa de 100%. Assumindo σ igual a 0.073 N/m e o ângulo de contato igual a 0° para a água capilar na madeira, pode-se simplificar a equação anterior como segue:

$$\psi_m = - \frac{143200}{r} \quad (3.37)$$

onde r : raio do capilar, μm .

Se o termo ψ_m for substituído por $P_0 - P_1$ juntamente com o sinal negativo na equação 3.37, observa-se que tem-se a mesma equação que se tem em 3.29. Quando o potencial da água diminui no capilar cheio de água, o potencial do ar úmido em equilíbrio com a superfície também diminui. Isto traz como consequência uma pressão de vapor mais baixa. Pode-se calcular a

pressão relativa do vapor sobre o menisco de um capilar através da utilização das equações 3.31 e 3.36, considerando condições isotérmicas e o ângulo $\theta = 0^\circ$. Assim sendo, tem-se:

$$\ln h = \frac{36\sigma}{rRT} \quad (3.38)$$

onde : $R = 8.372 \text{ J/mol K}$.

Pode-se considerar para o parâmetro σ o valor de 0.073 N/m para a água e para o parâmetro T o valor de 313 K (40°C). Substituindo estes valores na equação anterior, obtém-se:

$$\ln h = - \frac{1.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}}{r} \quad (3.39)$$

onde : r : raio do capilar, μm .

Para valores de h maiores que 0.95 , pode-se dizer que:

$$\ln h = (h-1) \quad (3.40)$$

Substituindo esta expressão na equação 3.39 e isolando o termo r , tem-se:

$$r = 1.01 \times 10^{-3} \mu\text{m} (1-h) \quad (3.41)$$

Quando o termo dependente da temperatura na equação 3.31 é negligenciado no caso isotérmico, o potencial da água na madeira pode ser calculado como uma função da pressão relativa do vapor, considerando $h > 0.95$ e $T = 40^\circ \text{C}$:

$$\psi = 139.89 \ln h$$

ou

$$\psi = 139.89 (h-1) \quad (3.42)$$

A tabela 3.2 mostra a relação existente entre as variáveis r , H e ψ obtida através da utilização das equações 3.41 e 3.42. A relação existente entre a pressão reduzida de vapor $(1-h)$ e o raio do capilar está mostrada na figura 3.6. A partir do que foi exposto acima, tem-se que para uma umidade relativa de 98% existem capilares com raio de $0.05 \mu\text{m}$, cuja dimensão está na ordem de grandeza das aberturas das pontoações das membranas. Assim, espera-se que todos os capilares maiores, como traqueídeos ou vasos e a câmara das pontoações, estejam vazias nesta umidade relativa. Desta forma, neste nível de umidade relativa, muito pouca água capilar (ou de capilaridade) deve estar presente e este ponto pode ser considerado um bom valor para a definição do ponto de saturação das fibras (Siau, 1984).

Tabela 3.2 - Valor do potencial da água para vários raios de capilares com o correspondente valor da umidade relativa do ar a 40°C (Siau, 1984).

Raio (μm)	Umidade Relativa (%)	ψ_m (Pa)
0.01	90.5	-14590.80
0.05	98.0	-2794.50
0.1	99.0	-1459.08
1	99.9	-145.91
1.5	99.93	-101.325
4	99.97	-36.48
10	99.99	-14.19
150	99.9999	-1.01

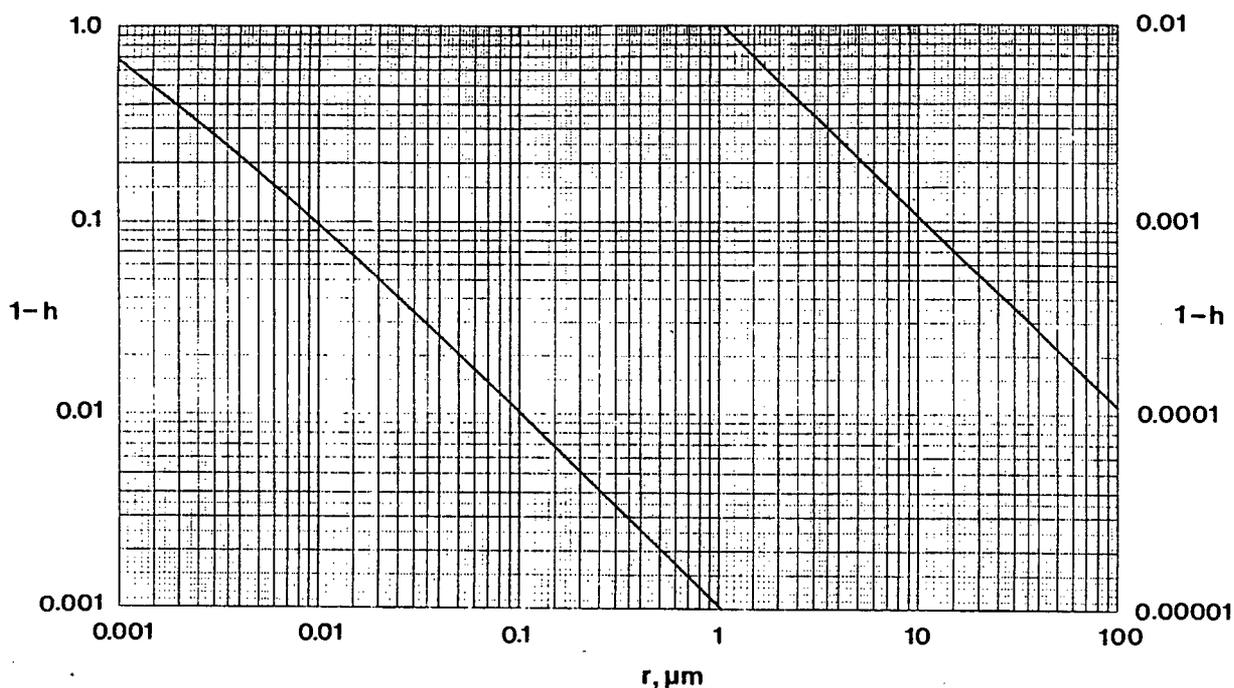


Figura 3.7 - Relação entre o raio r do capilar cheio de água e a pressão de vapor reduzida em equilíbrio a 40 °C (Siau, 1984).

3.3.6 - Comentários sobre Potencial da Água, Umidade de Equilíbrio e Ponto de Saturação das Fibras da Madeira

O ponto de saturação das fibras da madeira é definido por Stamm (1964) considerando o conteúdo de umidade da madeira na condição onde tem-se somente água higroscópica saturando as paredes celulares e portanto, não há a presença de água capilar ou de capilaridade nas cavidades celulares (lúmens). Foi visto anteriormente que o estudo do potencial da água não permite fazer uma divisão bem clara entre água higroscópica e de capilaridade. Siau (1984) propôs a definição do ponto de saturação das fibras como sendo o conteúdo de umidade que

corresponde a uma mudança grande nas propriedades da madeira. Stamm (1964) determinou valores para o ponto de saturação das fibras da *Picea sitchensis* considerando seis propriedades físicas, a citar:

a) a retração foi extrapolada para zero para as retrações volumétrica, tangencial e radial.

Isto forneceu resultados variando entre 24% e 29%;

b) a aparente compressão da água adsorvida obtida a partir da medição da densidade da parede da célula úmida por imersão no benzeno, e extrapolada até a compressão zero resultou em um valor de 30% para o ponto de saturação das fibras;

c) a medição do calor de umidificação para diferentes conteúdos de umidade da madeira foi extrapolada até um calor de umidificação zero, fornecendo um valor de 29%;

d) o ponto de desvio da linearidade da curva que representa a relação entre o logaritmo da resistividade e o conteúdo de umidade da madeira, que para baixos conteúdos de umidade, indicou um valor de 29%;

e) a intersecção da curva que representa a relação entre o esforço mecânico e o conteúdo de umidade com a linha que representa o esforço da madeira completamente inchada, o que forneceu um valor variando entre 26% a 30% de conteúdo de umidade para o ponto de saturação das fibras.

Em função da boa concordância entre os valores obtidos por Stamm (1964) a partir da medição de diversas propriedades físicas, pode-se assumir um valor médio de 30% de conteúdo de umidade da madeira para o ponto de saturação das fibras, para as madeiras de zonas temperadas. Podem existir casos particulares onde a medição do ponto de saturação das fibras indique um valor maior do que 30%, como por exemplo o valor de 52% de conteúdo de umidade para a *Achroma logopus* (madeira balsa). Porém, considerar-se-à o valor médio de 30% de umidade para o ponto de saturação das fibras da madeira.

A relação entre o conteúdo de umidade da madeira e a umidade relativa do ambiente em equilíbrio com o mesmo tem sido representada normalmente pela isoterma de sorção. É importante ressaltar que esta relação é aceitável até $h = 0.98$. Além deste valor tem-se um rápido crescimento da umidade de equilíbrio (UE) até a completa saturação ocorrer com água capilar num ambiente com 100% de umidade relativa.

3.4 - Permeabilidade

O escoamento de fluidos, especialmente a água, através da madeira pode ser dividido em dois tipos basicamente. O primeiro tipo é responsável pelo escoamento da maior parte dos fluidos, que ocorre através dos espaços vazios na estrutura da madeira por influência de um gradiente de pressão estática ou capilaridade. O segundo tipo de escoamento é dominado pela difusão, o qual pode ainda ser subdividido em dois tipos: o primeiro deles é denominado de difusão integral, uma vez que inclui a transferência de vapor d'água através do ar contido no interior da cavidade celular (lúmen) do tecido lenhoso. O segundo tipo de difusão é conhecida como difusão da água de impregnação ou água higroscópica, sendo esta água aquela que fica localizada dentro das paredes das células da madeira.

O escoamento influenciado basicamente pela capilaridade possui aplicação prática nos tratamentos com pressão de madeiras com líquidos preservativos, utilizados para a proteção da madeira contra o decaimento biológico (fungos manchadores ou apodrecedores) ou para aumentar a resistência contra o fogo. Durante as etapas iniciais da secagem da madeira, a remoção da água é grandemente influenciada pela capilaridade, considerando a secagem de madeira com teores de umidade acima de 30 %. A difusão ocorre durante a secagem da madeira em estufas ou ao ar livre (secagem natural), especialmente quando a madeira encontra-se abaixo do teor de 30 % de umidade. A difusão também pode ocorrer dentro da cavidade celular ou lúmen das células. O fenômeno da difusão será estudado com maiores detalhes mais adiante.

O entendimento sobre o escoamento influenciado pela capilaridade (*bulk flow*) pode ser melhorado através da adequada conceituação de porosidade e permeabilidade. A porosidade pode ser definida como sendo a fração de espaço vazio dentro de um sólido. A permeabilidade é uma medida da facilidade com que os fluidos são transportados através de um sólido poroso sob influência de um gradiente de pressão. A partir disto, fica claro que um sólido deve ser poroso

para ser permeável, mas isto não significa que todos os meios porosos são permeáveis. A permeabilidade pode existir somente se os espaços vazios estão interconectados através de aberturas. Uma conífera, por exemplo, é permeável porque os lúmens dos traqueídeos estão conectados por pontoações com suas respectivas aberturas nas membranas das pontoações. Caso as aberturas destas membranas estejam fechadas por alguma razão, ou se as pontoações estão aspiradas, a madeira apresentará uma estrutura do tipo célula fechada e assim, sua permeabilidade ficará próxima de zero.

3.4.1 - Lei de Darcy

O escoamento de fluidos em regime permanente através de meios porosos, assim como a madeira, pode ser descrita pela lei de Darcy. Esta lei relaciona a condutividade, o fluxo e o gradiente de forma abrangente, conforme pode ser visto abaixo:

$$\text{Condutividade} = \frac{\text{Fluxo}}{\text{Gradiente}} \quad (3.43)$$

A condutividade é normalmente considerada constante de acordo com as leis que governam os escoamentos em regime permanente e baseado no que a equação (3.43) relaciona. A condutividade na equação (3.43) pode ser entendida como a condutividade de fluidos, ou seja, a permeabilidade para a lei de Darcy. Existem inúmeras exceções que devem ser consideradas na lei de Darcy quando da sua aplicação nos escoamentos na madeira, fazendo com que a permeabilidade torne-se variável. As principais hipóteses e limitações da lei de Darcy, de acordo com Muskat (1946), são:

- O escoamento é viscoso e linear. Portanto a velocidade linear e a taxa volumétrica do escoamento são diretamente proporcionais ao diferencial de pressão aplicado;
- O fluido é homogêneo e incompressível;
- O meio poroso é homogêneo;
- Não existe interação entre o fluido e o substrato;
- A permeabilidade é independente do comprimento da amostra na direção do escoamento.

Embora estas hipóteses não sejam obedecidas em muitos momentos quando a lei de Darcy é aplicada para o escoamento de gases e líquidos aquosos através da madeira, a equação básica permanece ainda como uma relação útil entre a taxa de fluxo e o gradiente de pressão.

Considerando primeira hipótese, os escoamentos viscosos geralmente ocorrem quando os capilares são pequenos como normalmente eles se apresentam na madeira. Nestes casos existe um arraste viscoso relativamente alto por causa da elevada relação área superficial-volume. Tomando como base o exposto acima, pode-se dizer que as altas velocidades de escoamento necessárias para gerar um escoamento turbulento são improváveis. Apesar disto, escoamentos não-lineares (Siau e Petty, 1979) podem ocorrer a velocidades relativamente baixas onde um fluido movimenta-se de um capilar grande para um pequeno, como do lúmen de um traqueídeo para a abertura de uma pontoação.

Com relação à segunda hipótese enumerada, pode-se dizer que os líquidos apresentam comportamento essencialmente incompressível, mas a alta compressibilidade dos gases deve ser justificada. Considerando a terceira e quarta hipóteses, tem-se a relatar que a madeira possui uma estrutura extremamente complexa e não-homogênea, especialmente para as madeiras duras. Além disso, quando a água escoar através da madeira existem forças das pontes de hidrogênio que são exercidas pelas hidroxilas na superfície da parede celular. Isto serve de base para explicar a baixa

permeabilidade da madeira à água e às soluções aquosas em relação aos líquidos de comportamento não-polar de mesma viscosidade (Siau, 1971).

Desta forma, a lei de Darcy pode ser escrita para os líquidos de acordo com a expressão abaixo:

$$k = \frac{\text{Fluxo}}{\text{Gradiente}} = \frac{Q / A}{\Delta P / L}$$

$$k = \frac{QL}{A\Delta P} \quad (3.44)$$

onde: k = permeabilidade, $\text{m}^2 / \text{Pa s}$

Q = vazão, m^3/s

L = comprimento da amostra na direção do escoamento, m

A = área da seção transversal da amostra perpendicular à direção do escoamento, m^2

ΔP = diferencial de pressão, Pa

A partir da equação (3.44) percebe-se que a permeabilidade é numericamente igual à taxa de escoamento (vazão) de um cubo de um meio poroso com um diferencial de pressão unitário entre as duas faces opostas. A equação anterior é aplicável para amostras com faces e topos paralelos, ou seja, um paralelogramo como o apresentado na figura 3.8.

Quando a lei de Darcy é aplicada ao escoamento gasoso, a expansão do gás durante sua movimentação dentro da amostra causa uma mudança contínua no gradiente de pressão e na

vazão. Para considerar as modificações impostas pelo escoamento de gases, deve-se escrevê-la na forma diferencial, conforme apresentado abaixo:

$$k_g = -\frac{Q}{A dP / dx} \quad \text{ou} \quad k_g dP = -\frac{Q dx}{A} \quad (3.45)$$

onde: k_g = permeabilidade superficial ao gás, $m^2/Pa \cdot s$

x = distância na direção do escoamento, m

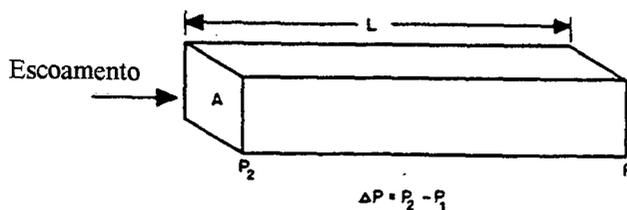


Figura 3.8 - Corpo permeável ilustrando os termos da Lei de Darcy.

A expressão permeabilidade superficial ao gás foi criada, de acordo com Siau (1984), porque seu valor normalmente é maior que a permeabilidade do líquido quando os escoamentos viscoso e por escorregamento (slip flow) são considerados. A elevada permeabilidade do gás pode ser explicada pela difusão de Knudsen, que será vista mais adiante.

A expansão isotérmica de um gás ideal devido à redução da pressão pode ser calculada a partir da lei dos gases, apresentada abaixo:

$$P V = n R T$$

onde: n = número de moles do gás = w / M_w mol

w = massa, kg

M = peso molecular, kg/mol

R = constante universal dos gases = 8.372 J/mol K

T = temperatura absoluta, K

P = pressão, Pa

V = volume, m³.

Isolando o volume na equação da lei dos gases, tem-se:

$$V = \frac{nRT}{P} \quad (3.46)$$

Ao substituir a vazão da equação (3.45) pelo volume V escoado apresentado na equação acima dividido pelo tempo, tem-se:

$$k_g PdP = -\frac{nRTdL}{tA} \quad (3.47)$$

Integrando a equação acima, considerando os limites de integração apresentados na figura 3.8, tem-se:

$$k_g \int_{p_1}^{p_2} PdP = -\frac{nRT}{tA} \int_L^0 dx \quad (3.48)$$

Assim,

$$\frac{k_g(P_2^2 - P_1^2)}{2} = \frac{nRTL}{tA} \quad (3.49)$$

$$k_g = \frac{2nRT}{tA(P_2 - P_1)(P_2 + P_1)} \quad (3.50)$$

Percebe-se na equação anterior, que $(P_2 + P_1)/2$ é a média aritmética da pressão na amostra e pode ser substituída pelo símbolo P_m , enquanto que o diferencial de pressão $P_2 - P_1$ pode ser substituído pelo símbolo ΔP . Deste modo, a lei de Darcy pode ser escrita para os gases da seguinte forma:

$$k_g = \frac{Q/A}{\Delta P/L} = \frac{P}{P_m} \quad (3.51)$$

onde P é a pressão na qual a vazão Q é medida.

A lei de Darcy também pode ser escrita na forma cilíndrica, considerando um anel inicial de integração. Esta equação pode ser desenvolvida a partir da equação existente para o corpo representado na figura 3.8.

A forma diferencial da equação 3.44 é a seguinte:

$$Q = -\frac{kAdP}{dx} \quad (3.52)$$

A área da superfície anelar é expressa por $A = 2\pi Rh$, onde R é a variável raio, L é o comprimento do cilindro (figura 3.9). Substituindo a expressão equivalente de A na forma diferencial da lei de Darcy, tem-se:

$$Q = \frac{k2\pi RLdP}{dR} \quad (3.53)$$

Após a separação das variáveis e integrando, fica:

$$Q \int_{r_{ic}}^{r_e} \frac{dR}{R} = k2\pi L \int_{p_2}^{p_1} dP \quad (3.54)$$

onde: P_2 = pressão mais elevada

P_1 = pressão mais baixa

r_e = raio externo do cilindro

r_{ic} = raio interno ao cilindro

A integração da equação(3.54) resulta seguinte expressão:

$$Q = \frac{2\pi kL\Delta P}{\ln \frac{r_e}{r_{ic}}} \quad (3.55)$$

Pode-se observar que a expressão anterior é a lei de Darcy para um corpo de forma cilíndrica para o escoamento de líquidos na direção radial. Fazendo um desenvolvimento análogo

ao anterior, pode-se chegar à expressão da lei de Darcy para o escoamento dos gases em um corpo cilíndrico a partir da expressão obtida num corpo de lados paralelos. A expressão apresentada abaixo é a expressão da lei de Darcy que representa o escoamento radial de um líquido em um corpo cilíndrico de forma anelar:

$$Q = \frac{2\pi k_g L P_m \Delta P}{P \ln \frac{r_c}{r_{ic}}} \quad (3.56)$$

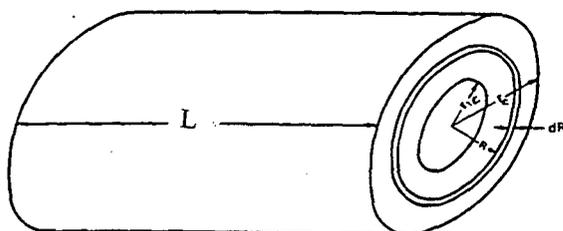


Figura 3.9 - Fluxo através de um cilindro. Fluxo é perpendicular à superfície cilíndrica.

3.4.2 - Tipos de Escoamento na Madeira

A madeira é um material poroso no qual podem ocorrer alguns tipos de escoamento, dentre eles o escoamento viscoso ou laminar, o turbulento, o não linear e o conhecido como difusão de Knudsen. O escoamento não linear pode ocorrer devido a perdas de energia cinética do escoamento na entrada de um pequeno e curto capilar (Siau, 1984).

A viscosidade pode ser interpretada como uma espécie de atrito interno que necessita da aplicação de força para que esta resistência seja vencida, proporcionando o deslocamento lento das camadas adjacentes do fluido (líquido ou gás) que está escoando, existindo assim o

movimento relativo entre estas camadas. O escoamento que resulta quando as forças viscosas são vencidas é chamado escoamento viscoso. velocidade do escoamento é diretamente proporcional à força de atrito, suprida pelo diferencial de pressão.

Pode-se expressar a velocidade do escoamento para qualquer capilar em termos adimensionais através da equação que define o número de Reynolds, que é:

$$Re = \frac{2\rho Q}{\pi r \mu} \quad \text{ou} \quad (3.57)$$

$$Re = \frac{2rV_m\rho}{\mu} \quad (3.58)$$

onde: Re: Número de Reynolds

ρ : Densidade do fluido, kg/m³

r: Raio do capilar, m

μ : Viscosidade, Pa s;

V_m : Velocidade média do escoamento do fluido, m/s

Quando o número de Reynolds supera o valor limite de 2.000 em capilares retos, observa-se que o escoamento laminar inicia a transição para o escoamento turbulento. É bastante improvável que em condições usuais se obtenha um número de Reynolds tão elevado em escoamentos em madeiras.

Siau e Petty (1979) mostraram que o diferencial de pressão é proporcional ao quadrado da vazão, lembrando que este resultado é aproximadamente o mesmo ao do escoamento

turbulento. Foi definido também que o escoamento não-linear começa com um número de Reynolds que é quase igual a razão comprimento/raio do capilar. De forma mais precisa, tem-se:

$$Re'' = \frac{0.8L}{r} \quad (3.59)$$

onde: Re'' : Número de Reynolds crítico para o escoamento não-linear.

O escoamento a um número de Reynolds abaixo do número de Reynolds crítico para o escoamento não-linear é um escoamento linear e viscoso em um capilar curto. A equação 3.59 mostra também que pode-se ter um escoamento não-linear com um número de Reynolds muito baixo, dependendo apenas da estrutura do meio poroso considerado, ou melhor, da espécie de madeira considerada. Quando aplica-se estes conceitos aos elementos estruturais da madeira, onde o fluido entra pelas aberturas das pontoações dos lúmens dos vasos, tem-se que o escoamento não linear poderia ocorrer para números de Reynolds entre 0.04 e 16, considerando raios de 0.005 até 2 μm e a espessura da membrana da pontoação em torno de 0.1 μm (Petty, 1970).

3.4.3 - Permeabilidade Específica

A permeabilidade específica pode ser definida como sendo o resultado do produto da permeabilidade pela viscosidade. Desta forma, seu valor não é afetado pelas medições no fluido e é somente uma função da estrutura porosa do meio considerado. Assim, tem-se:

$$K^* = k \mu \quad (3.60)$$

onde: K^* : permeabilidade específica, m^3/m

μ : viscosidade do fluido, $N\ s/m^2$

k : permeabilidade, $m^2 / Pa\ s$.

A partir da equação 3.60, pode-se entender que a permeabilidade específica é numericamente igual a vazão de um fluido com uma viscosidade unitária através de uma cubo unitário com um diferencial de pressão unitário entre duas superfícies paralelas. A partir desta mesma equação, tem-se que o valor da permeabilidade específica é uma função que depende somente da estrutura interna do meio poroso.

Admitindo que o meio poroso possa ser representado por um feixe de capilares paralelos de raio uniforme, a vazão pode ser escrita usando a equação de Poiseuille, por:

$$Q = N \pi r^4 \Delta P / 8 \mu L \quad (3.61)$$

onde: N : número de capilares circulares uniformes em paralelo.

r : raio do capilar

Se a equação 3.61 for aplicada para capilares curtos, ou seja, com a relação comprimento (L) / raio (r) < 100 , torna-se necessário aplicar a correção de *Couette* para considerar a perda de carga associada às perdas viscosas nas extremidades. Esta correção é feita substituindo o comprimento L pelo comprimento corrigido L' na equação 3.61, como pode ser visto abaixo:

$$\text{Seja } L' = L + 1.2 r \text{ então:} \quad (3.62)$$

$$Q = N \pi r^4 \Delta P / 8 \mu L \quad (3.63)$$

A velocidade média (v_m) é calculada dividindo-se a vazão (Q) pela área da seção transversal dos capilares em paralelo, que é dada pela expressão $N \pi r^2$. Algebricamente, tem-se:

$$v_m = Q / \text{Área}$$

$$v_m = r^2 \Delta P / 8 \mu L \quad (3.64)$$

Para se aplicar a lei de Poiseuille ao escoamento de gases, deve-se considerar a expansão destes da mesma forma como foi feito no desenvolvimento da lei de Darcy para gases (equação 3.51). Fazendo as considerações necessárias, a equação para o escoamento dos gases fica:

$$Q = N \pi r^4 \Delta P P_m / 8 \mu L P \quad (3.65)$$

Torna-se interessante aqui fazer uma comparação para levantar as semelhanças entre as equações de Darcy e de Poiseuille para o cálculo da vazão (Q). Considerando a equação 3.44 resolvida para Q abaixo, pode-se compará-la com a equação 3.61 também resolvida em Q. Assim, a equação 3.44, que representa a lei de Darcy para líquidos, fica:

$$Q = k A \Delta P / L \quad (3.66)$$

Comparação semelhante pode ser feita considerando o escoamento dos gases, sendo para a lei de Darcy válida a equação 3.51 resolvida em Q, como segue abaixo:

$$Q = k_g A \Delta P P_m / L P \quad (3.67)$$

A partir das comparações acima, percebe-se que a vazão, Q , é diretamente proporcional ao gradiente de pressão, $\Delta P/L$, nas equações 3.61 e 3.66 para os líquidos e nas equações 3.65 e 3.67 para os gases. Considerando isto, pode-se concluir que a lei de Darcy aplica-se para descrever o escoamento viscoso de líquidos e gases.

Partindo das equações 3.61 e 3.66 e igualando-as, tem-se:

$$Q_1 = Q_2$$

$$N \pi r^4 \Delta P / 8 \mu L = k A \Delta P / L$$

Simplificando a equação anterior e isolando o termo que representa a permeabilidade, k , tem-se:

$$k = N \pi r^4 / 8 \mu A \text{ ou } k = n \pi r^4 / 8 \mu \quad (3.68)$$

onde: n : número de capilares por unidade de área transversal, m^{-2} .

Da equação 3.68 pode-se concluir facilmente que a permeabilidade é diretamente proporcional ao número e aos raios das aberturas ou capilares presentes no meio poroso considerado, neste caso, a madeira.

A equação 3.68 pode ser usada para se calcular a permeabilidade da madeira quando a estrutura da mesma for semelhante ao modelo de capilares circulares uniformes e paralelos na direção longitudinal. O modelo citado anteriormente pode ser visto na figura 3.10 representando tipicamente uma dicotiledônea com porosidade difusa com vasos abertos, onde as partes claras representam o capilar. Normalmente consegue-se resultados bastante satisfatórios comparando-se a permeabilidade medida com a calculada por intermédio da equação 3.61. Este modelo de capilares paralelos pode ser aplicado também em madeiras duras com porosidade em anel porque a maior parte do escoamento ocorre através dos grandes vasos no lenho inicial.

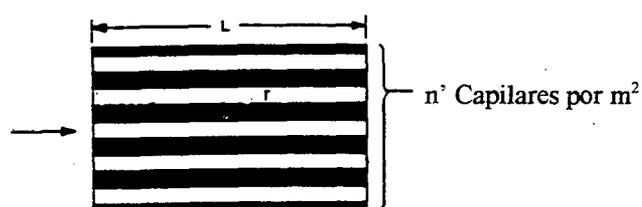


Figura 3.10 - Modelo de escoamento longitudinal baseado em capilares circulares, uniformes e paralelos (Siau, 1984).

A utilização da equação 3.68 ao longo do eixo das fibras das madeiras duras faz com que o termo ' $n\pi r^2$ ' torne-se uma fração da seção transversal ocupada pelos vasos, igual à fração de volume dos vasos. Considerando isto, a equação 3.66 pode ser escrita da seguinte forma:

$$k = a_v r^2 / 8 \mu \quad (3.69)$$

onde: a_v : fração de área de capilares circulares, paralelos e uniformes.

Caso os capilares de raio (r) sejam as únicas aberturas na estrutura do meio poroso, semelhante ao mostrado na figura 3.10, o termo a_v torna-se idêntico à porosidade (v_a).

Lembrando que a permeabilidade específica é definida pelo produto da permeabilidade (k) pela viscosidade do fluido (μ), conforme expressa a equação 3.60, pode-se aplicar esta definição nas equações 3.68 e 3.69 respectivamente. Fazendo isto, obtém-se o seguinte resultado:

$$K = n \pi r^4 / 8 \quad (3.70)$$

$$K = a_v r^2 / 8 \quad (3.71)$$

A partir das equações 3.70 e 3.71, pode-se concluir que a permeabilidade específica (K) é determinada unicamente em função da estrutura capilar do meio poroso considerado. Para o caso do modelo de capilares circulares, paralelos e uniformes, a permeabilidade específica é função somente da porosidade e do tamanho das aberturas presentes na estrutura da madeira (Siau, 1971).

3.4.4 - Modelos de Permeabilidade Aplicáveis à Madeira

Existem três modelos básicos de permeabilidade que podem ser aplicados ao material poroso madeira: o modelo de capilares paralelos simples, o modelo Petty para condutâncias em série e o modelo de Comstock para madeiras moles. Maiores detalhes sobre cada um destes modelos podem ser vistos no Apêndice B.

3.4.5 - Efeito do Conteúdo de Umidade na Permeabilidade

É claro que a água capilar deve ser removida da madeira antes que ela seja impregnada com uma solução de material preservativo. Seria esperado que a madeira com conteúdo de umidade acima do Ponto de Saturação das Fibras (PSF) tivesse uma permeabilidade muito baixa devido a alta pressão capilar a se superar para forçar as bolhas de ar através das aberturas das pontoações.

O efeito do conteúdo de umidade abaixo do Ponto de Saturação das Fibras na permeabilidade de diversas madeiras duras e moles foi pesquisado por Comstock (1968). De modo geral, a permeabilidade das madeiras moles aumenta com a diminuição do conteúdo de umidade, mas a diferença não é grandemente significativa considerando seu efeito na impregnação de líquidos neste tipo de madeira. Normalmente os aumentos de permeabilidade são duplicados ou triplicados para um conteúdo de umidade decrescente de 24% para 6%. Diversas madeiras duras apresentam o efeito oposto, com o aumento da permeabilidade longitudinal com o aumento do conteúdo de umidade. Isto poderia ser devido a um aumento no volume fraccional dos vasos.

3.4.6 - Permeabilidade da Parede Celular

Os três modelos de permeabilidade apresentados anteriormente foram desenvolvidos considerando como premissa básica o fato da permeabilidade da parede celular ser zero. É conhecido, entretanto, que líquidos polares como a água podem difundir-se através da parede celular. Palin e Petty (1981) descreveram um procedimento experimental utilizado para a medição da permeabilidade da parede da célula da madeira *Picea abis*. Inicialmente os espaços vazios da madeira foram completados com cera de parafina que não penetraria a parede celular. Devido a

permeabilidade extremamente baixa, não foi possível utilizar o gradiente de pressão estática para a determinação.

Em vez disso, um gradiente de pressão osmótica foi aplicado utilizando soluções de glicol polietileno de peso molecular suficientemente grande para prevenir a entrada do soluto na parede celular. A média dos valores obtidos foi $68 \times 10^{-21} \text{ m}^3/\text{m}$ na direção longitudinal, $7 \times 10^{-21} \text{ m}^3/\text{m}$ na direção radial e $4 \times 10^{-21} \text{ m}^3/\text{m}$ na direção tangencial. Uma vez que estes valores estão muitas ordens de magnitude abaixo das permeabilidades medidas na madeira, a hipótese de considerar a permeabilidade da parede celular como zero nos modelos anteriormente desenvolvidos está explicada.

3.4.7 - Variação da Permeabilidade com as Espécies

A permeabilidade é uma propriedade muito variável na madeira. Smith e Lee (1958) mediram a permeabilidade longitudinal ao ar de aproximadamente 100 espécies de madeira e encontraram uma faixa de valores com razão de $5 \times 10^6 : 1$ para as madeiras duras e $5 \times 10^5 : 1$ para as madeiras moles. As dificuldades experimentais impediram a obtenção das permeabilidades tangenciais. Dentre os valores obtidos, pode-se citar o de algumas espécies, como por exemplo o do carvalho vermelho, altas, em torno de $19.74 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{m}$ por causa de seus amplos vasos no lenho inicial. A madeira *Tilia americana* (American basswood) é muito permeável por causa de sua estrutura de porosidade difusa. O alburno dos Pinus estão entre as madeiras mais permeáveis dentre as madeiras moles e podem possuir altos valores de permeabilidade na faixa de $9.87 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{m}$ a $78.96 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{m}$. Os pinheiros e cedros normalmente possuem permeabilidades muito menores, na faixa de $9.87 \times 10^{-24} \text{ m}^3/\text{m}$. Uma das madeiras que possuem uma das mais baixas permeabilidades é o cerne da Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* var. *glauca*), cuja

permeabilidade está na faixa de $9.87 \times 10^{-16} \text{ m}^3/\text{m}$, tornando muito difícil qualquer tratamento por meio do método de impregnação.

Após estudos de diversos pesquisadores, pode-se resumir a relação entre permeabilidades longitudinal e tangencial como variando entre 500 e 80.000 para 1, sendo que a maioria destas encontra-se acima da relação 10.000 : 1. Por outro lado, as relações entre as permeabilidades longitudinal e radial varia de 15 : 1 até 50.000 : 1. Esta grande variação na direção radial poderia ser relacionada com as enormes diferenças na permeabilidade dos tecidos do raio. Com raios impermeáveis uma elevada razão poderia ser esperada pelo fato de que a maioria das pontuações estão localizados nas superfícies radiais dos traqueídeos, resultando em baixa permeabilidade radial. Raios altamente condutivos poderia aumentar a baixa razão entre permeabilidades.

Nas madeiras duras, Comstock encontrou pouca diferença entre as permeabilidades tangencial e radial. Ele organizou o resultado de diversos pesquisadores sobre a razão entre as permeabilidades longitudinal e tangencial, encontrando uma faixa variando entre 30.000 e 4×10^8 : 1, sendo que a maior razão pertence aos Carvalhos vermelhos com porosidade em anel. Smith e Lee (1958) encontraram a razão de 65.000 : 1 para a *Fagus sylvatica* e Kininmonth (1971) determinou o valor de 50.000 : 1 para a *Nothofagus fusca* e 1×10^6 : 1 para o *Eucalyptus regnans*. Estes elevados valores para as razões entre permeabilidades nas madeiras duras podem ser explicadas primeiramente pela característica destas madeiras, apresentando geralmente uma fraca penetrabilidade dos raios nas madeiras duras comparado com o que ocorre nas madeiras moles. O outro motivo é que a permeabilidade muito alta da porosidade em anel nas madeiras duras com vasos abertos também contribui para elevar a razão entre as permeabilidades.

3.5 - Difusão na Madeira - Movimento da Umidade em Regime Permanente

A difusão é um processo que pode ser definido como o fluxo de massa molecular influenciado por um gradiente de concentração. Desta forma, nota-se que é necessária a presença de um diferencial de pressão parcial para que este fenômeno aconteça. A primeira lei de Fick expressa a relação entre o fluxo e o gradiente de concentração para condições de regime permanente, considerando condições isotérmicas. Aplicando a definição da lei de Fick para o transporte do vapor d'água através da madeira, tem-se:

$$D = \frac{w / tA}{\Delta c / L} \quad (3.72)$$

onde: D: coeficiente de difusão do vapor d'água na madeira, m²/s;

w: massa de vapor d'água transportada através da madeira no tempo t, kg;

A: área da seção transversal da amostra, m²;

L: comprimento na direção do fluxo, m;

t: tempo, s;

Δc : diferença de concentração, kg/m³.

Definindo a diferença de concentração em função da diferença de conteúdo de umidade, tem-se:

$$\Delta c = \frac{\Delta M G \rho_w}{100} \quad (3.73)$$

onde: G : gravidade específica da madeira para um conteúdo de umidade,
 M ;

ρ_w : densidade da água = 100 kg/m³.

Substituindo a equação 3.73 na equação 3.72, tem-se:

$$D = \frac{100wL}{tA\Delta M\rho_w} \quad (3.74)$$

Existem, de acordo com Skaar (1954), outras maneiras de se descrever o transporte isotérmico de umidade, como por exemplo através do uso dos gradientes de concentração, conteúdo de umidade ou pressão parcial de vapor. Porém, a utilização destas equações conduzirá a resultados idênticos.

3.5.1 - Coeficiente de Difusão da Água Higroscópica no Interior da Parede Celular

Stamm (1959) realizou um experimento consistindo da saturação dos lúmens de amostras da madeira *Picea sitchensis* com uma liga de baixo ponto de fusão (bismuto) a uma temperatura de 26.7 °C. Estas amostras tinham espessuras entre 2.5 e 5 mm. Para a determinação do coeficiente de difusão é necessário inicialmente equilibrar a madeira em uma determinada umidade relativa, para depois colocá-la em um ambiente com uma umidade relativa maior. Os resultados foram obtidos através da inclinação da curva que relaciona o conteúdo de umidade com a raiz quadrada do tempo a dois terços do ponto de saturação, utilizando o método transiente. Os pontos representados no gráfico são aproximadamente lineares até dois terços da saturação. Estes resultados representam o coeficiente de difusão longitudinal da substância da parede celular.

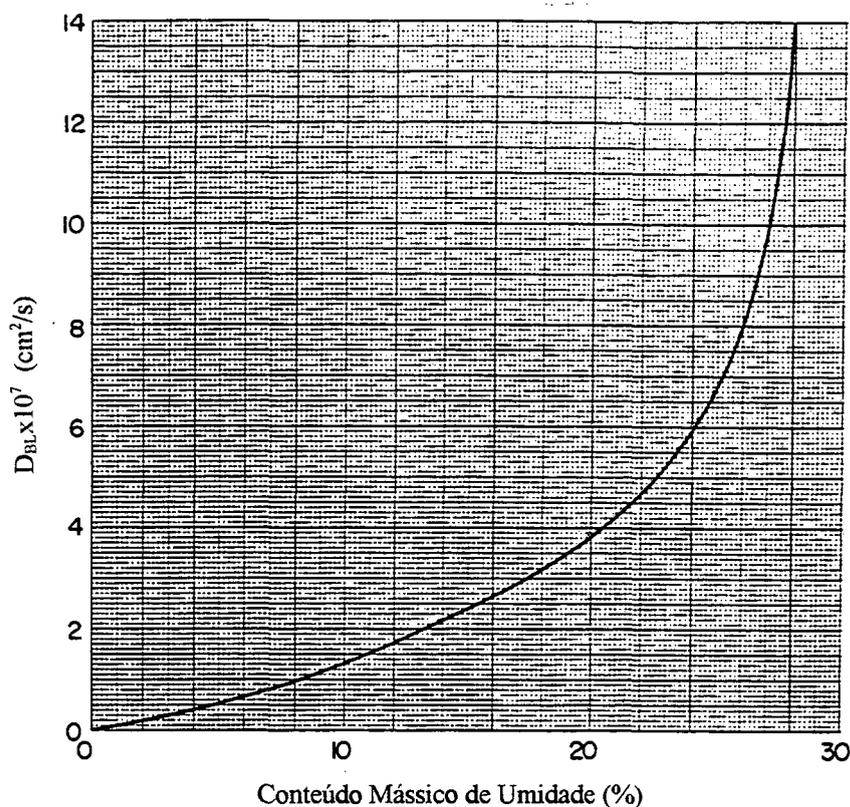


Figura 3.11 - Coeficiente de difusão longitudinal da substância da parede celular como função do conteúdo de umidade da madeira (Stamm, 1959).

Os resultados que podem ser vistos na figura 3.11, representam os valores obtidos para a adsorção. A evolução da curva com o aumento do conteúdo de umidade pode ser explicado pela baixa energia de ligação existente entre os locais de sorção e as moléculas de água higroscópica para elevados conteúdos de umidade. Teoricamente, esta energia de ligação deveria aproximar-se de zero no ponto de saturação das fibras. Isto justifica-se pelo fato de que, a partir deste ponto, qualquer acréscimo de umidade traduz-se em água capilar ou de capilaridade.

Comstock (1963) encontrou valores baixos para os coeficientes de difusão medidos para a adsorção e desorção para conteúdos de umidade acima de 12%, utilizando os métodos de regime

permanente e transiente, sendo que os maiores valores foram determinados pelo método de regime permanente. Estes efeitos foram atribuídos à diminuição do conteúdo de umidade de equilíbrio da madeira devido à tensão compressiva. Uma vez que a desorção é utilizada na secagem da madeira com elevadas velocidades para o escoamento do ar, esperava-se que os valores obtidos por Stamm fossem consideravelmente menores do que os existentes na secagem da madeira.

Como uma escala de conteúdo de umidade foi utilizada para a determinação do coeficiente de difusão, torna-se necessário calcular o conteúdo de umidade médio correspondente ao coeficiente de difusão determinado. Utilizando o conteúdo de umidade a dois terços do ponto de saturação, tem-se para o conteúdo médio de umidade:

$$M_m = M_1 + \frac{2(M_2 - M_1)}{3} \quad (3.75)$$

onde: M_m : conteúdo de umidade médio para uma difusividade média;

M_2 : maior conteúdo de umidade;

M_1 : menor conteúdo de umidade.

Considerando o que foi exposto até o momento, conclui-se que o coeficiente de difusão depende do conteúdo de umidade. O perfil de umidade não é conhecido, porém sabe-se que ele não pode ser linear. Isto justifica-se pelo fato de que o coeficiente de difusão não é constante.

Da definição do coeficiente de difusão, tem-se que ele é expresso como uma relação entre o fluxo e o gradiente. Desta forma, o fluxo pode ser definido como o produto entre o coeficiente de difusão e o gradiente. A relação entre o coeficiente de difusão médio e o coeficiente verdadeiro variável pode ser escrito como:

$$D_{Tm}(M_2 - M_1) = \int_{M_1}^{M_2} D_T dM \quad (3.76)$$

A integral da equação anterior não pode ser calculada corretamente sem que o perfil de umidade através da amostra seja conhecido. De acordo com Stamm (1959), estes perfis de umidade aproximam-se de parabólicos. Para melhor compreensão da equação 3.76, pode-se representá-la na forma gráfica (figura 3.12), onde a área representada entre os conteúdos de umidade M_1 e M_2 é igual à área determinada por $D_{Tm}(M_2 - M_1)$, para um dado conteúdo de umidade médio. A equação apresentada em 3.76 não deve ser utilizada na direção longitudinal da madeira, uma vez que o coeficiente de difusão diminui com o aumento do conteúdo de umidade. Isto ocorre como consequência dos caminhos de condução através do ar que está contido na cavidade celular de cada célula da madeira.

A relação entre os coeficientes de difusão longitudinal e tangencial no seio da parede celular foi determinada por Stamm (1964) e pode ser representada através de:

$$D_{BL} = 2.5 D_{BT} \quad (3.77)$$

onde: D_{BL} : coeficiente de difusão longitudinal da água higroscópica na parede celular;

D_{BT} : coeficiente de difusão transversal da água higroscópica na parede celular;

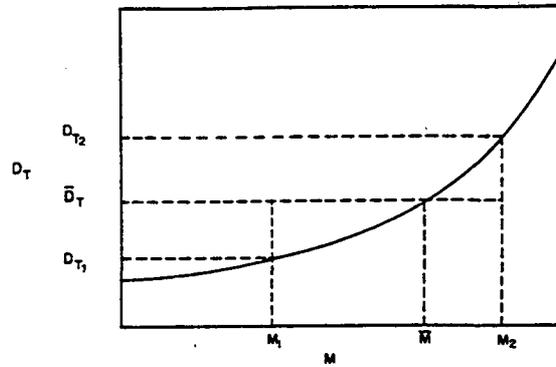


Figura 3.12 - Relação entre os coeficientes de difusão e o conteúdo de umidade para uma temperatura constante (Siau, 1984).

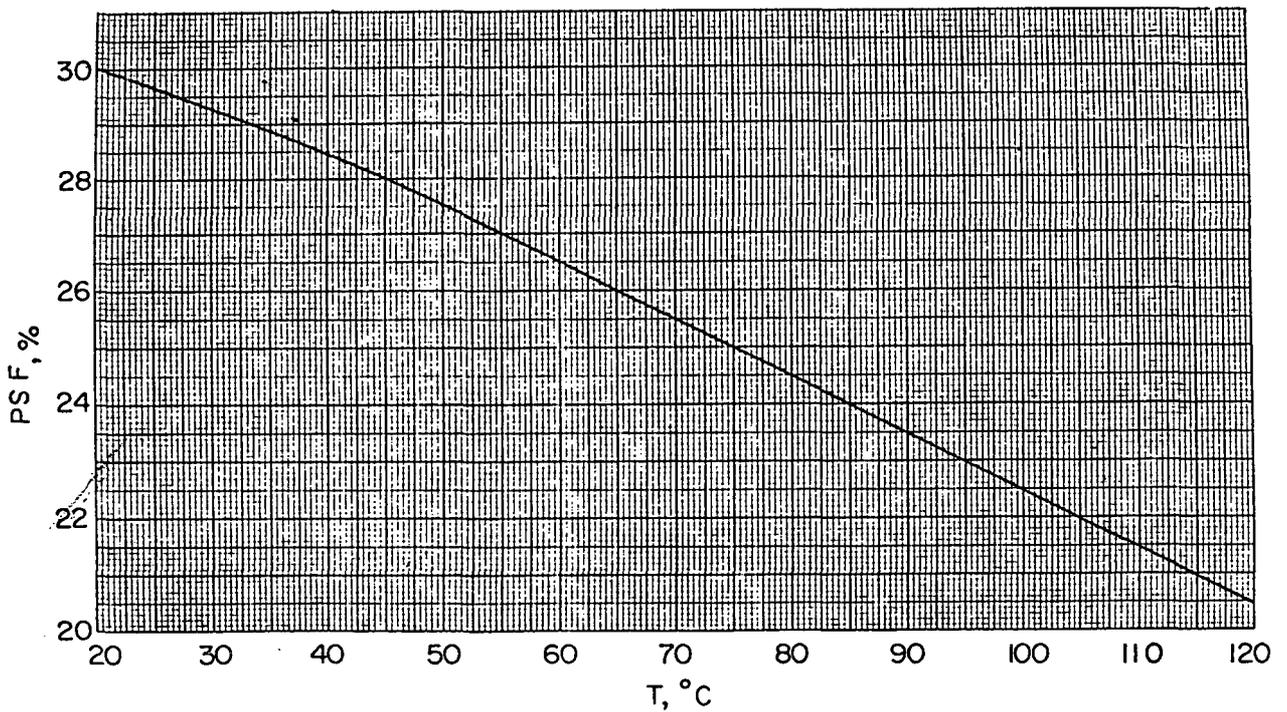


Figura 3.13 - Diminuição do ponto de saturação das fibras com a temperatura (Stamm e Nelson, 1961).

De acordo com Stamm e Nelson (1961), a relação entre o ponto de saturação das fibras e a temperatura apresenta-se de forma inversamente proporcional. Considerando o valor de 30% para o ponto de saturação das fibras na temperatura de 20 °C, tem-se que este valor é diminuído de 0.1 % para cada grau de aumento na temperatura. Para um detalhamento do comportamento da evolução curva que relaciona os dois parâmetros, pode-se observar a figura 3.13.

3.5.2 - A Influência do Conteúdo de Umidade e da Temperatura

A relação de dependência do coeficiente de difusão com a temperatura foi determinada por Stamm (1964), onde foi estabelecido que o coeficiente de difusão aumenta de forma diretamente proporcional à temperatura. Isto faz com que esta relação fique de acordo com o estabelecido pela equação de Arrhenius. Sendo assim, tem-se:

$$D_T = C \exp\left(\frac{-E_b}{RT}\right) \quad (3.78)$$

onde: D_T : coeficiente de difusão transversal da água higroscópica na madeira, m^2/s ;

C : constante;

E_b : energia de ativação = 35.5 kJ/mol para $M = 10\%$.

Considerando um conteúdo de umidade que varie entre 5% e 25%, pode-se estabelecer com boa aproximação que a relação entre a energia de ativação e o conteúdo de umidade é:

$$E_b = (9200 - 70 M) \times 4.18 \text{ J/mol} \quad (3.79)$$

Introduzindo as equações 3.79 e 3.77 na equação 3.78 e fazendo os ajustes necessários, encontra-se para o coeficiente de difusão transversal a equação seguinte, válida para um conteúdo de umidade variando entre 5% e 25%:

$$D_{BT} = 0.07 \exp\left[\frac{-(9200 - 70M)}{RT}\right] \quad (3.80)$$

A equação anterior é representada graficamente através da figura 3.14.

O gráfico mostra a forte dependência do coeficiente de difusão D_{BT} com relação à temperatura e ao conteúdo de umidade. Esta dependência deixa claro que existe uma diferença entre este resultado e o que é definido pela lei de Fick. Esta lei determina que o coeficiente de difusão é constante, o que não ocorre. Mesmo a lei de Fick não sendo obedecida, pode-se utilizar a relação entre o fluxo e o gradiente em cálculos iterativos para melhorar sua precisão.

3.5.3 - Coeficiente de Difusão do Vapor no Lumen

O coeficiente de transporte do vapor d'água através das cavidades celulares, pode ser obtida considerando o coeficiente de interdifusão molecular do vapor d'água no ar. A equação abaixo desenvolvida por Dushman (1962) mostra a forma de cálculo deste coeficiente:

$$D_a = 0.001 \left(\frac{76}{P}\right) \left(\frac{T}{273}\right)^{1.75} \quad (3.81)$$

onde: D_a : coeficiente de interdifusão do vapor d'água no ar considerando grande diluição, m^2/s ;

P: pressão total, Pa;

T: temperatura, K.

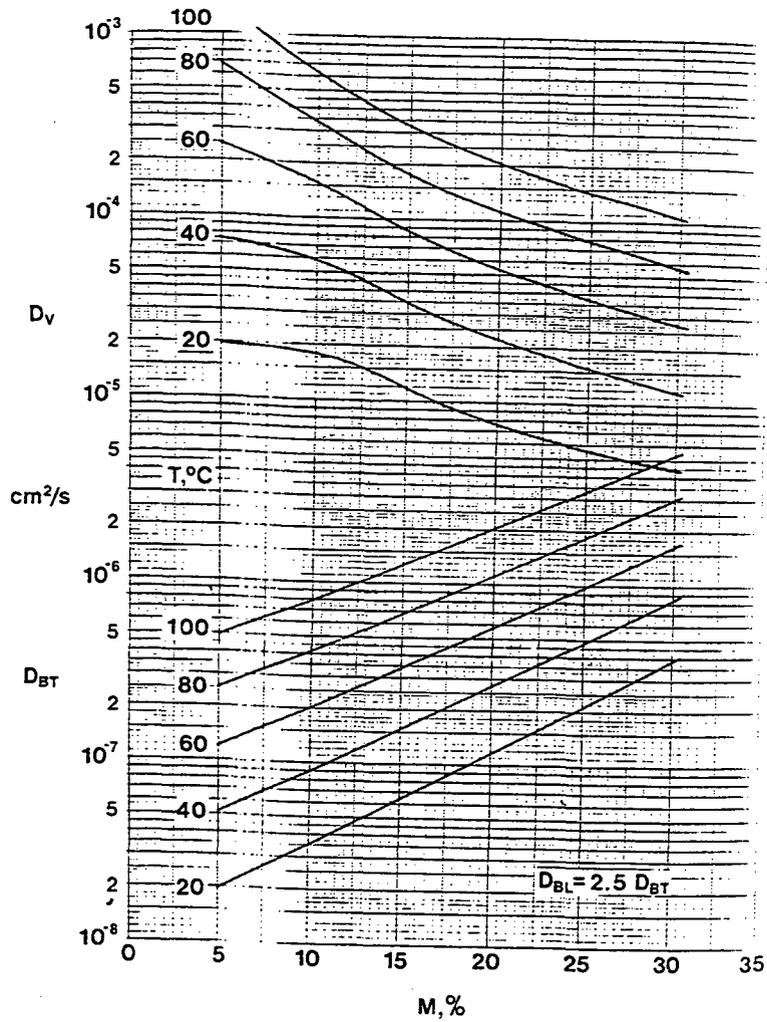


Figura 3.14 - Valores para os coeficientes de difusão para várias temperaturas (Siau, 1984).

O coeficiente de interdifusão definido acima, é baseado no gradiente de concentração de umidade no ar. Porém, o gradiente deve ser convertido para considerar a concentração de umidade da parede da célula que está em equilíbrio com o ar, levando em conta a isoterma de sorção. Quando esta conversão é feita, o coeficiente tem seu símbolo modificado de D_a para D_v .

Aqui considera-se a hipótese de que a concentração do vapor d'água que está nas cavidades celulares apresenta-se em equilíbrio com o conteúdo de umidade da parede celular.

A figura 3.15 mostra o fluxo de difusão da umidade, que ocorre da esquerda para a direita. Neste caso, considerando $M_2 > M_1$ (umidade da madeira) e $UR_2 > UR_1$ (umidade relativa do ar). Desta forma, pode-se observar que existe um gradiente de umidade relativa no interior da cavidade celular associado a um gradiente de umidade da madeira (conteúdo de umidade), lembrando que o gradiente de umidade da madeira é definido pela isoterma de sorção.

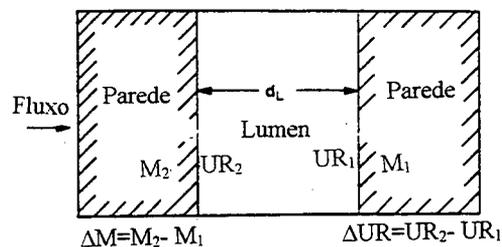


Figura 3.15 - Diferenças de concentração entre as paredes celulares e o lúmen (Siau, 1984).

Como o coeficiente de difusão é calculado através da razão entre o fluxo e o gradiente, tem-se que os fluxos são iguais, mas os gradientes não o são para D_a e D_v . O gradiente para o coeficiente D_a pode ser calculado através das equações:

Para o gradiente no ar:

$$D_a = \frac{18p_0 \Delta UR}{100RTd_L} \quad (3.82)$$

onde: D_a : coeficiente de interdifusão no ar, m^2/s

$\Delta UR = UR_2 - UR_1$: gradiente de umidade relativa, %

d_L : diâmetro da cavidade celular ou lumen, μm ;

18 kg/kmol = peso molecular da água.

Para o gradiente na parede celular:

$$D_a = \frac{\Delta M G'_M \rho_w}{100 d_L} \quad (3.83)$$

onde: D_a : coeficiente de interdifusão na parede celular, m^2/s

G'_M : gravidade específica da parede celular úmida;

ρ_w : densidade da água = 1000 kg/m³.

De acordo com o que Siau (1984) propõem, a conversão entre os coeficientes de difusão de D_a para D_v pode ser feita multiplicando o coeficiente de interdifusão anterior pelo gradiente de concentração no ar e dividindo o resultado pelo gradiente na parede celular. Assim, obtém-se:

$$D_v = \frac{18 D_a p_0}{G'_M \rho_w RT} \frac{dUR}{dM} \quad (3.84)$$

Maiores detalhes sobre o cálculo do coeficiente de difusão acima mencionado podem ser vistos em Siau (1984). Modelos de difusão transversal e longitudinal da umidade na madeira podem ser vistos no Apêndice C.

CAPÍTULO 4 - O PROCESSO DE SECAGEM

4.1 - Definição de Secagem

Citando Hart (1966) a remoção da umidade da superfície da madeira pode ser teoricamente o fator limitante da velocidade de secagem durante os estágios iniciais, ao passo que o transporte do interior para a superfície pode ser o fator quase inteiramente limitante durante os últimos estágios da secagem. No entanto, há geralmente um substancial período em que ambos são importantes. Desta forma, pode-se definir a secagem da madeira como sendo um balanço dinâmico entre a transferência de calor da corrente de ar para a madeira, a evaporação superficial, a difusão de umidade no interior do meio, o fluxo de água capilar nas cavidades da madeira e o desligamento de moléculas de água das cadeias de celulose. O domínio dos efeitos divergentes que diferentes fatores tenham sobre este fenômeno constitui a tecnologia da secagem da madeira.

4.2 - Características Gerais

Denomina-se madeira verde àquela que possui um teor de umidade acima de 30%. Já foi definido anteriormente que para cada condição do ar ambiente (temperatura de bulbo seco e umidade relativa), existe uma determinada condição que a madeira irá atingir, que é conhecido como umidade de equilíbrio, desde que a madeira esteja exposta a este ambiente. Quando a madeira verde é exposta a um ambiente que favoreça a redução da umidade, ou seja, quando a umidade de equilíbrio for menor que a umidade da madeira, observa-se que sua superfície perde água e que suas fibras tendem a atingir a umidade de equilíbrio determinada pelas condições do ar ambiente.

A circulação do ar permite a remoção da umidade da superfície, promovendo a movimentação capilar da água do interior para a superfície da madeira. Desta forma, nos estágios iniciais da secagem, as forças capilares determinam a movimentação desta água (água capilar ou de capilaridade). As forças capilares atuam com grande intensidade desde teores de umidade superiores a 100% até o ponto de saturação das fibras (28% a 30% de umidade). Segundo Jankowski (1988), nesta etapa inicial, a rapidez da secagem depende da velocidade do ar e de sua capacidade de receber o vapor d'água retirado da superfície da madeira. Quando o teor de umidade da madeira fica abaixo do ponto de saturação das fibras, o fenômeno de transporte da água passa a ser governado internamente pelo fenômeno da difusão. Nesta etapa final da secagem, a velocidade de circulação do ar não influi diretamente no aumento da velocidade da secagem, pois a resistência dominante se encontra no interior da madeira. As partes mais externas de uma peça de madeira tendendo a atingir primeiro o ponto de saturação das fibras que as partes mais internas, permitem concluir que em uma mesma peça de madeira os fenômenos de capilaridade e difusão podem ocorrer simultaneamente.

A circulação do ar permite, além da remoção da umidade, a transferência de calor do sistema de aquecimento para a madeira. Analisando o processo sob o aspecto térmico (Jankowsky, 1996), o calor sensível da corrente de ar é transferido para a superfície da madeira, proporcionando a evaporação da água. O vapor gerado nesta etapa é transferido para o ar em circulação. Uma parte deste calor recebido pela superfície da madeira é responsável pelo aquecimento da superfície, e será transportado da superfície para o interior da peça por condução (Spolek, 1980). A evaporação da água superficial ocasiona um gradiente de umidade no sentido da espessura da peça que promove a movimentação da água do interior até a superfície.

A movimentação da água do interior para a superfície da madeira depende, portando, da velocidade de circulação do ar, da temperatura, da permeabilidade, da densidade da madeira, da espessura da peça e dos gradientes de umidade.

4.3 - Gradiente de Umidade

Em função da evolução do processo de secagem, a água é transferida da superfície da madeira para o ar devido à movimentação deste fluido. Nesta condição, chega-se a um ponto em que a umidade na superfície é igual ou inferior ao ponto de saturação das fibras. Com isto, tem-se a formação de um gradiente de umidade na madeira, possibilitando que a água contida na madeira abaixo do ponto de saturação das fibras possa ser removida.

Como já foi definido anteriormente, a primeira de Fick relaciona o fluxo de umidade com o gradiente de umidade na madeira. De modo que:

$$\frac{m_a}{tA} = D \frac{\Delta M}{100e} \quad (4.1)$$

onde: m_a : massa de água que se movimenta na madeira, kg;

t: tempo, s;

A: área perpendicular à direção do fluxo m^2 ;

D: coeficiente de difusão, m^2/s ;

ΔM : diferença de umidade entre as duas superfícies, %;

e: espessura da peça, m.

De acordo com Jankowsky (1988), os gradientes de umidade na madeira variam em função de sua permeabilidade e do tempo de secagem. Existem três situações básicas: madeiras de baixa, média e alta permeabilidade. Como já discutido, a permeabilidade é uma característica da madeira que está relacionada à existência de aberturas nas paredes celulares e que exerce muita

influência na movimentação da água capilar. A densidade é uma característica que avalia a quantidade de parede celular existente e está relacionada ao processo de difusão.

No caso de madeiras com baixa permeabilidade, inicialmente o teor de umidade superficial ficará abaixo do ponto de saturação das fibras e se aproximará de modo rápido da umidade de equilíbrio. O que foi exposto anteriormente é válido para o caso em que o teor de umidade da madeira é muito alto. Como não há continuidade dos capilares nas madeiras com baixa permeabilidade, tem-se por consequência que não existe transferência capilar.

As madeiras de permeabilidade média apresentam como característica o fato de que a velocidade da evaporação superficial da água é maior que a movimentação da água da parte interna para externa (superfície). As madeiras de permeabilidade média representam a maior parte das madeiras conhecidas comercialmente.

As madeiras com alta permeabilidade apresentam uma rápida movimentação da água do interior para o exterior, fazendo com que as camadas superficiais da madeira fiquem com um teor de umidade igual ao do ponto de saturação das fibras. Desta forma, para este caso, tem-se o equilíbrio entre a velocidade de evaporação superficial e a movimentação da água do interior para o exterior da madeira.

Os resultados obtidos por Fernandes e Galvão (1978) permitem dizer que a influência do tempo de secagem diminui à medida que o processo de secagem se desenvolve. Como o fenômeno da difusão é proporcional ao gradiente de umidade da madeira abaixo do ponto de saturação das fibras, a velocidade de evolução do processo de secagem tende a diminuir no tempo.

4.4 - Fatores que influenciam a Taxa de Secagem

Dentre os fatores que afetam a velocidade da secagem da madeira, tem-se aqueles que influenciam a capilaridade e outros a difusão. Jankowsky (1988) estabelece o parâmetro taxa de secagem, r_s , que serve para avaliar as variáveis que influenciam no processo de secagem da madeira. A equação que define a rapidez da secagem pode ser observada abaixo:

$$r_s = \frac{P_a}{tP_s} \quad (4.2)$$

onde: r_s : taxa de secagem;

P_a : massa da água removida durante a secagem, kg

P_s : massa da madeira seca em estufa a 103°C, kg;

t : tempo para a remoção da umidade, s .

Pode-se dizer que madeiras com maior densidade precisam de um maior tempo de secagem, ou seja, o tempo de secagem é diretamente proporcional à densidade da madeira. Isto pode ser explicado, uma vez que aumentando a massa seca (P_s) na densidade maior, existe uma maior quantidade de água para ser retirada da madeira.

De modo análogo, uma madeira com maior espessura traz como consequência o aumento da massa seca (P_s), sem significativa alteração da área superficial de evaporação da água. Desta forma, o aumento da espessura resulta em uma secagem mais demorada, pois há uma maior quantidade de água a ser retirada da madeira.

A retirada da água da superfície da madeira através do processo de evaporação depende da umidade relativa do ambiente (UR), da velocidade de circulação do ar e da temperatura. A

umidade relativa estabelece a capacidade do ar ambiente em receber a água proveniente da madeira. A circulação do ar determina a remoção das moléculas de água da superfície pelo ar ambiente em movimento. Kollmann e Côté (1968) e Hildebrand (1970) afirmam que as velocidades maiores são mais eficazes nos estágios iniciais do processo de secagem de madeiras com elevados teores de umidade. A temperatura influencia diretamente na rapidez da secagem, pois o aumento de temperatura aumenta a pressão de saturação do vapor. De acordo com Siau (1971), a elevação da temperatura proporciona energia para as moléculas de água se deslocarem de um local de adsorção para outro.

Considerando apenas os fenômenos de superfície, pode-se dizer que a rapidez da secagem é inversamente proporcional à densidade e espessura da madeira, assim como à umidade relativa do ar (UR). Ela é diretamente proporcional à velocidade de circulação do ar ambiente. A permeabilidade é o fator que influencia a retirada da água capilar.

A rapidez da secagem depende também do fenômeno de difusão da água de impregnação. Como a difusão caracteriza-se pela movimentação da água das camadas úmidas mais internas para as camadas externas mais secas, tem-se que a rapidez da difusão depende da densidade e da espessura da madeira. Siau (1971) estabelece que no processo de difusão da água de impregnação, a rapidez da secagem é inversamente proporcional à densidade e à espessura da madeira.

O gradiente de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras é diretamente proporcional à rapidez da secagem. Siau (1971) estabelece que com a diminuição do gradiente de umidade, a rapidez da secagem também diminui.

Com relação ao efeito da umidade inicial da madeira, pode-se ter duas situações, de acordo com Jankowsky(1988):

a) em madeiras de permeabilidade média, o tempo total da secagem independe da umidade inicial;

b) quando existem limitações para a retirada da umidade inicial e/ou a madeira é impermeável, o tempo total da secagem depende da umidade inicial.

De acordo com Rasmussen (1961), a posição de onde a tábua (peça de madeira) é retirada do tronco da árvore influencia seu comportamento na secagem. Normalmente obtém-se tábuas através de cortes nas direções tangencial e radial. A tábua do corte na direção tangencial geralmente seca mais rápido que a do corte na direção radial. Porém, a peça da direção tangencial é mais suscetível a defeitos de secagem como rachaduras superficiais, de topo e em favos. A peça da direção radial exige maiores cuidados no início do processo, mas após isto, pode ser submetida a condições mais severas de secagem em relação à peça da direção tangencial. A condição mais agressiva pode ser adotada, desde que a estufa tenha somente peças da direção radial.

4.5 - Métodos de Secagem

Existem duas formas de secagem conhecidos atualmente, a secagem natural e a secagem artificial.

4.5.1 - Secagem Natural

A secagem natural também é conhecida como secagem ao ar livre, uma vez que o nome do método está bastante relacionado com o modo como é executado. A secagem natural, de acordo com Simpson (1984), é o processo onde a madeira fica exposta ao ar livre ou em galpões, sem nenhum controle de temperatura, umidade relativa e velocidade de circulação do ar. A madeira fica empilhada em um pátio adequado para o processo, onde as peças de madeira

(tábuas) ficam empilhadas (gradeadas) umas sobre as outras, separadas por espaçadores ou tabicos. Deste modo, a umidade de equilíbrio a que a madeira fica exposta depende exclusivamente das variações atmosféricas.

Este processo depende de diversas variáveis, como por exemplo, estações do ano, espessura da madeira, espécie da madeira, temperatura, umidade relativa e velocidade de circulação do ar ambiente no qual a madeira está empilhada ou gradeada. Também influenciam fatores como a localização geográfica, elevação em relação ao nível do mar, predominância de ventos secos ou úmidos, tendência para a formação de neblinas, proximidade a rios ou lagos, índice pluviométrico e duração média da insolação (luz solar). (Kollmann e Coté, 1968).

Destro (1980) estabelece que a velocidade de secagem é aproximadamente linear até que a madeira atinja o Ponto de Saturação das Fibras. A partir deste teor de umidade, a velocidade de secagem diminui à medida que o teor de umidade da madeira diminui. Dentre as vantagens da secagem natural da madeira, pode-se citar:

- teor de umidade mais uniforme no interior da peça;
- madeira livre de tensões no final do processo;
- defeitos de secagem praticamente inexistentes.

As desvantagens do uso do processo de secagem natural são as seguintes:

- impossibilidade do controle das condições climáticas;
- longo tempo de secagem;
- estoques elevados de madeira, imobilizando capital;
- necessidade de espaço suficiente para pátio de secagem.

O planejamento de um pátio de secagem natural deve considerar no mínimo os seguintes aspectos:

- velocidades e direções dos ventos predominantes;
- máxima utilização do espaço;
- facilidade de locomoção entre as pilhas de madeira;
- cuidados para a proteção da madeira nos topos e nas camadas superiores.

4.5.2 - Secagem Artificial Controlada

Os métodos de secagem artificial englobam os processos de pré-secagem, secagem convencional, secagem por desumidificação, secagem a altas temperaturas, aumento contínuo da temperatura (CRT), secagem a vácuo e secagem solar.

As principais vantagens dos processos de secagem artificial controlada em relação à secagem natural estão relacionadas abaixo (Jankowsky, 1988):

- a) redução do período de tempo de secagem, possibilitando giro mais rápido do capital;
- b) maior controle sobre os defeitos da secagem;
- c) possibilidade de eliminar fungos e insetos;
- d) redução da umidade da madeira a teores previamente determinados, em qualquer época do ano;
- e) eliminação da necessidade de grandes pátios requeridos para a secagem natural.

4.5.2.1 - Secagem Forçada ou Pré-Secagem

A secagem forçada pode ser definida como um processo que é executado normalmente em galpões cobertos ou câmaras, onde a circulação do ar ocorre em função da utilização de ventiladores. Nestas câmaras existe o controle de temperatura e umidade relativa, além de um sistema de aquecimento. A velocidade de secagem neste processo chega a ser praticamente o dobro da velocidade da secagem natural (Destro, 1980).

A capacidade de um pré-secador para grandes volumes de madeira varia de 400 a 1000 m³. A construção do pré-secador é bastante simples, não necessitando de isolamento térmico nas paredes e no teto. As condições internas são mantidas com uma temperatura entre 25 e 35 °C e uma umidade relativa entre 50 e 80 %. A velocidade de circulação do ar é normalmente entre 0,4 e 0,8 m/s. Deste modo, o investimento inicial e o custo operacional são bastante reduzidos quando comparados com os outros métodos de secagem artificial. (Jankowsky, 1996).

Os pré-secadores são recomendados para madeiras em que a secagem é classificada como de média a difícil, além dos casos em que se deseja secar madeiras espessas. O estudo efetuado por Rice (1994) mostra que 40 % do total de madeiras de folhosas, com origem dos principais estados produtores dos Estados Unidos, é submetida ao processo de pré-secagem.

Como a pré-secagem é conduzida em condições bastantes suaves quando comparadas com as secagens artificiais, mesmo sendo mais agressivas que a secagem natural, o risco de surgimento de defeitos de secagem é pequeno. Quando a madeira que está no pré-secador atinge um teor de umidade que permite suportar condições de secagem mais agressivas, a madeira é retirada do pré-secador e passa a ser seca seguindo um processo de secagem artificial. (Jankowsky, 1996).

Os desenvolvimentos mais recentes (Wengert, 1995) mostram que tem surgido pré-secadores conjugados que operam com dois estágios. O primeiro estágio destina-se à madeira com maior teor de umidade, enquanto que o segundo estágio é utilizado para a madeira que sai com menor umidade do primeiro estágio. Os controles automatizados têm permitido um rápido desenvolvimento destes pré-secadores.

Do mesmo modo como na secagem natural, a secagem natural forçada tem sua velocidade aumentada no estágio da secagem que vai do estado da madeira verde até o Ponto de Saturação das Fibras. Abaixo deste ponto, a secagem forçada não apresenta vantagens econômicas, uma vez

que as velocidades de secagem dos processos natural e forçado são praticamente iguais.(Destro, 1980).

4.5.2.2 - Secagem Convencional

A secagem artificial convencional de madeira é um processo conduzido em câmaras, secadores ou estufas que operam em temperaturas variando entre 40 e 90 °C (Simpson, 1991). As estufas possuem um sistema de aquecimento, um sistema de umidificação do ar, um conjunto de dampers ou janelas que permitem a renovação do ar do interior da estufa através da admissão de ar externo e um sistema de circulação de ar.

O sistema de aquecimento é formado normalmente por um conjunto de trocadores de calor aletados (radiadores) que pode utilizar como fluido térmico o ar quente, água quente, vapor d'água ou óleo térmico. O fluido térmico mais utilizado na indústria é o vapor d'água (300 a 800 kPa), justificando deste modo o fato das estufas de secagem convencional também serem conhecidas por estufas a vapor. O sistema de umidificação do ar funciona através da liberação de vapor a baixa pressão ou da aspersão de água fria dentro da estufa, também é conhecido como chuveiro.

O sistema de circulação é composto de ventiladores que podem estar posicionados lateralmente em relação à madeira ou sobre o teto falso acima da madeira gradeada dentro da estufa. Os dampers ou aberturas são localizados em posições estratégicas para permitir que o funcionamento dos ventiladores promova a renovação do ar quente e úmido do interior da estufa por ar frio e seco do ambiente externo. A atuação e controle sobre o sistema de aquecimento, umidificação, circulação do ar e dampers permite obter as condições climáticas ideais para o desenvolvimento do processo de secagem com sucesso. (Destro, 1980).

O método de secagem convencional pode ser recomendado para qualquer tipo de madeira. Porém, alguns detalhes devem ser observados para o projeto e dimensionamento da estufa, assim como a potência térmica dos trocadores de calor e a capacidade de circulação do ar. A potência térmica dos trocadores de calor depende do tipo de madeira a secar, da quantidade de madeira disponível dentro da estufa (volume líquido da estufa), do coeficiente de convecção, do fluido térmico e da área dos trocadores de calor. A capacidade de circulação do ar depende da velocidade do deslocamento do ar (função do tipo de madeira) e da área livre dentro da estufa. (Kollmann e Côté, 1968).

Quando se deseja processar uma madeira de fácil secagem, como por exemplo o Pinus, recomenda-se uma estufa estreita (menor dimensão no sentido transversal da pilha), com potência térmica elevada e alta capacidade de circulação e renovação do ar. Para as madeiras de secagem lenta ou difícil, recomenda-se uma estufa com potência térmica e capacidade de circulação do ar menores. (Jankowsky, 1996).

O método de secagem convencional é um método utilizado em praticamente todo o mundo para a secagem de madeiras de folhosas (madeiras duras). Nos principais estados produtores de madeira de folhosas dos Estados Unidos, 82 % das estufas em funcionamento são do tipo convencional e produzem aproximadamente 4,0 milhões de metros cúbicos de madeira seca anualmente. (Rice, 1994).

O processo de secagem convencional é conduzido utilizando normalmente programas de secagem definidos previamente, onde estão determinadas as temperaturas de bulbo seco e úmido, a umidade de equilíbrio, o gradiente de secagem para cada faixa de teor de umidade da madeira desejada. Alguns programas de secagem disponíveis estão sendo compilados (Boone, 1988), além de existirem trabalhos que permitam selecionar programas de secagem para espécies pouco conhecidas (Brandão e Jankowsky, 1992).

Os programas de secagem podem ser dos tipos umidade-temperatura, tempo-temperatura ou baseados no gradiente de secagem (relação entre a umidade da madeira e a umidade de equilíbrio da madeira). Os programas do tipo umidade temperatura são bem desenvolvidos em Jankowsky (1988). Informações sobre os programas tempo-temperatura podem ser encontradas em Rasmussen (1968) e Bramhall e Wellwood (1976). Os programas de secagem baseados no gradiente de secagem são desenvolvidos por Hildebrand (1970).

A rápida redução da umidade da madeira pode ser conseguida com altas temperaturas e baixas umidades relativas. Porém, condições muito agressivas podem ocasionar diversos defeitos de secagem e isto justifica a determinação de valores limites para os parâmetros de controle da secagem para cada estágio do processo. De modo geral, tem-se quatro fases distintas: o aquecimento inicial, a secagem propriamente dita, a uniformização e o condicionamento.

O aquecimento é a fase do processo onde a madeira é aquecida sem que se inicie o processo de secagem. O ar do interior da estufa é aquecido até atingir a temperatura de bulbo seco desejada com os dampers de renovação fechados. Assim é obtido o equilíbrio térmico entre a madeira e o ar, com umidade relativa alta (acima de 85%). A diferença higrométrica (diferença entre termômetros de bulbo seco e úmido) não deve ser maior que 2 °C. Para que isto possa ser possível é recomendável a utilização da liberação de vapor dentro da estufa (sistema de umidificação). O tempo de aquecimento da madeira é proporcional à sua espessura, sendo considerado como tempo mínimo a proporção de 1 hora para cada 1 cm de espessura da madeira a ser seca. (Hildebrand, 1970).

A secagem propriamente dita é fase do processo onde ocorre a retirada da umidade da madeira. Na etapa de retirada da água capilar, recomenda-se a utilização de temperaturas de bulbo seco baixas, variando de 40 a 60 °C, e elevadas umidades relativas para prevenir o aparecimento de colapso e rachaduras. De acordo com Kollmann e Coté (1968), o potencial de

secagem (PS) recomendado para as madeiras duras (Eucalipto, Carvalho) varia entre 1,6 e 2,0, enquanto que este potencial varia entre 3,0 a 3,5 para as madeiras moles (*Pinus* sp.). A umidade relativa depende da espécie de madeira a ser seca. Para espécies de difícil secagem, recomenda-se umidades relativas iniciais acima de 85%. Segundo Rasmussen (1968), a umidade relativa pode ser reduzida inicialmente em torno de 1/3 do valor utilizado na fase de aquecimento. Normalmente considera-se que a umidade relativa deve ser tanto maior quanto maiores forem a velocidade de circulação do ar e a tendência da madeira a ter defeitos de secagem. A temperatura inicial de bulbo seco deve ser mantida até que o teor de umidade da madeira atinja o Ponto de Saturação das Fibras, sendo que a partir deste ponto a temperatura deve ser elevada para permitir a retirada da água de impregnação. O tempo de retirada da água da madeira depende da densidade e permeabilidade, espessura, temperaturas e umidade relativa adotadas.

A uniformização é uma etapa do processo de secagem que tem como finalidade reduzir a variação dos teores de umidade entre as peças de madeira. Segundo Pratt (1974), uma variação de +/- 2% na umidade da madeira ao final da secagem pode ser considerada um bom resultado.

O condicionamento é a etapa do processo que possui a responsabilidade de eliminar as tensões internas provenientes do processo de secagem. Esta etapa consiste basicamente em aumentar a temperatura e a umidade relativa para que o reumidecimento das camadas superficiais suavize o gradiente de umidade na peça de madeira. (Jankowsky, 1988).

A constante evolução dos controles tem auxiliado muito no desenvolvimento da secagem convencional, permitindo um controle mais rigoroso das condições de secagem, através de softwares que monitoram e controlam estas condições. A maior limitação dos sistemas de controles automáticos tem sido a medição da umidade da madeira. Atualmente esta medição é feita através da variação da resistência elétrica da madeira com sua umidade, utilizando pinos metálicos cravados na superfície da peça. Este método é confiável somente abaixo do Ponto de Saturação das Fibras. (Jankowsky, 1996).

4.5.2.3 - Secagem por Desumidificação

O processo de secagem por desumidificação do ar está baseado na capacidade que o ar possui em absorver umidade do ambiente, desde que se observe que quanto maior a temperatura, maior será esta capacidade de absorção de água. O processo de secagem por desumidificação do ar também é conhecido por processo de secagem a baixas temperaturas. Neste processo, as duas variáveis principais de controle são a temperatura e a umidade relativa do ar, onde a temperatura varia normalmente entre 25 e 45 °C.

A madeira é colocada em uma câmara hermeticamente fechada ou estufa, semelhante ao que se possui no processo de secagem convencional, no interior da qual o ar é forçado a circular. O ar ao circular dentro da câmara passa através de uma serpentina a baixa temperatura (fria) onde perde grande parte da umidade por condensação. Após isto, o ar passa através de trocadores de calor formados por resistências elétricas, onde se é aquecido. Após o aquecimento, o ar é insuflado para o interior da câmara, passando entre as peças de madeira (tábuas) gradeadas e ganhando a umidade disponível na superfície das peças de madeira. O ar carregado de umidade passa pela serpentina fria para que a água absorvida possa ser removida pela condensação, completando o ciclo do processo. É interessante observar que este processo de secagem é realizado sem que ocorra a renovação de ar da câmara com o ambiente externo. Existem dois tipos de controles para o processo de secagem por desumidificação, que são o controle por umidade relativa do ar e por tempo. Maiores detalhes sobre este processo podem ser vistos em Destro (1980).

4.5.2.4 - Secagem a Altas Temperaturas

O processo de secagem de madeira a altas temperaturas consiste em se manter a temperatura acima de 100 °C, podendo atingir em alguns casos o patamar de 150 °C. Este

processo de secagem é recomendado para madeiras de coníferas (madeiras moles), uma vez que não tem obtido sucesso em aplicações em madeiras de folhosas (madeiras duras) (Wengert, 1995). Kaumann (1961) relata que as madeiras de folhosas secas parcialmente em baixas temperaturas (pré-secagem) ou na secagem natural tem maior possibilidade de ter sucesso na secagem a altas temperaturas.

A construção da estufa ou secador para o processo a altas temperaturas é bastante similar ao processo de secagem convencional. A diferença básica está no sistema de aquecimento (potência térmica), sistema de circulação do ar (velocidade) e capacidade de renovação de ar, que devem ser significativamente maiores para atender às necessidades do método. A grande vantagem deste processo é o tempo reduzido de secagem da madeira. Para justificar esta afirmação, é interessante descrever que madeiras muito permeáveis, como o Pinus por exemplo, podem ser secos em 24 horas ou menos utilizando uma temperatura de 120 °C sem graves defeitos de secagem. Na secagem convencional, o tempo de secagem desta mesma madeira de Pinus necessita de um tempo aproximado que varia entre 80 a 90 horas (Simpson, 1984).

A grande limitação deste processo está nos defeitos de secagem apresentados pelas madeiras no final deste método. Os problemas que ocorrem com mais frequência são o colapso, a rachadura em favos (*honeycomb*) e a descoloração superficial. O tempo de exposição da madeira com elevados teores de umidade a altas temperaturas dentro da estufa algumas vezes resulta na degradação térmica que reduz algumas propriedades mecânicas da madeira tais como os módulos de ruptura e de elasticidade (Rasmussen, 1968).

As estufas que operam a altas temperaturas mais modernas permitem um controle mais rigoroso dos parâmetros do processo, onde os problemas mais comuns estão relacionados às espécies de madeira a serem secas. O tempo reduzido do processo de secagem faz com que as pequenas diferenças de umidade inicial ou a diferença da taxa de secagem radial/tangencial

originem significativa diferença no teor final de umidade da madeira. Algumas alterações na velocidade de circulação do ar e no desenvolvimento de programas de secagem especiais tendem a amenizar os problemas apresentados por este método (Wengert, 1995).

4.5.2.5 - Secagem com Aumento Constante da Temperatura

O processo de secagem com aumento constante da temperatura também é conhecido por CRT (*Continuously Rising Temperature*) e foi desenvolvido para a secagem de madeiras moles ou de coníferas. O processo CRT tem como vantagens reduções no tempo de secagem em estufa, consumo de energia e defeitos de secagem. No início da secagem convencional em estufa de madeira verde, assume-se que a superfície da madeira possui a temperatura igual à temperatura de bulbo úmido do ar circulante. Com a evolução do processo de secagem, a temperatura da superfície aumenta e aproxima-se da temperatura de bulbo seco. Isto traz como resultado, a diminuição progressiva da diferença das temperaturas entre o ar e a madeira, fazendo com que a transferência de calor entre o ar e a madeira diminua por consequência (Simson, 1984).

O processo de secagem com aumento constante da temperatura (CRT) é caracterizado pelo fato de controlar a transferência de calor do ar para a madeira mantendo uma diferença de temperatura ar-madeira constante através do aumento da temperatura de bulbo seco durante o processo de secagem. O resultado deste processo é uma taxa de secagem aproximadamente constante ao longo da secagem, ao invés da taxa de secagem decrescente convencional. Isto está ilustrado na figura abaixo.

Uma vantagem adicional deste processo é que a temperatura inicial de secagem é relativamente baixa, normalmente em torno de 60 °C. Isto proporciona uma boa taxa de remoção de umidade, minimizando defeitos de secagem e perdas de propriedades mecânicas devido à degradação térmica. Quando a secagem atinge os estágios finais, tornam-se necessárias altas

temperaturas, aproximadamente 100°C, para manter a taxa de secagem. A esta altura do processo a madeira não está tão suscetível aos defeitos de secagem e à degradação. (Simpson, 1984)

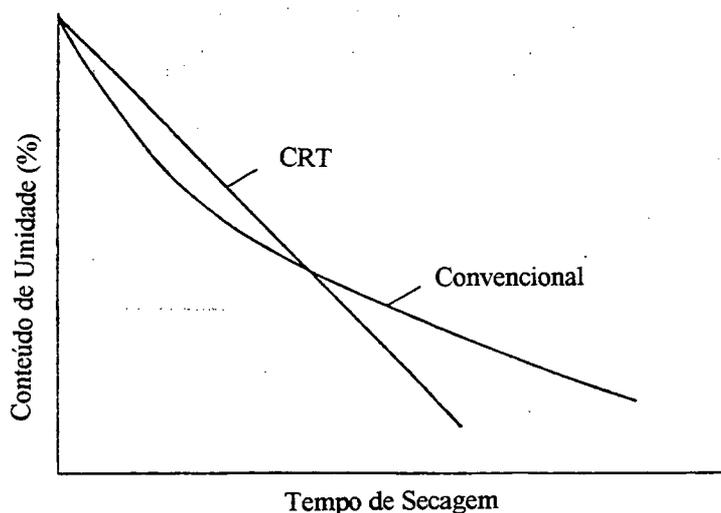


Figura 4.1 - Curvas de secagem esquemáticas dos processos de secagem CRT e convencional (Simpson, 1984).

4.5.2.6 - Secagem a Vácuo

O processo de secagem a vácuo caracteriza-se pela redução da temperatura de ebulição da água quando submetida a um ambiente com pressões inferiores à pressão atmosférica. A diminuição na pressão dentro da estufa possibilita boas taxas de secagem em baixas temperaturas. Isto é extremamente interessante para a secagem de madeiras espessas ou muito suscetíveis a defeitos tais como rachaduras superficiais, rachaduras internas e colapso (Smith et al, 1994).

Este processo é conhecido desde a década de 20, porém era considerado anti-econômico. A partir da década de 60 voltou a ser pesquisado. Segundo Simpson (1984), os problemas com os sistemas de secagem a vácuo estão relacionados principalmente com o desenvolvimento de técnicas de transferência de calor para a madeira e com o elevado custo operacional.

De acordo com Kanagawa (1993), as possíveis fontes de calor para o processo de secagem a vácuo podem ser as abaixo relacionadas:

- aquecimento descontínuo com vapor, obtido através de ciclos de vaporização a pressão ambiente e secagem sob pressão reduzida;
- aquecimento por radiação através de trocadores de calor, com o ar aquecido circulando por convecção forçada;
- aquecimento por contato com pratos aquecidos, colocados entre as camadas de madeira a serem secas;
- aquecimento por rádiofreqüência, através da geração de um campo eletromagnético ao redor da madeira, o qual gera calor através da movimentação das moléculas da água.

Após a comparação entre os diferentes métodos de aquecimento para este processo, Swigon (1993) conclui que as condições termodinâmicas mais adequadas são aquelas onde utiliza-se o aquecimento contínuo por rádio freqüência (micro ondas).

Resultados da secagem a vácuo utilizando o aquecimento com rádiofreqüência demonstram que pode-se secar madeira de coníferas, nas espessuras entre 50 e 152 mm, em períodos de tempo menores que 40 horas, obtendo um nível de qualidade igual ou superior ao proporcionado pela secagem convencional (Avramidis, 1992, 1994). A secagem da madeira de carvalho na espessura de 52 mm pode ser obtida por este processo em períodos de tempo menores que 60 horas com qualidades similares à secagem convencional (Smith, 1994).

Ainda segundo Smith (1994), o investimento inicial elevado e o custo da energia elétrica limitam a popularização deste processo de secagem.

4.5.2.7 - Secagem Solar

O interesse pela aplicação da energia solar na secagem da madeira existe há muitos anos, porém este interesse foi intensificado pela crise de energia dos anos 70. A maioria das atividades tem-se restringido ao projeto e teste de pequenos secadores experimentais, com pouco uso comercial. Normalmente o processo de secagem com energia solar utiliza coletores planos de energia solar que utilizam o ar como fluido de transmissão de calor (Simpson, 1984).

O processo de secagem, de acordo com Destro (1980), ocorre de acordo com a seqüência a seguir. A energia radiante (solar) atravessa uma superfície translúcida e é absorvida por um coletor que pode ser uma placa preta ou a própria superfície interna das paredes ou do piso da estufa. O calor absorvido é transferido pelo ar com o auxílio de ventiladores, circula através do material devidamente gradeado até que absorva a umidade para então ser rejeitado ao exterior.

As temperaturas típicas utilizadas em estufas com energia solar variam entre 15 a 20 °C acima da temperatura ambiente, atingindo temperaturas máximas entre 50 e 60 °C. Os controles têm sido normalmente simples, utilizando umidostatos, termostatos e umidificadores de baixo custo (Simpson, 1984).

4.5.3 - Vaporização na Secagem

A vaporização na secagem da madeira é uma técnica que tem sido explorada com diversos propósitos, como por exemplo, a redução dos níveis de tensão de crescimento (Weik et alii, 1984), o aumento na permeabilidade (Cutter e Phelps, 1986; MaCkay, 1971; Chen, 1975), o melhoramento na estabilidade dimensional (Chafe, 1990) e o melhoramento na penetração de preservativos (Barnes, 1986). A vaporização também é utilizada para recondicionar espécies propensas ao colapso (Greenhill, 1935; Chafe, 1990), e na redução do tempo de secagem (Campbell, 1961; Ellwood e Erikson, 1962; Haslett e Kininmoth, 1986). As vantagens ou

benefícios da vaporização estão supracitados. Porém, esta técnica apresenta, segundo alguns pesquisadores, algumas desvantagens tais como a possibilidade de redução das propriedades mecânicas da madeira, quando utilizados tempos prolongados (Campbell, 1961) e aumentar a contração, colapso e susceptibilidade a rachaduras durante a secagem (Kaumann, 1961; Chafe, 1990; Haslett e Kininmoth, 1986). Existem, no entanto, diversas discordâncias com respeito às desvantagens da utilização da vaporização, especialmente sobre a contração e a degradação da madeira. É importante ressaltar que a vaporização deve ser utilizada seguindo critérios científicos para se obter os melhores resultados na secagem, pois se utilizada de forma inconseqüente, certamente trará mais prejuízos que benefícios.

4.5.3.1 - Pré-Vaporização

O estudo de Campbell (1961) sobre a utilização da pré-vaporização na secagem do *Eucaliptus regnans* resultou na redução do tempo e dos defeitos de secagem, sem alterar a resistência mecânica da madeira. A pré-vaporização por períodos de tempo de 12, 24 ou 36 horas da madeira de imbuia (*Ocotea porosa*) de 30 mm de espessura, permitiu melhorar a velocidade de secagem entre 35 a 40%, além de uma reduções no teor de umidade de equilíbrio e no coeficiente de contração da madeira em 20 a 33,3% (Nock, 1974). De modo semelhante, experimentos realizados com vaporização por Alexiou (1990) com a madeira de *Eucalitus pilularis* demonstraram o aumento da taxa de secagem entre 7 a 16% na madeira do cerne, além de reduções no gradiente de umidade e nas tensões de secagem da madeira. Segundo o pesquisador, a vaporização mais efetiva foi nos primeiros oito dias de secagem.

Haslett e Kininmoth (1986) mostraram que a vaporização acelera a secagem em madeira de *Nothofagus fusca*, através de modificações na organização dos extrativos após a vaporização que favorecem a taxa de secagem. Simpson (1991) observou que o tempo de secagem da madeira

de *Quercus rubra*, com espessura de 25 mm, diminui em 23% quando pré-vaporizada a 100 °C por um período de quatro horas.

A pré-vaporização da madeira de *Eucalyptus regnans* por um tempo de 30 minutos diminui a variação dimensional da madeira e permite melhorar os níveis de recuperação do colapso. Esta tendência é observada desde a medula até a casca. (Chafe, 1990). Utilizando a mesma espécie de madeira, MaCkay (1971) observou que a pré-vaporização da madeira verde permite aumentar a difusão de vapor através do meio, favorece a recuperação do colapso e permite aumentar o coeficiente de difusão em até 9% .

Ananias (1982) mostrou que a vaporização do *Eucalyptus globulus* permite aumentar a taxa de secagem e diminuir os defeitos, mas produz uma forte descoloração nesta espécie de madeira. O pesquisador observou também, que abaixo do conteúdo de umidade de 15%, a aplicação de temperaturas maiores que 70 °C não apresentou nenhum efeito negativo sobre a madeira. Campbell (1961) observou poucas rachaduras na madeira de *Eucalyptus obliqua* após a pré-vaporização, porém o colapso apresentou-se com maior intensidade.

4.5.3.2 - Vaporização Final

As tensões geradas durante o processo de secagem são originadas em função da diferença de contração entre partes adjacentes da peça de madeira. Quando a força interna tende a esticar o material, ou resistir à redução de tamanho, este fenômeno é definido como tensão de tração e quando tende a comprimir, ou resistir ao alongamento, é conhecido como tensão de compressão. A tensão é definida como uma força interna que se origina num material como consequência da aplicação de uma carga (Wright, 1961).

No início do processo de secagem da madeira, quando o teor de umidade é superior ao ponto de saturação das fibras. A transferência de umidade do interior da peça para a superfície é

bastante intenso e rápido. Porém, abaixo do ponto de saturação das fibras, quando o teor de umidade diminui, o transporte da umidade das regiões internas não é suficiente para repor a água que se evapora, originando um gradiente de umidade entre a superfície e o centro da peça. Este gradiente de umidade origina as tensões na madeira e por consequência, defeitos tais como fendas ou rachaduras (Villière, 1966).

Quando existem tensões internas na madeira, esta deve ser submetida a um tratamento de condicionamento, que consiste basicamente em se elevar a temperatura e a umidade relativa dentro da estufa de secagem. Jankowsky (1988) afirmam que este tratamento tem por finalidades aliviar as tensões de secagem e evitar deformações permanentes na madeira.

A utilização da vaporização para aliviar as tensões pode ser dividida em dois grupos:

a) Tratamento com vapor saturado a 100 °C por poucas horas

Wright (1961) não recomenda este tratamento para aliviar as tensões no final da secagem, uma vez que as camadas superficiais absorverão a umidade rapidamente e incharão, sendo este processo limitado em parte, pelo centro da peça de madeira, o qual não foi afetado pelo tratamento. O autor recomenda este método para aliviar as tensões nos primeiros estágios do processo de secagem, onde o teor de umidade superficial não pode ser inferior a 18-20% e o centro da peça de madeira não deve estar abaixo do ponto de saturação das fibras.

b) Tratamento com elevadas umidade relativa (85%) e temperatura (71 a 82 °C) por um período de tempo variando entre 8 a 48 horas.

Este tratamento de alívio de tensões depende das condições das tensões, espécie, espessura e uso final da madeira. De acordo com Rasmussen (1968), o processo deve ser iniciado quando o teor de umidade da amostra de madeira mais úmida da estufa de secagem for igual ao teor de umidade final desejado. Alguns critérios devem ser observados: a temperatura e de umidade relativa do ar. Quanto à temperatura, deverá ser a mais alta temperatura utilizada no programa de secagem (temperatura de bulbo seco), ou tão alta quanto possível, desde que permita o controle da umidade de equilíbrio. Para a umidade relativa, tem-se que esta deve corresponder ao teor da umidade de equilíbrio, que a madeira teria 3% (Coníferas) ou 4% (Folhosas) superiores ao teor de umidade desejado.

Pratt (1974) recomenda uma umidade relativa de 90% e um aumento simultâneo da temperatura de bulbo seco de 10 a 15 °C quando a temperatura for inferior a 80 °C.

4.6 - Variáveis do Processo de Secagem inerentes à Estufa

De acordo com Jankowsky (1988) e Kollmann (1968), a estufa de secagem de madeira deve permitir a circulação rápida do ar, temperaturas maiores que as ambientais e variação controlada da umidade relativa. Desta forma, as grandes variáveis do processo de secagem, e que devem ser controladas, são a circulação do ar, a temperatura e a umidade relativa. A atuação sobre estas variáveis permite controlar outras variáveis envolvidas no processo, como por exemplo, o gradiente de umidade da madeira.

4.6.1 - Circulação do Ar

A circulação do ar dentro da estufa de secagem de madeira tem por objetivos transferir calor do sistema de aquecimento para a estufa, distribuir o calor de modo uniforme em toda a estufa, misturar e condicionar o ar (umidade relativa e temperatura) antes da sua passagem pela carga de madeira e remover a água da superfície da madeira (Kollmann, 1968).

A circulação do ar pode ser obtida naturalmente ou através de ventiladores elétricos (circulação forçada). Na circulação natural, utiliza-se o princípio de que o ar quente sobe e o ar frio desce. Através de adequado posicionamento das entradas e saídas de ar, pode-se obter velocidades de circulação do ar de até 0,15 m/s. Na circulação forçada, as velocidades variam entre 0,35 a 2 m/s. Considera-se as velocidades próximas a 2 m/s como sendo as mais econômicas. Velocidades maiores podem ser aplicadas para madeiras com teores de umidade iniciais elevados (Rasmussen, 1968).

É importante salientar que a velocidade de circulação do ar é mais importante nos estágios iniciais da secagem e para elevados teores de umidade da madeira, do que quando a madeira aproxima-se da umidade de equilíbrio. Rasmussen (1968) verificou que abaixo do teor de umidade de 40%, não existe aumento ou redução de tempo de secagem com o uso de velocidade de circulação do ar superior a 4,2 m/s. Segundo o pesquisador, velocidades superiores a esta não são econômicas.

Abaixo do ponto de saturação das fibras, quando a difusão da água de impregnação começa, a rapidez da secagem tende a diminuir, reduzindo a influência da velocidade de circulação do ar. Para madeiras impermeáveis (folhosas), a remoção rápida da umidade superficial irá causar o aparecimento de rachaduras. (Jankowsky, 1988).

As experiências de Hildebrand (1970) demonstram que velocidades superiores a 3 m/s apresentam vantagens econômicas na secagem da madeira com elevado teor de umidade ou com a

utilização de altas temperaturas (processo de secagem a altas temperaturas). De forma geral, o aumento na velocidade de circulação do ar será menos vantajoso quanto maior for a espessura da madeira, menor a umidade inicial e menor a temperatura utilizada.

4.6.2 - Temperatura

A temperatura a ser atingida dentro da estufa de secagem depende do sistema de aquecimento. O aquecimento pode ser obtido por meio de vapor, óleo térmico, elétrico ou água quente. O sistema a vapor é o mais utilizado, onde uma caldeira ou um gerador fornece vapor que circula em um sistema de radiadores responsável pelas trocas térmicas (Rasmussen, 1968).

O aumento da temperatura do ar no interior da estufa proporciona um gradiente que permite fornecer energia à água contida na madeira, favorecendo os fenômenos de difusão e evaporação. A temperatura afeta a umidade relativa do ar, aumentando a pressão de saturação do vapor d'água e com isso, elevando a capacidade do ar em receber a água evaporada da madeira. O aumento na temperatura interna em uma estufa, sem a liberação de vapor d'água, tem como conseqüências:

- a) redução da umidade relativa do ar, acelerando a remoção da água superficial;
- b) o aumento do coeficiente de difusão da água de impregnação e do vapor d'água;
- c) a alteração do gradiente de umidade.

4.6.3 - Umidade Relativa

A umidade relativa pode ser controlada de quatro modos: pelo sistema de aquecimento, pelo fornecimento de vapor, pela admissão de ar mais seco e frio do ambiente externo e pela eliminação de ar úmido do interior da estufa. Os três últimos modos permitem regular

principalmente a temperatura de bulbo úmido, enquanto que o primeiro controla a temperatura de bulbo seco (Jankowsky, 1988; Rasmussen, 1968).

4.7 - Relação entre as Variáveis

De acordo com Jankowsky (1988), o objetivo principal na secagem é conduzir a madeira, com a menor quantidade possível de defeitos, a um teor de umidade que possibilite seu melhor desempenho em serviço. Sendo assim, os programas de secagem devem ser formulados para variar a umidade de equilíbrio da madeira, através de uma seqüência estudada das variáveis que controlam o processo de secagem até o valor desejado. O gráfico da figura 4.2 abaixo ilustra as variações possíveis da umidade de equilíbrio em função das temperaturas de bulbo seco e úmido.

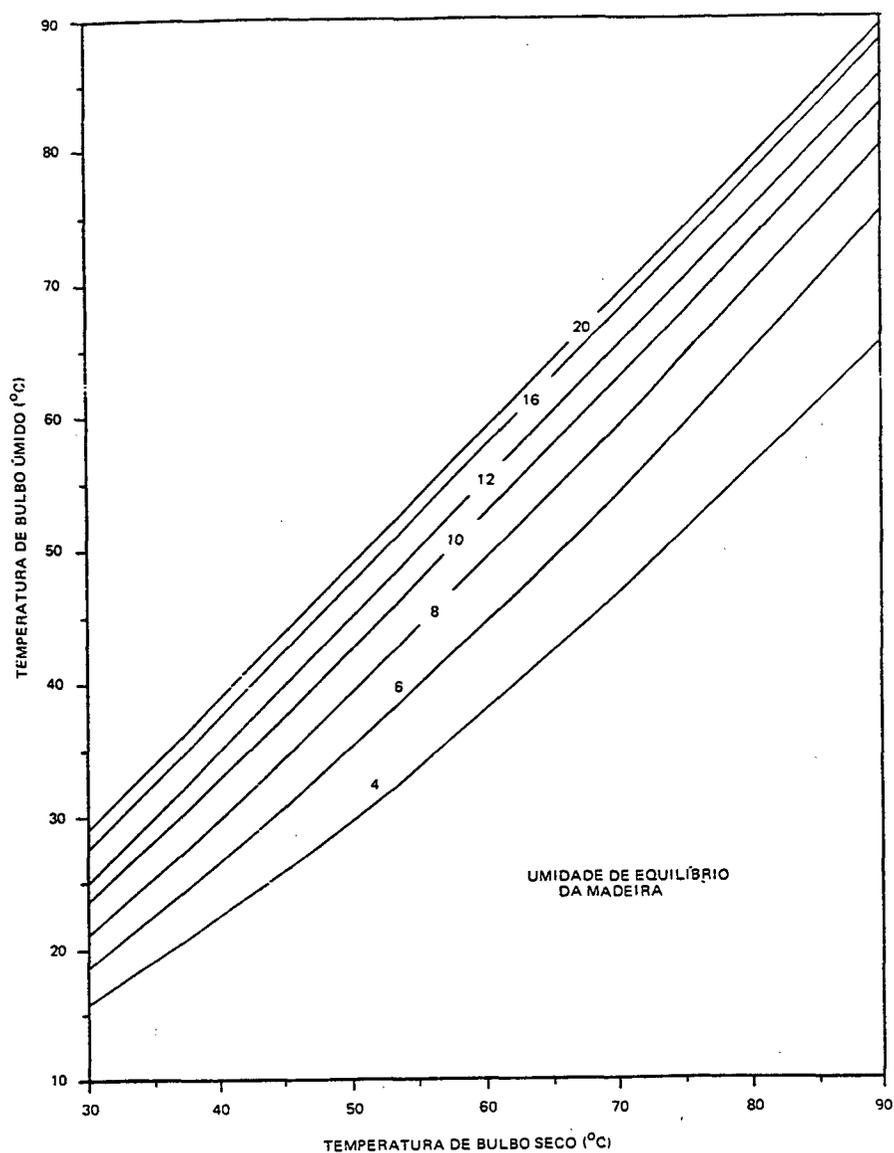


Figura 4.2 - Curvas da umidade de equilíbrio da madeira para diferentes temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido (Jankowsky, 1988)

4.8 - Defeitos de Secagem

Os defeitos de secagem têm como causa básica o desenvolvimento de tensões que ocorrem na madeira em função da redução do teor de umidade. Os defeitos mais comuns são discutidos a seguir.

4.8.1 - Empenamento

Empenamento é qualquer distorção dimensional da peça de madeira em relação aos planos originais de suas superfícies. Deste modo, pode-se ter empenamentos do tipo encanoamento, encurvamento e torcimento.

Encanoamento. As margens da peça permanecem aproximadamente paralelas, e ela adquire um aspecto encanoado ou de canaleta. Esse tipo de empenamento aparece em consequência da diferença de estabilidade entre as direções radial e tangencial, que provoca a maior movimentação de uma das faces da peça em relação à outra. O encanoamento também pode ser causado pela secagem mais rápida de uma face. Essa diferença de umidade ocorre quando a peça está apoiada sobre toda a extensão de uma das faces, fazendo com que a evaporação da água seja maior numa face que em outra. Observa-se, de modo geral, que as peças retiradas da região mais externa da tora tendem a apresentar mais nitidamente o encanoamento. Vide figura 4.3.

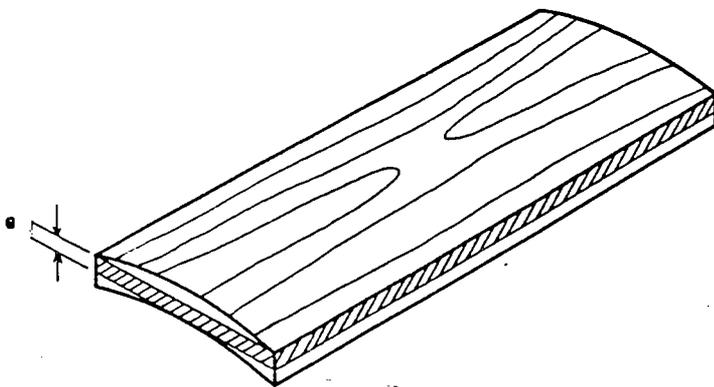


Figura 4.3 - Encanoamento da peça de madeira.

Encurvamento. O encurvamento ou empenamento longitudinal é caracterizado pelo afastamento de uma face em relação a um plano que une uma extremidade a outra da peça. Esse defeito ocorre como consequência de irregularidades da grã (sentido das fibras da madeira), ou quando a peça é retirada de forma que a grã faça um ângulo com a direção do seu comprimento. Outra causa possível são as tensões de crescimento da árvore, observadas principalmente no *Eucalyptus saligna*. Vide figura 4.4.

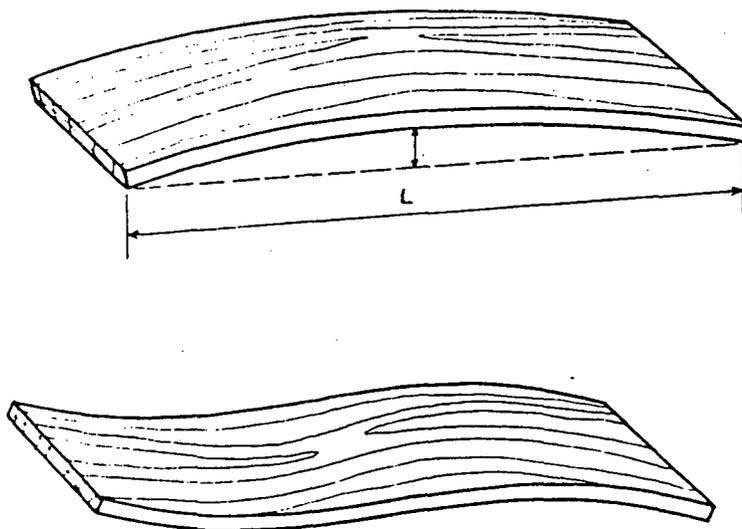


Figura 4.4 - Encurvamento simples e complexo da peça de madeira.

Arqueamento. Empenamento longitudinal das bordas; curvatura ao longo do comprimento da peça de madeira, num plano paralelo à face.

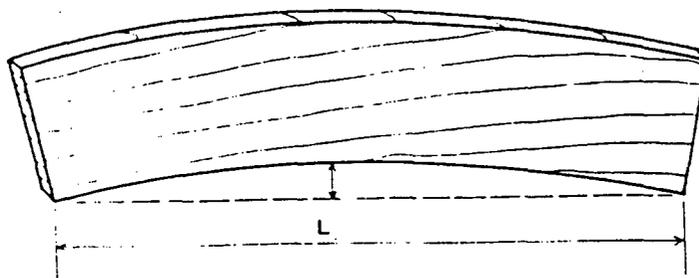


Figura 4.5 - Arqueamento da peça de madeira.

Torção. Este tipo de empenamento é caracterizado pelo fato da peça apresentar-se torcida. Esse defeito ocorre principalmente em madeiras provenientes de árvores que possuem grã espiralada. Vide figura 4.6.



Figura 4.6 - Torção da peça de madeira.

4.8.2 - Rachaduras

As rachaduras ou rachas aparecem como consequência da diferença de retração nas direções radial e tangencial da madeira e de diferenças de umidade entre regiões próximas de uma mesma peça durante a secagem. Essas diferenças provocam o surgimento de tensões que, quando tornam-se maiores que a resistência dos tecidos lenhosos, originam o rompimento dos mesmos.

Rachaduras superficiais. As rachaduras superficiais são aquelas que ocorrem em uma ou nas duas superfícies de uma peça, mas que podem atingir ou não a outra superfície. Quando a rachadura atinge a outra superfície, a rachadura superficial chama-se fenda ou racha. Quando a rachadura superficial restringe-se somente a alguns milímetros de profundidade, não atingindo a outra superfície, denomina-se esta rachadura superficial de fendilhado. As rachaduras podem aparecer no processo de secagem artificial quando as condições de secagem são muito severas, ou seja, baixas umidades relativas provocando a rápida secagem das camadas superficiais até valores

inferiores ao ponto de saturação das fibras, enquanto as camadas internas ainda estão com mais de 30% de umidade. Como as camadas internas impedem as superficiais de se contraírem, aparecem tensões, que quando superiores à tração perpendicular às fibras, provocam o rompimento dos tecidos lenhosos. Em geral, a ruptura ocorre nos tecidos que compõem os raios constituídos por células parenquimáticas.

Rachaduras de topo. As rachaduras de topo surgem normalmente nos raios formados por células parenquimáticas de resistência mecânica reduzida. Essas rachaduras ocorrem como consequência da diferença entre as retrações tangencial e radial (Jankowsky, 1988).

Rachaduras em favos. As rachaduras em favos, também conhecidas como favo de mel, são um defeito típico da secagem artificial, caracterizado por rachaduras no interior da peça de madeira, onde a peça pode apresentar-se sem alterações perceptíveis no lado externo. Esse defeito aparece normalmente associado ao colapso e ao encruamento, como consequência das tensões de tração no interior das peças terem excedido a resistência da madeira no sentido perpendicular às fibras. O aparecimento deste defeito pode ser prevenido evitando-se utilizar elevadas temperaturas até a remoção da água capilar do interior da madeira, ou seja, até que ela atinja o ponto de saturação das fibras. Vide figura 4.7.

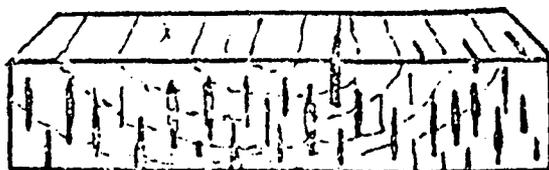


Figura 4.7 - Rachaduras em favos na madeira.

4.8.3 - Encruamento

O encruamento pode ser definido como sendo a condição de tensão e deformação permanente, na qual as fibras externas estão sob compressão e as internas sob tração, quando a madeira está uniformemente seca (McMillen, 1963).

A causa básica do encruamento é a secagem muito rápida ou não uniforme. A secagem rápida de uma madeira com umidade inicial superior ao ponto de saturação das fibras faz com que as suas camadas externas atinjam baixos valores de umidade rapidamente. Desta forma, as camadas externas ficam sob tração, enquanto que a parte central, ainda com umidade acima do ponto de saturação das fibras, não se retrai e fica sob compressão. Mantendo o processo de secagem nas mesmas condições, a parte central atinge uma umidade inferior ao ponto de saturação das fibras e começa a se retrair. Porém, essa retração central não é acompanhada pelas camadas externas, ocasionando sua compressão, ficando a parte interna sob tração.

O processo de encruamento pode originar rachaduras internas tipo favo de mel, existindo também uma relação com as rachaduras superficiais. Este defeito só é encontrado como consequência do processo de secagem artificial (Jankowsky, 1988).

4.8.4 - Colapso

O colapso é um tipo de defeito da secagem da madeira caracterizado por ondulações nas superfícies da peça (tábua), que pode apresentar-se bastante distorcida. O colapso é basicamente ocasionado por forças geradas durante a movimentação da água capilar ou água livre, que deformam as células da madeira. A equação que define a tensão capilar permite prever que o colapso aparece quando a tensão desenvolvida durante a saída da água capilar supera a resistência da madeira à compressão. Sendo assim, pode-se enumerar alguns fatores que influenciam o desenvolvimento do colapso:

- pequeno diâmetro dos capilares;
- elevadas temperaturas no início do processo de secagem;
- baixa densidade da madeira;
- elevada tensão superficial do líquido que é removido da madeira.

De acordo com Jankowsky (1988), a presença de bolhas de ar na água capilar diminui a possibilidade da ocorrência do colapso. Vide figura 5.5.

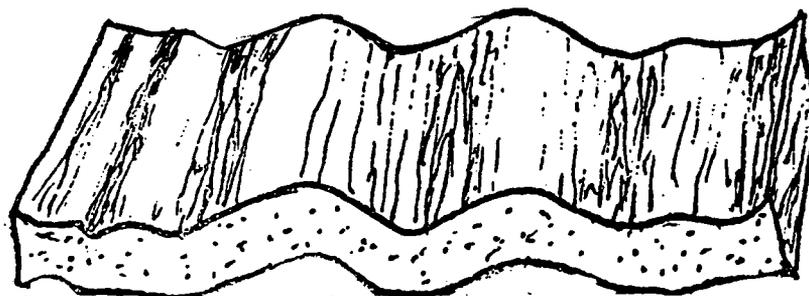


Figura 4.8 - Colapso em uma peça de madeira.

CAPÍTULO 5 - OBSERVAÇÕES EXPERIMENTAIS

As observações experimentais foram feitas nas instalações fabris da empresa Móveis Alpes Ltda. (Grupo Rudnick) através do acompanhamento da secagem de diversas cargas de madeira com o objetivo principal de se estudar e conhecer o processo de secagem com banho de vapor. Para se atingir este objetivo principal, foram necessárias algumas medições em campo, tais como: temperatura de bulbo seco e úmido dentro da estufa, evolução do teor de umidade das amostras de controle, registro do processo manual de secagem (posição dos registros de vapor para o radiador e para a vaporização e dampers de renovação de ar). Os dados obtidos nestas observações foram importantes para registrar o processo de secagem operado manualmente e com base na sensibilidade do operador, para análises posteriores. Estas informações não possuem toda a precisão de leitura que se poderia obter em laboratório, em função das limitações existentes nos equipamentos disponíveis para a indústria. Os ensaios práticos auxiliaram a observar e confirmar no campo alguns fundamentos teóricos, uma vez que estas informações foram muito úteis. Há a necessidade da realização de mais experimentos em laboratório para se possuir informações totalmente conclusivas. Apesar disto, os dados experimentais mostraram resultados satisfatórios na utilização do processo de secagem com banho de vapor.

5.1 - Estufas Utilizadas

Os estudos, observações e coletas de dados foram feitos em duas estufas industriais aquecidas a vapor, com capacidade interna de 67 m³, permitindo o gradeio de uma pilha de madeira de 26 m³ para a madeira de 27 mm de espessura (1 polegada nominal) e 30 m³ de madeira de 40 mm (1.5 polegadas nominais), colocada sobre vagonetes com rodas. A figura 5.1 (foto) apresenta uma vista frontal da estufa com as portas abertas, mostrando a madeira gradeada sobre os vagonetes. A figura 5.2 mostra uma vista interna da estufa carregada com madeira, onde pode-

se ver o teto falso, a porta de inspeção e os termômetros de bulbo seco e úmido. Os espaçadores ou tabicos de 22 mm de espessura são utilizados entre as tábuas para separá-las, permitindo a circulação do ar. Existem quatro ventiladores axiais com rotação reversível localizados acima da pilha de madeira, que são acionados por correias e promovem a circulação do ar através da pilha. O vapor saturado é utilizado na estufa de duas formas: uma através do sistema de aquecimento e outra através do sistema de umidificação. O sistema de umidificação é constituído de um tubo furado a intervalos regulares, cujo objetivo é fornecer vapor ao interior da estufa quando há a necessidade de se aumentar a umidade relativa do ar, alimentado diretamente na corrente de ar dos ventiladores.

O sistema de aquecimento é composto de trocadores de calor tipo tubo aletado, que são alimentados com vapor saturado e aquecem o ar circulante. Uma blindagem na parte superior da pilha de madeira e abaixo dos trocadores de calor (teto falso), evita a exposição das tábuas superiores da pilha à radiação emitida pelos trocadores. A reversão do sentido de rotação dos ventiladores, realizada a cada hora, permite alternar o sentido da circulação do ar para homogeneizar a secagem. O ar externo pode ser adicionado e ar úmido removido da corrente de ar circulante, através de dampers montados sobre o teto da estufa, com o objetivo de promover a diluição da umidade perdida pela madeira. Existem dois dampers para cada ventilador, perfazendo um total de oito dampers que possuem comunicação com o ambiente externo. Existem duas portas de inspeção na estufa, uma de cada lado, para permitir o acesso às amostras de controle, cuja evolução de massa é acompanhada. Junto a estas portas de inspeção existe um conjunto de termômetros de bulbo seco e úmido tipo Pt 100, montado de tal forma que ficam expostos à corrente do ar circulante.

A estufa possui acoplado um computador que permite a aquisição dos dados durante o processo de secagem. Uma seção esquemática da estufa pode ser vista na figura 5.3 e a seção longitudinal na figura 5.4.

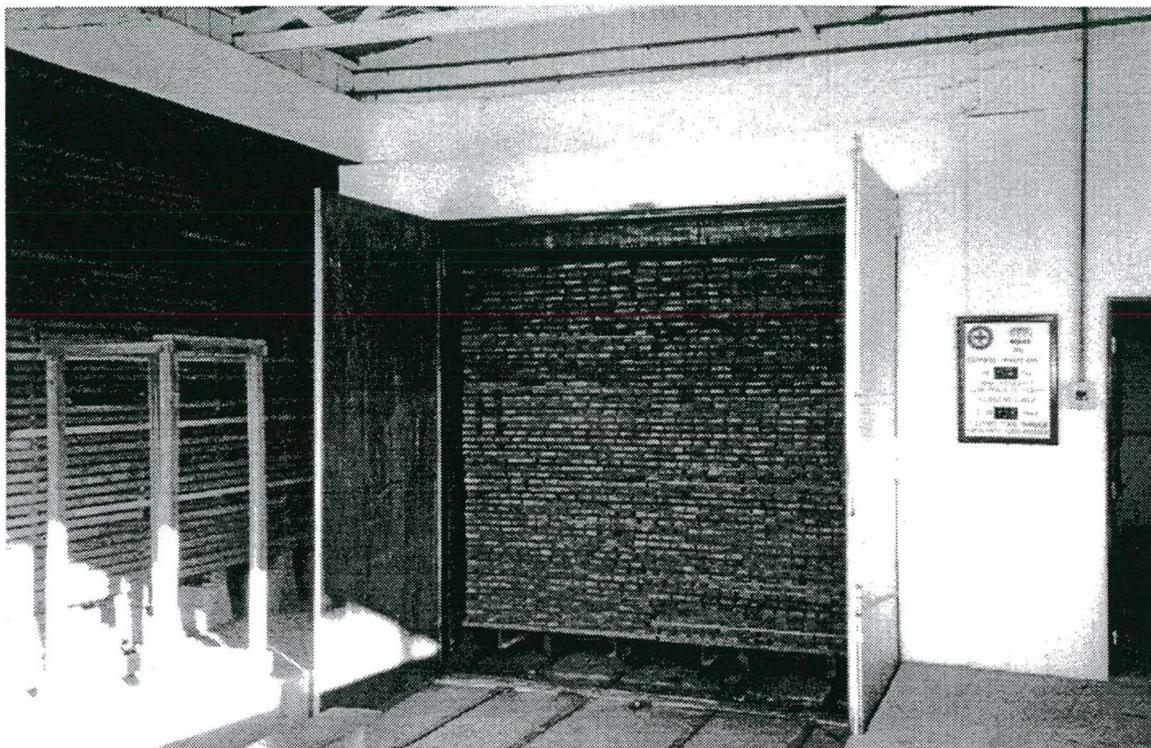


Figura 5.1 - Foto ilustrando a vista frontal da estufa de secagem de madeira.

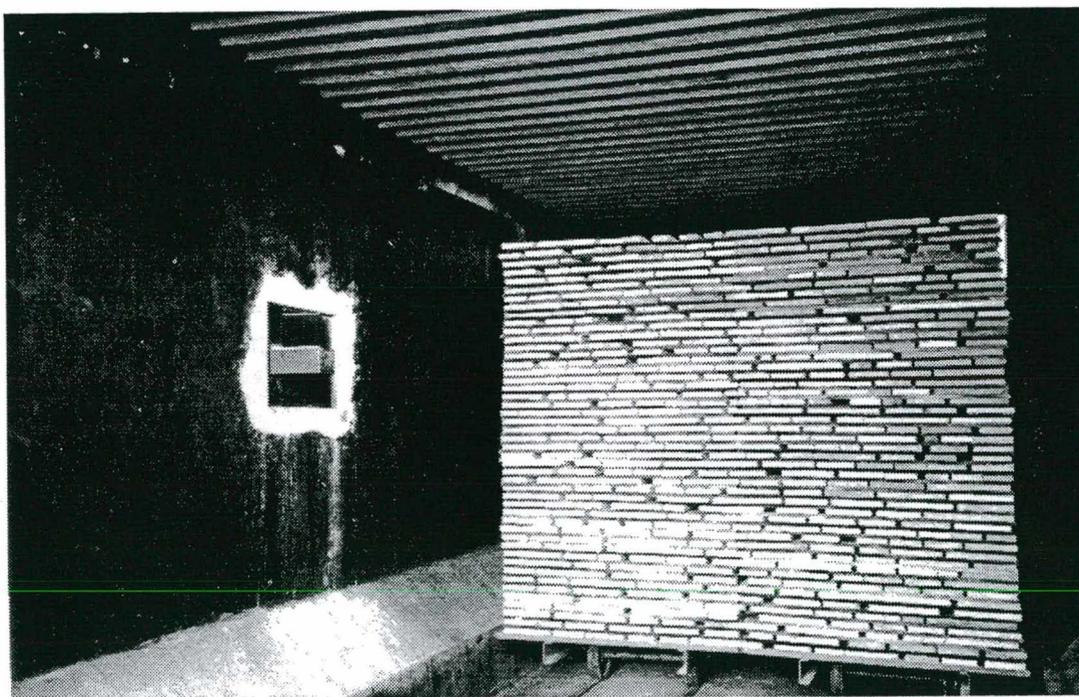


Figura 5.2 - Foto ilustrando a vista interna da estufa de secagem de madeira.

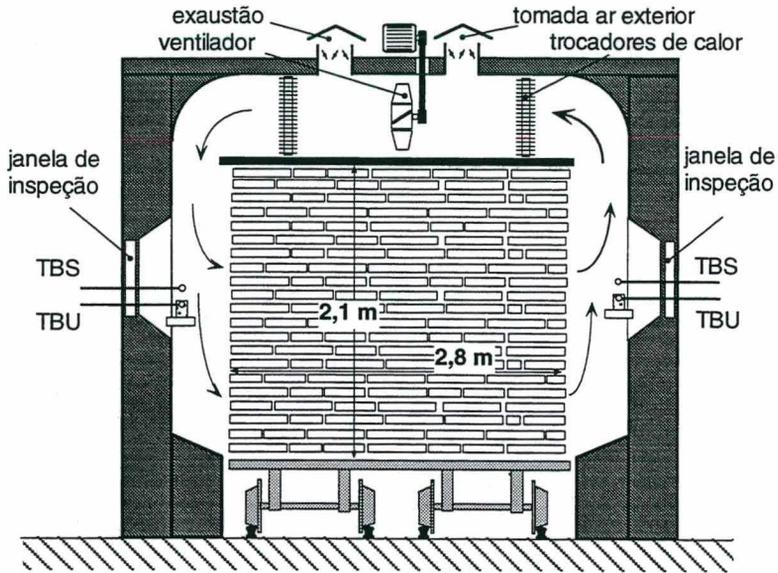


Figura 5.3 - Seção transversal esquemática das estufas de secagem de madeira.

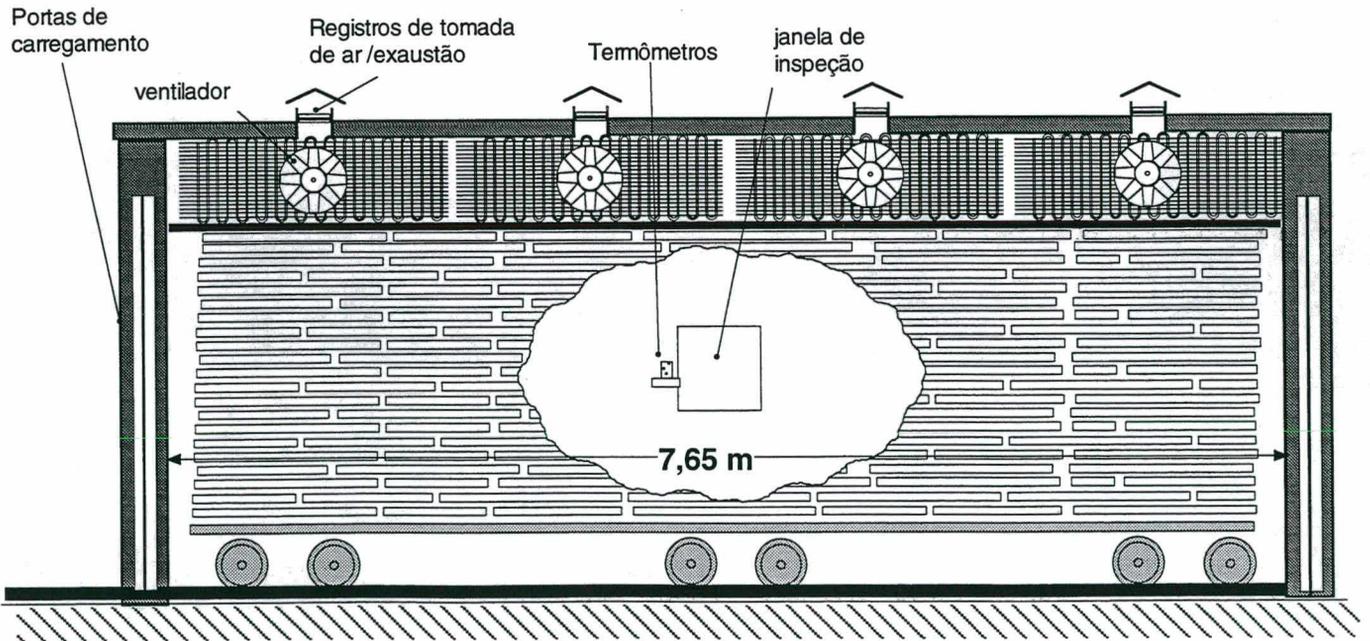


Figura 5.4 - Seção longitudinal esquemática das estufas de secagem de madeira.

5.2 - Madeiras Utilizadas

Foram utilizadas no estudo sobre secagem duas espécies de madeira: o curupixá (*Rauwolfia Paraensis Ducke*) e o eucalipto (*Eucalyptus Grandis*). O curupixá é originário do Pará e tem sido utilizado em larga escala pela indústria moveleira e em função disto, alguns madeireiros já tem sinalizado a diminuição das reservas nativas. Outro fator que tem contribuído para este aumento do consumo é a exportação de madeiras nativas, uma vez que o volume exportado de curupixá cresceu de 527 m³ em 1988 para 22311 m³ em 1992, ocupando o 5º lugar em madeira exportada naquele ano.

O eucalipto está sendo apresentado como sendo uma alternativa para substituir as madeiras duras (*hardwoods*) para a indústria moveleira, em função da existência de grandes áreas reflorestadas e do baixo preço inicial quando comparado ao preço das madeiras atualmente utilizadas. O eucalipto estudado tem procedência do Paraná (empresa Klabin) e do Rio Grande do Sul (empresa Flosul). Vale ressaltar que existem grandes reflorestamentos em Minas Gerais (empresa Vale do Rio Doce e outras), além de reflorestamentos na Argentina. Existem aproximadamente, segundo a EPAGRI/SC, 60 espécies de eucalipto sendo desenvolvidas e estudadas no Brasil e, destas, o *Eucalyptus Grandis* tem se mostrado com melhores resultados e é o que possui a maior área reflorestada. Poucas informações estão disponíveis sobre a secagem destas duas espécies de madeira, o que justifica as observações deste trabalho. As espessuras das madeiras (tábuas) utilizadas variam entre 27 mm, 40 mm e 52 mm.

5.3 - Processos de Secagem

O processo de secagem da madeira realizada a temperaturas inferiores a 100°C é conhecida como secagem convencional. No presente trabalho são observadas e estudadas as

características de um processo de secagem convencional com banho de vapor operado manualmente (CRT - Aumento Constante da Temperatura) e comparadas com o processo convencional que pode ser controlado automaticamente, através de programas de secagem previamente estabelecidos. A seguir são fornecidos maiores detalhes sobre cada um dos processos anteriormente mencionados.

5.3.1 - Processo de Secagem com Banho de Vapor

A secagem a vapor da madeira na estufa se desenvolve basicamente em três etapas principais: um pré-aquecimento com banho de vapor para condicionamento da madeira, a redução gradual da umidade relativa do ar com o aumento de temperatura e recondiçõamentos intermediário e final com banhos de vapor. Durante todo o processo de secagem injeta-se vapor através do sistema de umidificação da estufa em quantidades que variam em função da etapa em que o processo se encontra. Este processo de secagem a vapor (convencional modificado) também é conhecido por “Aumento Constante de Temperatura” ou *CRT - Constant Rising Temperature* (Simpson, 1984). As temperaturas do ar da corrente circulante são mantidas abaixo de 100°C durante todo o processo.

Nesse processo, controlado e operado manualmente, o operador possui controle sobre a taxa de renovação do ar (abertura e fechamento dos dampers), sistema de aquecimento (válvula de vapor para os trocadores de calor), sistema de umidificação (válvula de vapor para o chuveiro/banhos de vapor) e sistema de ventilação (ventiladores e reversão).

Um dos principais problemas na secagem da madeira em estufa é o aparecimento de tensões internas, que provocam deformações nas peças após cortadas. O alívio das tensões é conseguido com banhos de vapor durante o aquecimento, durante o processo e após a secagem. O aquecimento inicial sob injeção de vapor através do sistema de umidificação favorece o

restabelecimento da continuidade da fase líquida, reconectando os poros interiores à superfície, aumentando o transporte interno de líquido. Outro ponto a ser observado no aquecimento a homogeneização da umidade das várias peças de madeira. Inicialmente a umidade da madeira pode aumentar, mas o ganho em massa é rapidamente perdido tão logo a umidade relativa do ar da corrente circulante comece a ser reduzido.

Este processo permite, após a fase de aquecimento, uma renovação contínua de uma parcela do ar da corrente circulante durante o processo de secagem. Também é possível realizar-se banhos de condicionamento durante o processo e ao seu final com o vapor. O controle da umidade das amostras na carga de madeira é feita através da pesagem periódica utilizando-se uma balança de precisão.

Desta forma, pode-se dizer que este processo possui as etapas: pré-aquecimento com banho de vapor, redução gradual da umidade relativa (secagem gradual), condicionamentos intermediários e final, além da fase de resfriamento.

5.3.2 - Processo de Secagem Convencional

O processo de secagem convencional é bastante conhecido e pode ser dividido em fases bem distintas: aquecimento, secagem gradual, uniformização, condicionamento e resfriamento. Este processo é conduzido mediante a elaboração de um programa de secagem, que relaciona valores de temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, umidade relativa do ar, umidade de equilíbrio da madeira e gradiente de secagem para determinadas faixas de umidade da madeira. Normalmente este processo é controlado automaticamente através de sistemas automatizados. Estes sistemas atuam sobre a taxa de renovação do ar (dampers), sistema de aquecimento (trocadores de calor), sistema de umidificação (banhos de vapor) e medição da umidade da madeira (Jankowsky, 1988).

Este sistema não permite a renovação contínua de uma parcela do ar circulante, nem a injeção contínua a taxas variáveis durante o processo de secagem. Os banhos de condicionamentos intermediários não são previstos neste processo, uma vez que isto é feito nas fases finais de uniformização e condicionamento.

A injeção de vapor no interior da estufa através do sistema de umidificação é realizada quando o sistema detecta uma redução na umidade relativa do ar ou na mudança de uma fase de secagem para outra. Esta detecção é feita através de sensores de medição de temperatura tipo Pt100 para a determinação das temperaturas de bulbo seco e úmido.

A comunicação entre a carga de madeira e o sistema eletrônico de controle é feita através de pinos metálicos cravados nas tábuas, distribuídos de forma aleatória na carga. O método de medição da umidade da madeira é indireto, uma vez que o que se determina é a resistência elétrica entre os dois pinos para cada ponto de medição. Este método de resistência elétrica possui uma característica de ser confiável para teores de umidade da madeira abaixo do ponto de saturação das fibras, ou seja, abaixo de 30 %. Acima deste valor as medições de umidade apresentam erros significativos (Jankowsky, 1996).

Este processo pode ser conduzido com base em três opções: umidade relativa, temperatura de bulbo seco e bulbo úmido e potencial de secagem.

5.4 - Medição das Temperaturas

São utilizados dois conjuntos de sondas de temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido, tipo Pt100, montados um de cada lado da estufa, permitindo a aquisição das condições de secagem a cada dez minutos. Embora as sondas Pt100 tenham resolução bem mais elevada, os dados adquiridos são armazenados como valores inteiros em °C.

5.5 - Medição de Umidade da Madeira

Para a medição da umidade da madeira na carga da estufa, torna-se necessário comentar sobre o procedimento de amostragem e seus cálculos, a forma de medição da umidade e as diferenças entre o sistema de pesagem (balança) e o sistema elétrico.

5.5.1 - Amostragem

A amostragem é o modo mais prático e seguro de se estimar o teor de umidade de uma carga de madeira, composta de amostras de controle selecionadas e preparadas de acordo com critérios bem estabelecidos. De acordo com Rasmussen (1968) deve-se utilizar no mínimo quatro amostras de controle para cargas de até 47 m³ de madeira, o que foi utilizado nos experimentos.

As amostras de controle foram selecionadas de quatro tábuas escolhidas enquanto o carregamento era realizado, escolhendo-se as peças mais escuras (cerne) e as mais úmidas, para representar a carga de madeira da melhor forma possível. Procedendo desta forma, vai-se conduzir o processo de acordo com as condições mais críticas, ou seja, de modo a permitir a secagem sem problemas das peças de secagem mais difícil como o cerne, por ser menos permeável e das mais úmidas.

A seleção e preparação das amostras segue alguns passos estabelecidos por Wallis (1970). Nesta etapa, são retiradas duas seções de madeira com largura de 5 cm juntamente com cada amostra de controle, sendo uma em cada extremidade da amostra de controle para cada uma das quatro tábuas selecionadas, totalizando oito seções de madeira. O comprimento da amostra deve ser estabelecido de acordo com o tamanho da estufa elétrica de aquecimento. Para este caso, foi estabelecido o comprimento aproximado de 600 mm. Deve-se ressaltar que a amostra e as duas seções devem ser retiradas em uma posição da tábua que seja distante no mínimo 300 mm de uma das extremidades da tábua.

A preparação das seções de madeira servem para permitir a determinação do teor de umidade inicial das amostras de controle e possui as etapas de:

- eliminação das lascas com lima;
- determinação da massa úmida, P_{umido} , através de pesagem em balança, kg;
- secagem em estufa a $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ até atingir massa constante;
- determinação da massa seca, P_{seco} , através de pesagem em balança, kg;
- cálculo do teor de umidade (%) inicial das amostras de controle:

O conteúdo mássico de umidade é calculado por:

$$M = \frac{(P_{umido} - P_{seco})}{P_{seco}} \times 100 \quad (5.1)$$

Este procedimento é feito para todas as seções de madeira de todas as amostras de controle. Desta forma, para quatro amostras de controle existem oito seções de madeira, o qual pode ser melhor observado na figura 5.5. O teor de umidade da amostra de controle é determinada através da média entre os teores de umidade das respectivas duas seções de madeira de cada amostra de controle.

A preparação das amostras de controle permite o acompanhamento da evolução do processo de secagem a qualquer momento e possui as etapas de:

- eliminação de lascas com lima;
- impermeabilização dos topos ou extremidades com selador;
- determinação do massa úmida inicial, P_i , através de pesagem, kg;
- determinação do teor médio de umidade inicial, M_i , correspondente ao teor médio obtido através das seções de madeira;

- cálculo da massa seca da amostra, P_s :

$$P_{seco} = \frac{100 \times P_i}{100 + M_i} \quad (5.2)$$

- determinação da umidade da madeira a qualquer momento, M_c :

$$M_c = \frac{(P_{uc} - P_{seco})}{P_{seco}} \times 100 \quad (5.3)$$

onde: P_{uc} = Massa nos estado úmido corrente.

As amostras devem ser colocadas, de acordo com Jankowsky (1988), em locais representativos e de fácil acesso para sua retirada durante a secagem. A posição das amostras de controle na carga de madeira foram determinadas para ficar próximas da localização de uma das portas de inspeção da estufa.

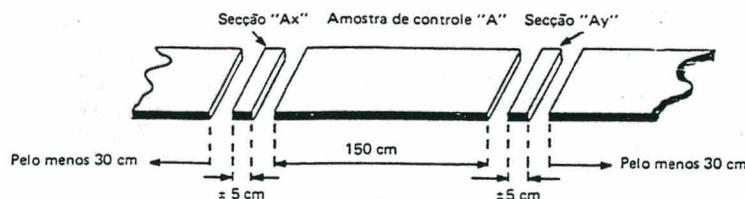


Figura 5.5 - Preparação das amostras de controle e seções de madeira. (Jankowsky, 1988)

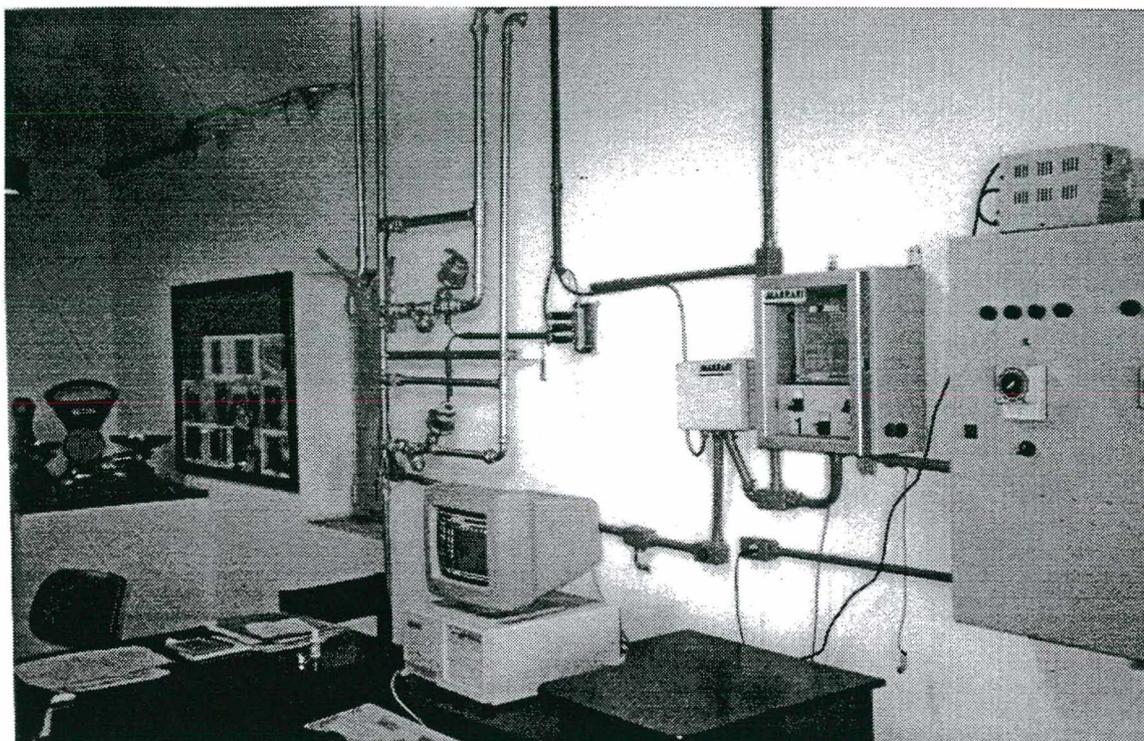


Foto 5.6 - Foto que ilustra a sala de controle das estufas de secagem de madeira.

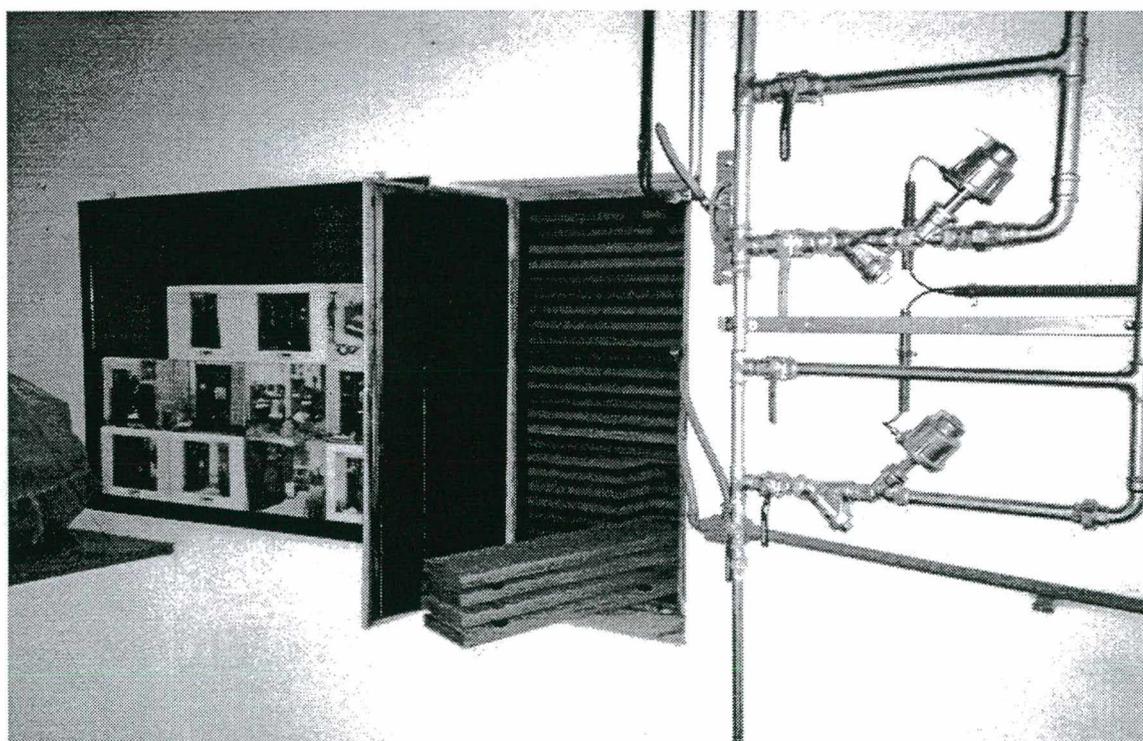


Figura 5.7 - Foto que ilustra a porta de inspeção e 4 amostras de controle.

A figura 5.6 ilustra a sala de controle das estufas, com o microcomputador, equipamento de aquisição e balança para pesagem das amostras de controle. A figura 5.7 ilustra a porta de inspeção com 4 amostras de controle, além dos registros de controle de aquecimento e vaporização de uma das estufas.

5.5.2 - Pesagem

O controle do teor de umidade das amostras da carga de madeira foi realizado através das pesagens periódicas das respectivas amostras em balança analógica com resolução de leitura de 1 g. Foi determinada a aquisição das massas duas vezes por dia, no mínimo, e no final do banho de aquecimento com vapor no início do processo de secagem. O cálculo dos teores de umidade das amostras de controle é feito com a expressão (5.3).

5.5.3 - Método da Pesagem x Método Elétrico

O método de determinação do teor de umidade da madeira através da pesagem em balança e secagem em estufa, comparado ao método de determinação elétrico (variação da resistência elétrica com a umidade da madeira) apresenta as seguintes características:

- é mais confiável acima e abaixo do ponto de saturação das fibras (30%);
- é mais demorado que o método de resistência;
- permite visualizar o comportamento das amostras de controle durante o processo

de secagem.

O método de resistência elétrica, de acordo com Jankowsky (1996) e Siau (1971), apresenta-se um pouco mais confiável abaixo do ponto de saturação das fibras (30%). Acima deste valor, os erros de medição para a determinação do teor de umidade ficam maiores, podendo trazer problemas para a condução do processo de secagem. Apesar das estufas possuírem um sistema de medição de umidade da madeira pelo método da variação da resistência elétrica,

optou-se por utilizar o primeiro método mencionado. A figura abaixo auxilia na justificativa, uma vez que relaciona os valores corretos de umidade da madeira com as leituras provenientes dos pinos do método de resistência elétrica.

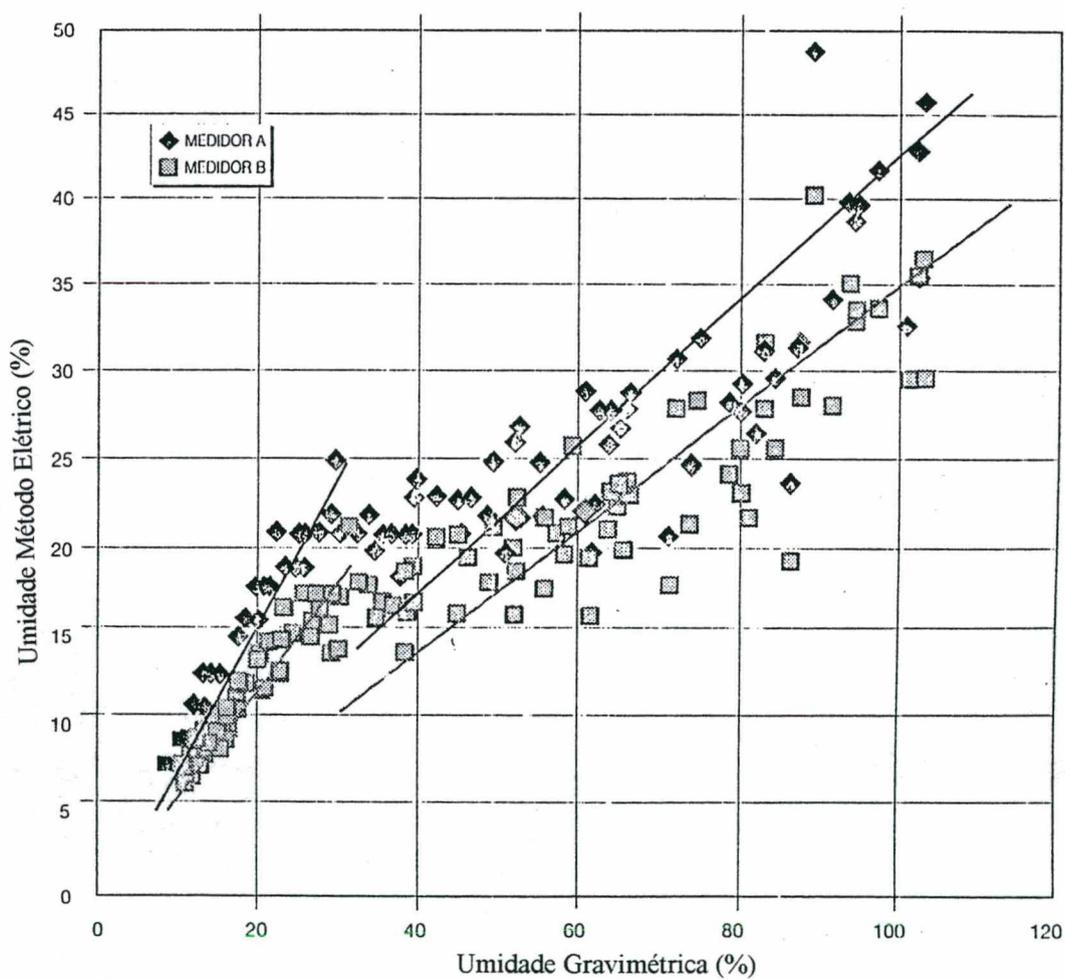


Figura 5.8 - Comparação dos métodos de medição de umidade elétrica e gravimétrica (Jankowsky, 1996).

5.6 - Sentido dos Anéis de Crescimento nas Amostras

O sentido do corte das tábuas no desdobro inicial em relação aos anéis de crescimento determinam sentidos diferentes para a migração da umidade em relação aos eixos principais do tronco nas peças de madeira. Foram registradas as posições dos anéis de crescimento apresentados nos topos das amostras para se verificar sua influência sobre o desempenho das amostras de controle durante o processo de secagem da madeira.

5.7 - Registro dos Dados

As estufas possuem um microcomputador acoplado para permitir a aquisição dos dados de temperatura das sondas Pt100 a cada 10 minutos, com valores inteiros em °C. O microcomputador registra também o sentido de rotação dos ventiladores e os valores de umidade relativa do ar. Os valores de umidade relativa do ar são calculados através de uma rotina interna. O programa de aquisição foi desenvolvido pela empresa MARRARI e não foi possível modificá-lo para se melhorar a resolução das leituras de temperatura. Estas estufas possuem um sistema que pode controlá-las automaticamente, instalado pela empresa MARRARI, não foi utilizado durante os experimentos (vide figura 5.6).

Os dados de evolução da massa das amostras de controle, posições dos registros de alimentação de vapor aos trocadores de calor, de alimentação de vapor saturado através do sistema de umidificação, dos dampers para tomada e saída de ar são anotadas em planilha pelo operador, assim como o sentido dos anéis de crescimento, as dimensões iniciais e finais das amostras de controle e o peso final seco das amostras de controle. O peso final seco das amostras de controle é determinado através de secagem em estufa a $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Os dados anotados são controlados através do registro da data e hora, assim como a fase de secagem em que o processo se encontra.

5.8 - Qualificação da Secagem

Existem diversos critérios e métodos que podem ser utilizados para a qualificação da secagem de uma carga de madeira. Dentre as opções disponíveis, optou-se por considerar a princípio:

- variação do teor de umidade na carga da madeira após a secagem;
- tempo de secagem (da condição verde até a condição seca);
- levantamento de defeitos de secagem (principais);
- determinação das tensões de secagem através do teste do garfo (Jankowsky,

1988).

Estes critérios são recomendados pelo projeto de norma EDG (*Assessment of Drying Quality of Timber*, 1994) da Comissão das Comunidades Europeias, que reúne diversos especialistas em secagem de madeira. De acordo com esta norma, pode-se determinar seus parâmetros para qualificar um processo individual de secagem ou, caso se deseje, comparar dois ou mais processos de secagem.

A norma europeia define critérios principais e adicionais para a qualificação da secagem da madeira. Os critérios principais são: estimativa da média do conteúdo de umidade a um terço da espessura, diferença de conteúdo de umidade entre o meio e a superfície da peça e as tensões. Os critérios adicionais são: trincas de secagem (superficiais, favos e de topo), colapso, alterações de cor (manchas superficiais, manchas internas, marcas dos tabicos e mudanças de cor) e deformações causadas pelo empilhamento incorreto da carga de madeira. Esta norma não foi utilizada para a avaliação das secagens, onde considerou-se a variação de umidade entre as peças da carga de madeira e o tempo de secagem.

O levantamento de dados para a qualificação da secagem é feito na carga de madeira após sua secagem. Foi estabelecido um total de 27 pontos de avaliação, formando uma matriz

tridimensional com medições em 3 camadas (fiadas) de tábuas igualmente distribuídas na altura da pilha de madeira. Para cada camada selecionada faz-se 3 medições na largura e 3 medições no comprimento da pilha (carga), perfazendo 9 medições em cada uma das três camadas selecionadas. Nestas 27 posições de inspeção são determinados o teor de umidade da madeira e os defeitos de secagem. Os defeitos de secagem são analisados em toda a tábua onde é feita a medição de umidade.

O tempo de secagem é determinado em dias ou em horas entre o dia de início da secagem e o dia do término do processo, quando se atinge a umidade desejada para a carga da madeira.

As tensões de secagem podem ser determinadas através do teste do garfo (Jankowsky, 1988), mediante a confecção de corpos de prova a partir de peças de madeira da carga que está no processo de secagem. Estas tensões podem ser verificadas antes do término do processo de secagem e ao seu final, ou seja, após o resfriamento. A verificação durante o processo permite a correção ou redução das eventuais tensões de secagem. (Jankowsky, 1988).

Os corpos de prova para as verificações de teor de umidade, distribuição de umidade e de tensão são retiradas de uma ou mais peças da carga de madeira de acordo com a figura 5.9.

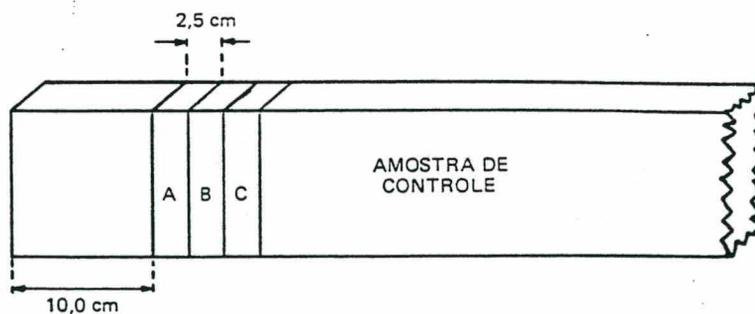


Figura 5.9 - Retirada dos corpos de prova de uma tábua (Galvão e Jankowsky, 1988).

O preparo do corpo de prova para o teste de tensões é feito mediante corte da parte interna com serra-fita, como mostra a figura 5.10.

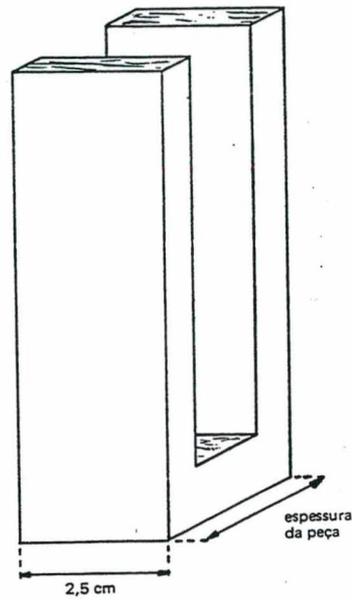


Figura 5.10 - Preparo do corpo de prova para o teste de tensões (Galvão e Jankowsky, 1988).

Após a preparação dos corpos de prova, sua interpretação é feita em duas partes: uma imediatamente após o preparo dos corpos de prova e outra após vinte e quatro horas, fornecendo resultados preliminares e finais respectivamente. Os resultados preliminares e definitivos podem ser identificados através das figuras 5.11 e 5.12.

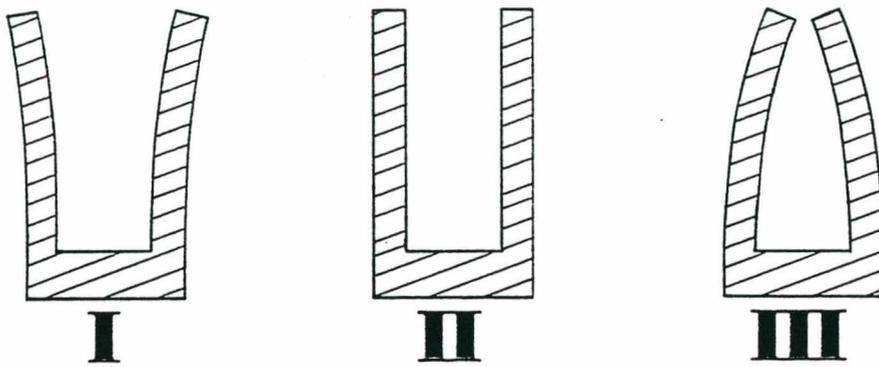


Figura 5.11 - Resultados preliminares do teste de tensão. II - A madeira está provavelmente livre de tensões; I e III - A madeira está com tensões (encruamento). (Jankowsky, 1988)

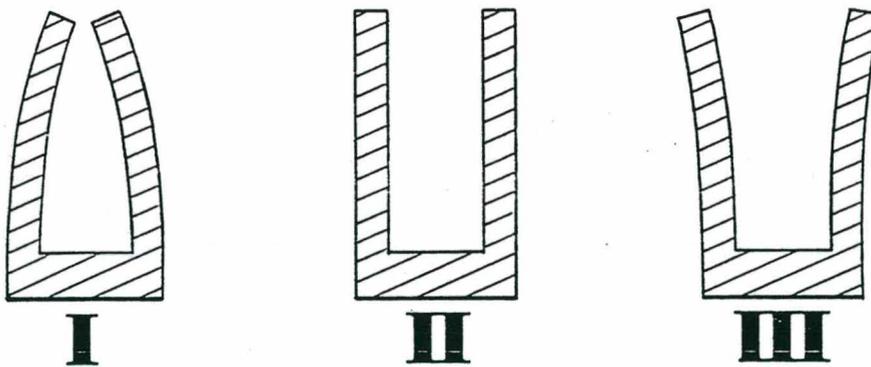


Figura 5.12 - Resultados finais do teste de tensões. I - A madeira está com encruamento; II - Madeira livre de tensões; III - A madeira está com encruamento. (Jankowsky, 1988).

5.9 - Secagem Natural

Para efeito de comparação, uma pilha ou grade de madeira de eucalipto (*Eucalyptus grandis*) com espessura de 40 mm (1,5 polegadas) foi acompanhada durante o processo de secagem natural, por exposição ao ambiente. Foram colocadas 3 amostras de controle em pontos estratégicos na grade de madeira com o objetivo de se conhecer o comportamento do eucalipto durante sua secagem natural. A evolução das massas destas amostras de controle foram anotadas em planilhas semanalmente durante os primeiros quatro meses de secagem. A evolução das massas das amostras foi determinada em balança analógica. Também foram registrados data, hora e temperatura de bulbo seco no momento das pesagens entre junho de 95 e maio de 96. Também foram anotadas as evoluções de massa de madeira de eucalipto de 27 mm (1 polegada nominal). As figura 5.13 e 5.14 mostram pilhas de madeira gradeadas para a secagem natural.

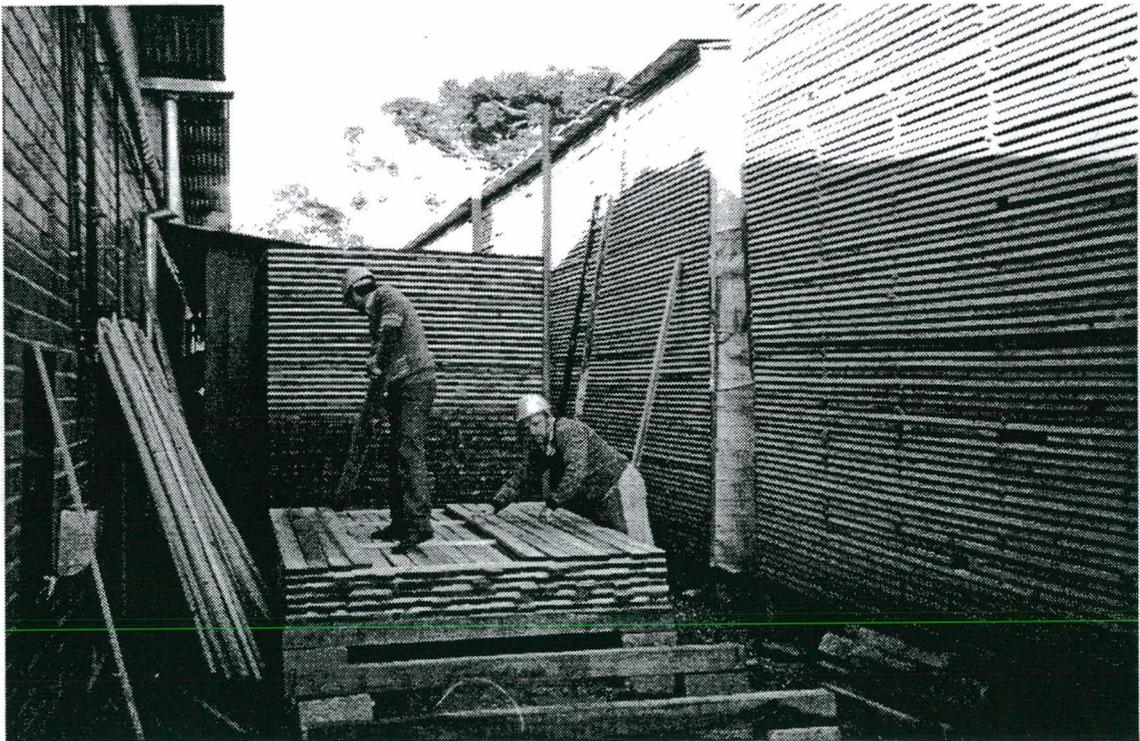


Figura 5.13 - Madeira sendo gradeada em pilha para a secagem natural.

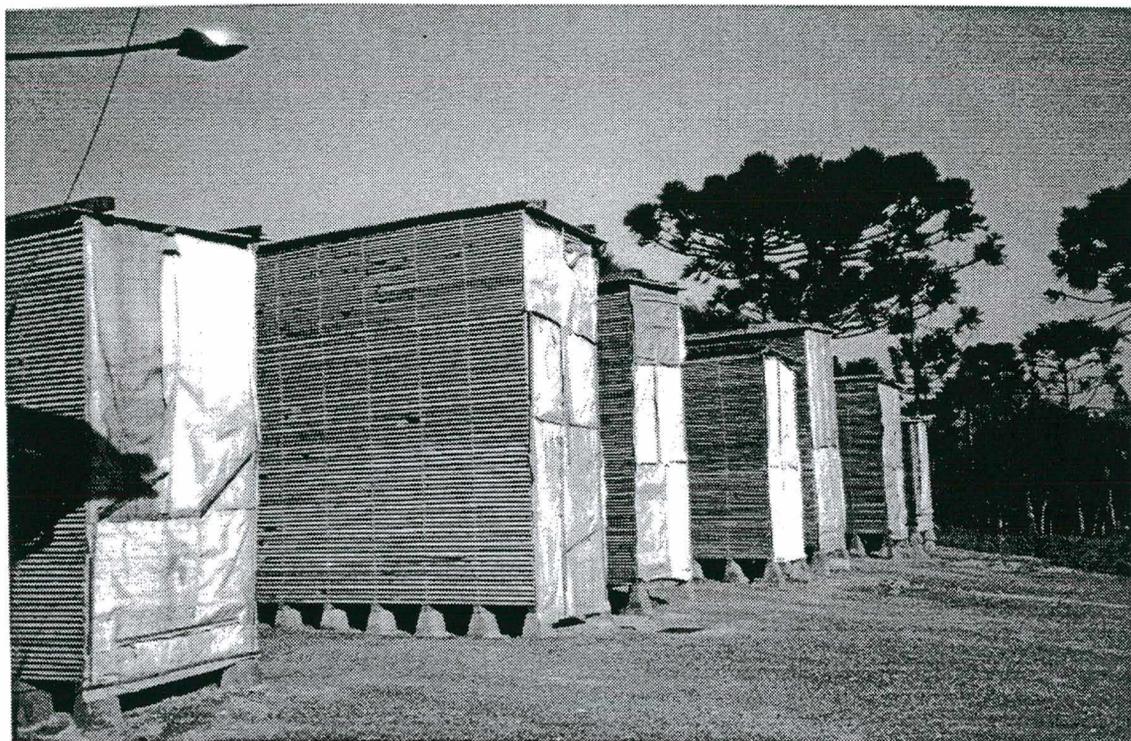


Figura 5.14 - Foto ilustrando o pátio de secagem natural.

CAPÍTULO 6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 - Processo Convencional

Nesta etapa do trabalho foi analisada a secagem da madeira de curupixá (*Rauwolfia Paraensis Ducke*) de 40mm (1.5 polegadas nominais) utilizando o processo convencional automatizado, o qual se baseia em programas de secagem pré-definidos.

6.1.1 - Programa de Secagem

O programa de secagem utilizado para a madeira de curupixá de 40 mm no processo convencional, incluindo as temperaturas de bulbo seco e úmido para cada fase do processo de secagem podem ser observadas a seguir.

Tabela 6.1 - Programa de secagem para o Curupixá 40mm.

Umidade/Fase	Temperatura Bulbo Seco (°C)	Temperatura Bulbo Úmido (°C)
Aquecimento	50	49
Secagem - umidade > 60%	50	48
Secagem - 60% a 46%	50	46
Secagem - 45% a 36%	50	44
Secagem - 35% a 29%	50	42
Secagem - 28% a 21%	55	44
Secagem - 20% a 16%	55	42
Secagem - 15% a 11%	55	40
Secagem - 10% a 8%	60	40
Uniformização	60	43
Condicionamento	60	57

6.1.2 - Tempo de Secagem

Os tempos de secagem para as cargas de curupixá de 27 mm e 40 mm foram avaliados considerando o desempenho das secagens das cargas de madeira verde utilizando os programas

de secagem mencionados anteriormente. O tempo de secagem para a madeira de curupixá de 27mm variou de 15 a 17 dias. Para a espessura de 40mm, o tempo de secagem variou de 21 a 31 dias, utilizando o equipamento MARRARI para controle do processo de secagem.

6.1.3 - Qualificação da Secagem

Os dados levantados para a qualificação da secagem da madeira do processo convencional são relativos à variação dos teores de umidade dentro da carga de madeira à saída da estufa. A variação de umidade pode ser observada no gráfico da figura abaixo, onde estão registrados valores das medições de umidade em uma carga de madeira controlada pelo processo convencional.

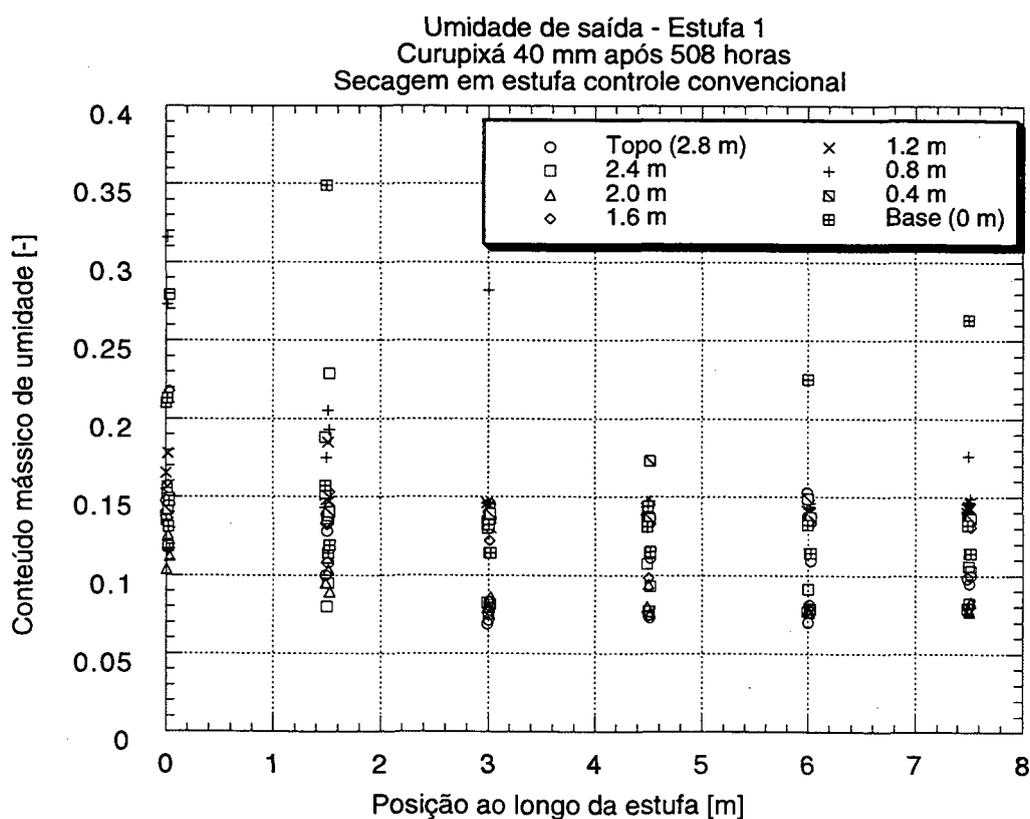


Figura 6.1 - Umidade de saída de madeira de curupixá 40mm. Secagem convencional.

A observação de variação dos teores de umidade na carga de madeira seca em estufa justifica-se pelo fato de que peças com grandes variações de umidade (maior que +/-2% em relação ao objetivo) trazem sérios problemas de colagem de peças de madeira que venham a formar painéis, independentemente do tipo de cola a ser utilizada.

6.2 - Processo de Secagem com Banho de Vapor (CRT)

O acompanhamento do processo de secagem com banho de vapor, definido também como CRT, foi realizado observando-se o desempenho das madeiras de curupixá e eucalipto (*Eucalyptus Grandis*) nas espessuras de 27, 40 e 52 mm. Este acompanhamento foi realizado com o objetivo de se caracterizar o processo de secagem a vapor, uma vez que este é realizado manualmente, baseando-se totalmente na experiência e sensibilidade do operador das estufas. Nestes ensaios foram observados aspectos tais como: programa de secagem (seqüência de operações), evolução dos teores de umidades das amostras de controle, tempo de secagem da carga, posições dos registros dos dampers, registros de vapor do sistema de aquecimento (trocadores de calor) e do sistema de umidificação (chuveiro), variações dimensionais, sentido dos anéis de crescimento e qualificação da secagem (variação dos teores de umidade na carga e defeitos).

6.2.1 - Primeira Secagem do Curupixá em Estufa

Neste primeiro ensaio pode ser observado um processo completo de secagem da madeira de curupixá de 27 mm de espessura (1 polegada nominal). Este pode ser visto na figura 6.2, juntamente com as evoluções do conteúdo de umidade das amostras de controle e das temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido. As dimensões típicas das amostras de controle no início do processo de secagem são 640 mm x 220 mm x 27 mm. Estas dimensões podem variar em função da carga de madeira recebida e se reduzirem durante o processo de secagem, em

função da contração das fibras. As amostras de controle apresentam uma grande variação no conteúdo de umidade inicial, entre 0.45 e 0.85, no final do processo de secagem todas se encontram com conteúdo de umidade entre 0.05 e 0.10. É interessante ressaltar que no início do processo, para este conteúdo de umidade das amostras de controle, a madeira possui as águas de capilaridade e higroscópica. O conteúdo da umidade de equilíbrio para a madeira de curupixá para a cidade de São Bento do Sul (SC), onde a instalação industrial se situa, é aproximadamente de 0.12.

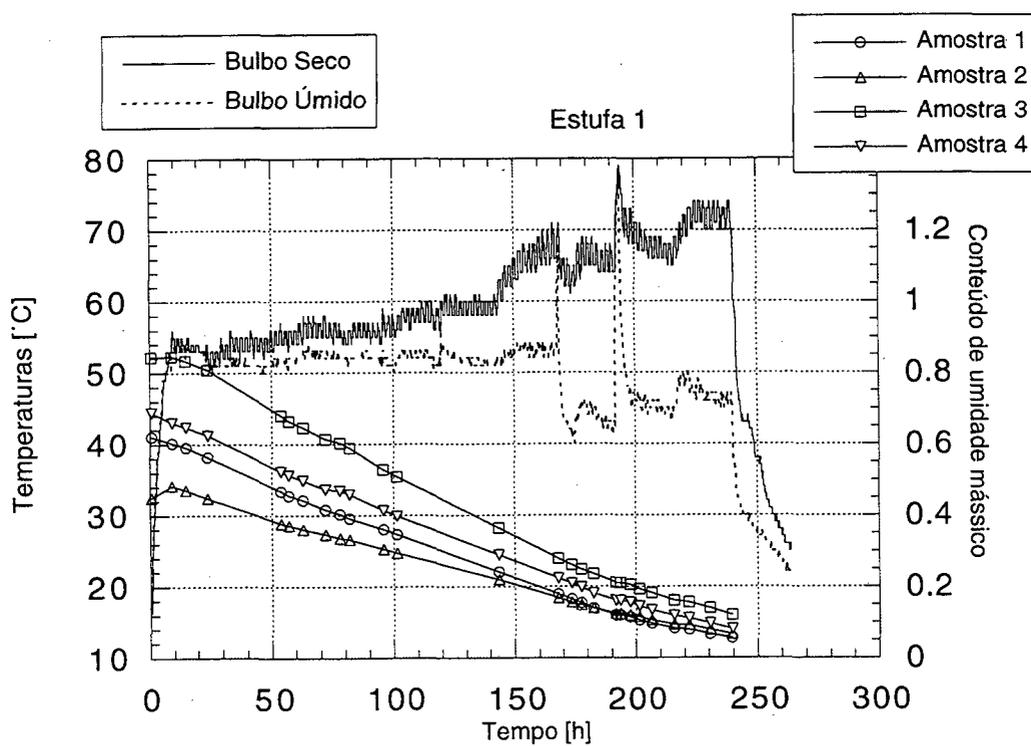


Figura 6.2 - Primeira secagem em estufa de curupixá (27 mm). Secagem com banho de vapor.

Na primeira etapa do processo, o aquecimento é obtido com a injeção de vapor saturado dentro da estufa através do sistema de umidificação (chuveiro) sem a utilização do sistema de

aquecimento e sem a renovação de ar (dampers fechados). A temperatura do ar circulante dentro da estufa, totalmente saturado, atinge os 55°C após 8,5 horas.

A segunda etapa do processo é realizada com a abertura dos registros de exaustão e tomada de ar exterior (dampers) e do sistema de aquecimento (fornecimento de vapor para os trocadores de calor). Esta etapa tem duração aproximada de 230 horas, com interrupções após 160 e 185 horas para banhos de vapor de condicionamento. Esses condicionamentos foram de curta duração (24 minutos e 45 minutos, respectivamente) e praticamente não alteram o conteúdo de umidade global das amostras. Durante a etapa, a umidade relativa do ar é gradualmente reduzida pelo aumento da temperatura. Durante o primeiro banho de condicionamento, observa-se que as temperaturas de bulbo seco e úmido sofrem um acréscimo, assim como a umidade relativa do ar, chegando próximo à saturação. Após este primeiro banho de condicionamento, a umidade relativa sofre uma redução mais intensa pelo aumento da diluição com o ar exterior e redução na vazão de vapor injetado na corrente de ar circulante.

Em função do aumento gradual da temperatura, a taxa de redução de umidade das amostras de controle é aproximadamente constante durante toda a secagem, não sofrendo o decaimento exponencial esperado num processo controlada pelos fenômenos de transporte internos.

A alternância do sentido de circulação do ar dentro da estufa expõe os sensores de temperatura ora ao ar de alimentação da pilha (entrada do ar na carga de madeira), ora ao ar de retorno (saída da carga de madeira). As variações de temperatura e umidade relativa da corrente de ar ao atravessar a pilha de madeira podem ser avaliadas para diferentes momentos do mesmo processo de secagem através da figura 6.3 (entre 60 e 80 horas de secagem) e da figura 6.4 (entre 170 e 190 horas de secagem). Na etapa inicial a temperatura de bulbo seco do ar de insuflamento (entrada na carga de madeira) atinge 57°C no insuflamento e 55°C no retorno (saída da pilha de

madeira), enquanto a umidade relativa do ar varia entre 0.78 e 0.90, respectivamente. Numa etapa subsequente, a temperatura do ar varia de 66°C a 68°C no insuflamento e entre 61°C e 64°C no retorno. As umidades relativas correspondentes são de 0.28 e 0.38, respectivamente. A temperatura de bulbo úmido sofre menores variações quando o ar atravessa a pilha de madeira. Durante a etapa de aquecimento, a umidade relativa do ar no insuflamento é maior do que no retorno, indicando que a madeira está sendo umidecida, ou seja, está recebendo água quando da passagem do ar através da pilha de madeira. Durante a etapa de secagem a umidade relativa do ar no insuflamento é menor do que no retorno, indicando que o ar que circula através da pilha de madeira está retirando umidade, contribuindo efetivamente para a secagem da madeira. O comportamento da umidade relativa do ar (UR) durante a etapa de secagem pode ser melhor observado nas figuras 6.3 e 6.4, onde os patamares superiores da curva de umidade relativa representam o fluxo do ar de retorno da pilha, enquanto os patamares inferiores representam a condição de umidade relativa do ar no insuflamento na pilha. A curva da umidade relativa, assim como temperaturas de bulbo seco e úmido apresentam-se na forma de degraus em função da reversão do sentido de rotação dos ventiladores da estufa, realizada a cada hora. O potencial de secagem (PS) ficou entre 2.9 e 3.2 para o conteúdo mássico de umidade acima de 0.30, enquanto que abaixo do conteúdo mássico de umidade de 0.30, o potencial de secagem ficou entre 2.0 e 2.9.

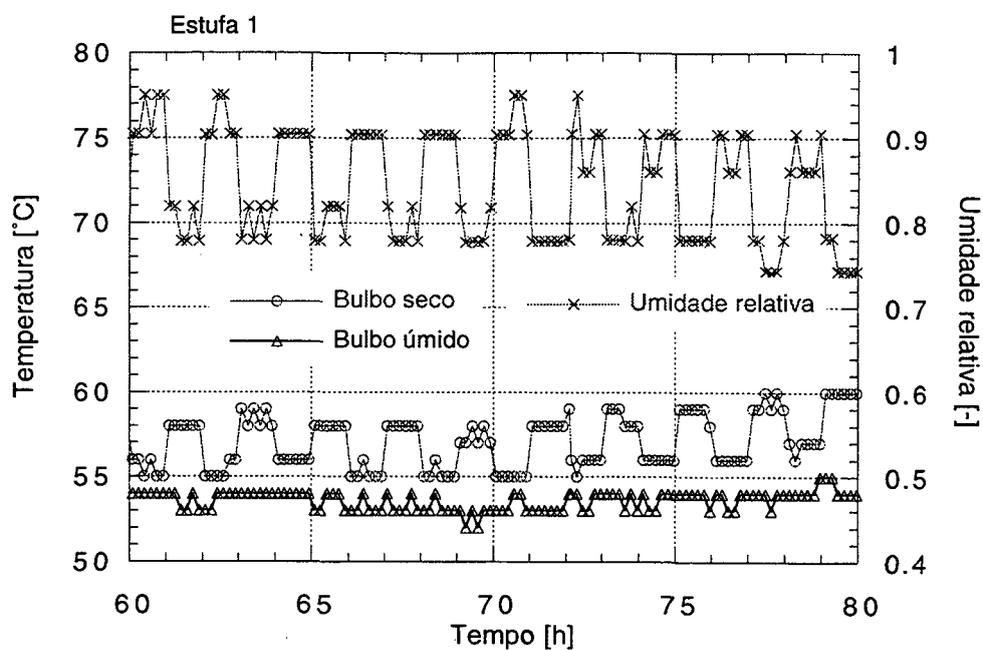


Figura 6.3 - Temperaturas de bulbo seco, úmido e umidade relativa no insuflamento e no retorno durante a secagem durante a secagem com banho de vapor.

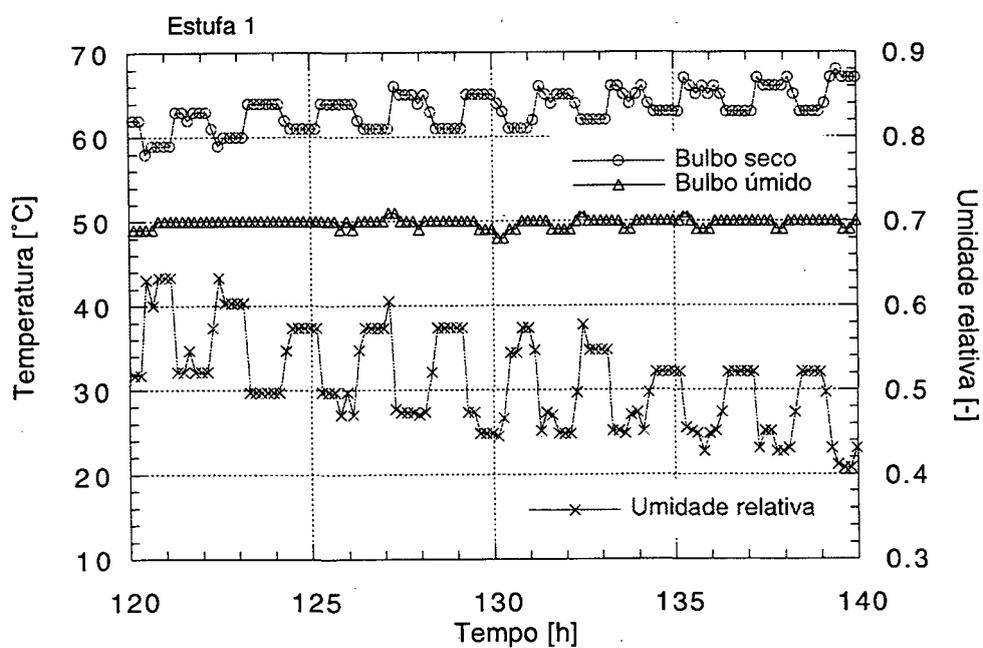


Figura 6.4 - Temperaturas de bulbo seco, úmido e umidade relativa no insuflamento e no retorno durante a secagem durante a secagem com banho de vapor.

6.2.2 - Segunda Secagem do Curupixá em Estufa

Este segundo ensaio de secagem foi realizado com a madeira de curupixá na espessura de 27 mm (1 polegada nominal). A figura 6.5 mostra as temperaturas de bulbo seco e úmido e as evoluções do conteúdo de umidade das amostras de controle. O tempo de secagem foi de 170 horas e as umidades iniciais das amostras se situavam entre 0.6 e 0.8. A fase de aquecimento inicial, nesse caso, homogeneizou em parte as diferenças de conteúdo de umidade inicial das amostras de controle e o processo de secagem se desenvolveu de forma aproximadamente semelhante para as quatro amostras de controle. O conteúdo de umidade final das amostras se situa entre 0.05 e 0.07, o que pode ser considerado um bom resultado para a secagem da madeira, para fins práticos.

Um único banho de condicionamento foi executado ao final do processo para alívio das tensões. A temperatura de bulbo seco foi gradualmente aumentada de 55°C para 75°C. Pode-se observar que a temperatura de bulbo úmido também sofreu um aumento até atingir praticamente a saturação dentro da estufa durante o banho de condicionamento. No condicionamento final a temperatura de bulbo seco chegou por alguns instantes a 80°C. A fase de resfriamento, executado com a estufa fechada, sem aquecimento e sem injeção de vapor, com os registros de tomada de ar exterior e exaustão (dampers) totalmente abertos, ocupa aproximadamente 15 horas. No início da fase de resfriamento, os ventiladores ficam ligados por um período aproximado de 30 minutos para retirar o excesso de vapor e de calor de dentro da estufa. O restante deste processo é conduzido com os ventiladores desligados, até que a temperatura da carga de madeira, ou seja, a temperatura interna da estufa seja no máximo 20°C superior à temperatura do ambiente externo à estufa. Este procedimento justifica-se para evitar problemas com trincas na madeira devido a um choque térmico entre madeira e ambiente externo.

Essa secagem pode servir como exemplo de processo de secagem a vapor bem sucedido.

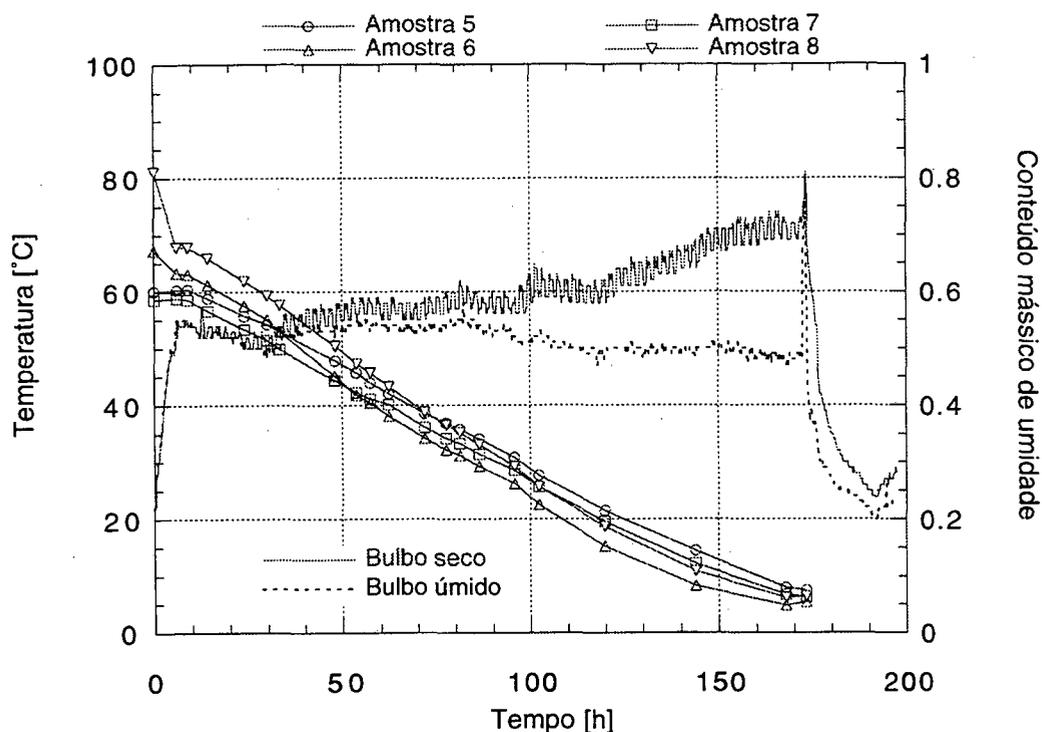


Figura 6.5 - Segunda secagem observada de curupixá (27 mm). Secagem com banho de vapor.

6.2.3 - Terceira Secagem do Curupixá em Estufa

Mesmo que a secagem da madeira com pré-aquecimento a vapor saturado favoreça a redistribuição de umidade próximo à superfície das tábuas da pilha, nem sempre a evolução da secagem ao longo do processo ocorre de forma equivalente para todas as amostras de controle. Diversos outros fatores podem causar heterogeneidades na secagem, como é o que se observa neste ensaio de secagem.

A evolução da secagem de uma carga da madeira de curupixá de 27 mm de espessura (1 polegada nominal) pode ser observada na figura 6.6, onde tem-se registrado as temperaturas de

bulbo seco e úmido, assim como os conteúdos de umidade para as quatro amostras de controle da carga.

Pode-se verificar que as amostras 10 e 11, mesmo possuindo conteúdos de umidade iniciais muito próximas (aproximadamente 0.73), seguem curvas de secagem bastante diferentes, mesmo estando sob as mesmas condições de temperatura, umidade relativa do ar, ventilação, vapor e aquecimento. A amostra 11 seca muito mais rapidamente, atingindo o conteúdo de umidade de equilíbrio, próximo dos 0.05, cerca de 75 horas antes que a amostra 10, tendo esta última ainda um conteúdo de umidade final de 0.1.

As amostras 9 e 12, embora sofram uma grande redução de umidade durante a fase de aquecimento, secam a uma taxa menor que a amostra 11 e terminam o processo de secagem com um conteúdo de umidade de 0.07. Pergunta-se porque amostras de uma mesma carga, da mesma espécie de madeira e em condições idênticas de processo secam de forma tão diferenciada. Relativizadas as diferenças de árvore para árvore, observou-se que em função da operação inicial de desdobro, feita ainda na floresta, o sentido do corte da tábua (peça de madeira) em relação aos anéis de crescimento determinam sentidos diferentes de migração da umidade em relação aos eixos principais do tronco da árvore, como mostra a figura 6.7. Deste modo, o transporte de umidade na amostra 10 se desenvolve praticamente no sentido tangencial, ou seja, com menor permeabilidade, enquanto que na amostra 11 a direção predominante da umidade é a radial. Em outras secagens o mesmo efeito pode ser observado. Em geral, este não é um fato que cause graves conseqüências, desde que se aguarde até que todas as amostras estejam na umidade desejada. Um cuidado especial deverá ser tomado durante a seleção das amostras de controle, de forma a abranger representativamente todo o volume da carga de madeira a ser seca no processo.

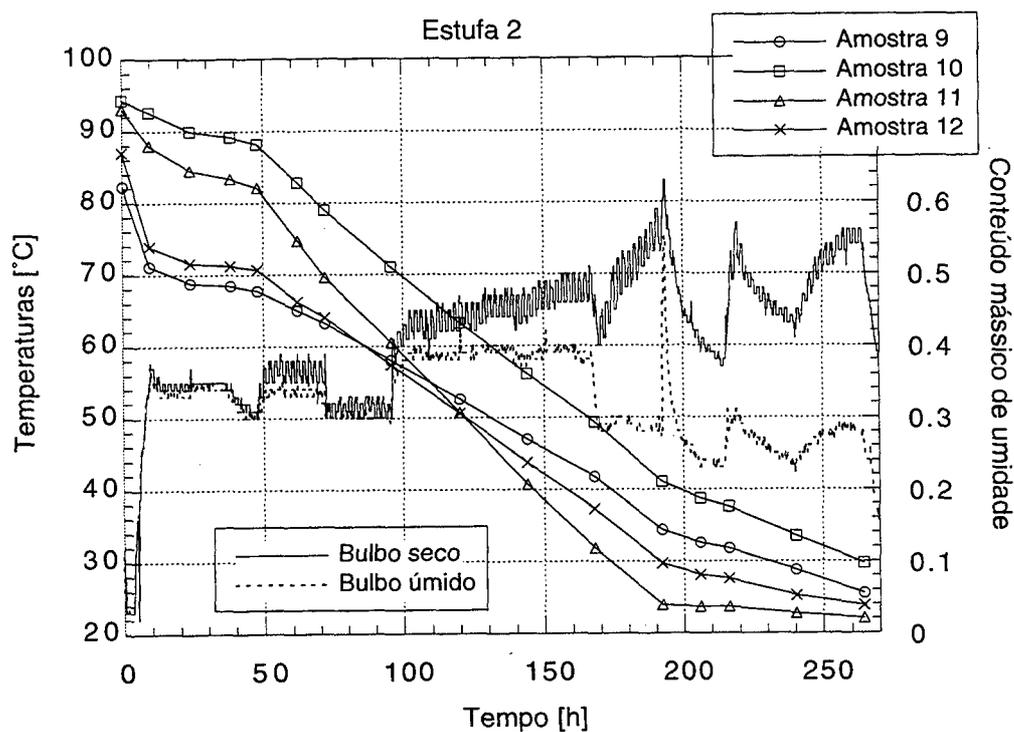


Figura 6.6 - Terceira secagem observada de curupixá 27 mm. Secagem com banho de vapor.

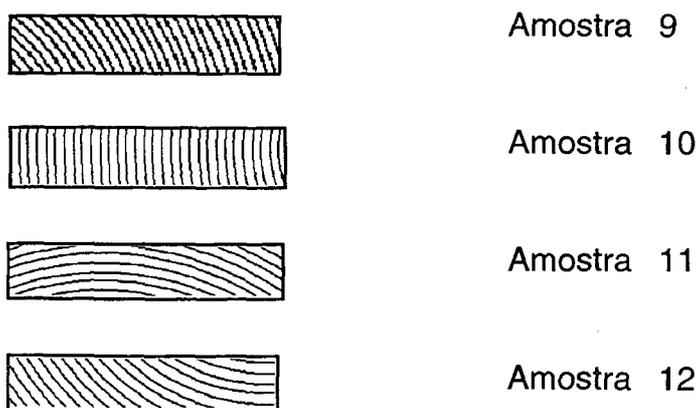


Figura 6.7 - Sentido do corte da prancha em relação aos anéis de crescimento, para as amostras da terceira secagem com banho de vapor.

6.2.4 - Quarta Secagem do Curupixá em Estufa

O processo de secagem ilustrado na figura 6.8 foi realizado com madeira de curupixá 27mm. Esta madeira passou inicialmente pela secagem natural (grade) e seu conteúdo mássico inicial médio de umidade para o processo de secagem em estufa foi de 0.18. As temperaturas de bulbo seco e úmido e a evolução de umidade podem ser vistas na mesma figura.

O conteúdo mássico de umidade representado é uma média de quatro amostras de controle, representado por apenas quatro avaliações. Seu valor ao final do processo de secagem foi de 0.06.

Um único banho de condicionamento foi realizado próximo das 30 horas de processo, após o qual a temperatura de bulbo úmido sofreu um pequeno decaimento para depois manter-se praticamente constante ao longo da etapa de secagem. Após o banho de vapor, observou-se que a temperatura de bulbo seco aumentou até o início da etapa de resfriamento, a partir de 50 horas de processo. O resfriamento ocupou 4 horas. Esta secagem durou 54 horas.

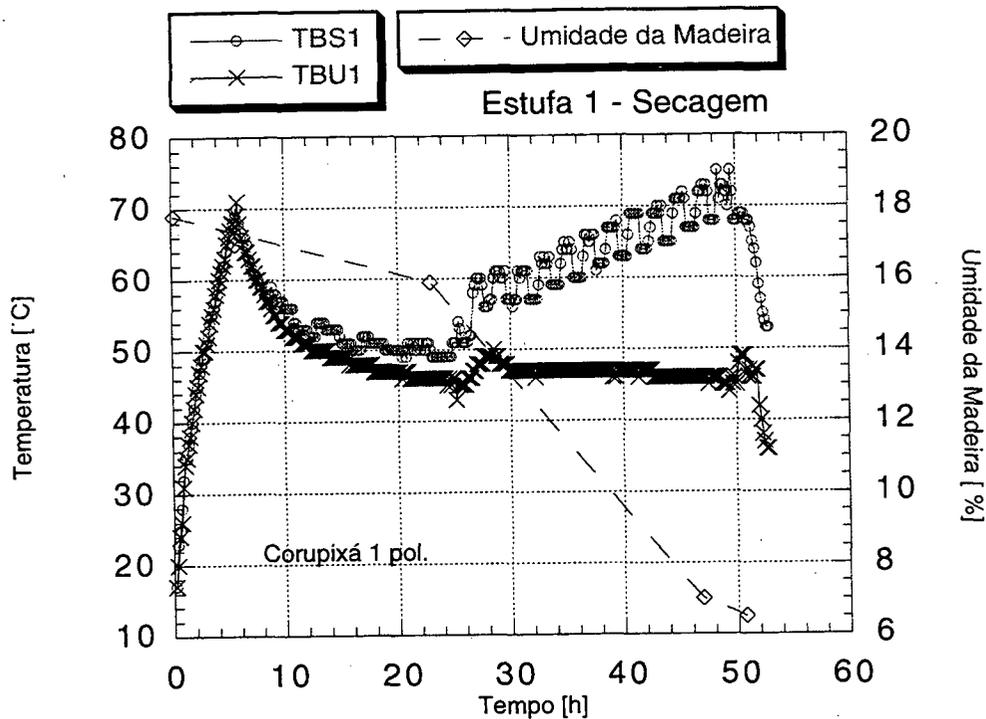


Figura 6.8 - Quarta secagem em estufa do curupixá 27mm. Secagem com banho de vapor.

6.2.5 - Quinta Secagem do Curupixá em Estufa

A secagem ilustrada na figura 6.9 foi realizada com a madeira de curupixá na espessura de 40mm (1.5 polegadas nominais), cuja umidade inicial variou entre 0.65 e 0.75. Observou-se que a etapa de aquecimento com banho de vapor conseguiu reduzir a diferença de umidade entre as quatro amostras, apesar de possuir duração de 10 horas. A evolução desta secagem pode ser observada na figura 6.9.

Foram realizados dois banhos de condicionamento: o primeiro após 50 horas de processo e o segundo após 170 horas de secagem. É importante notar que após os banhos de

recondicionamento, pode-se acelerar o processo de secagem, através do aumento na diferença entre as temperaturas de bulbo seco e úmido, fazendo com que os conteúdos mássicos de umidade das amostras de controle aproximem-se bastante, ficando entre 0.05 e 0.10. O refriamento inicia-se após 240 horas de secagem.

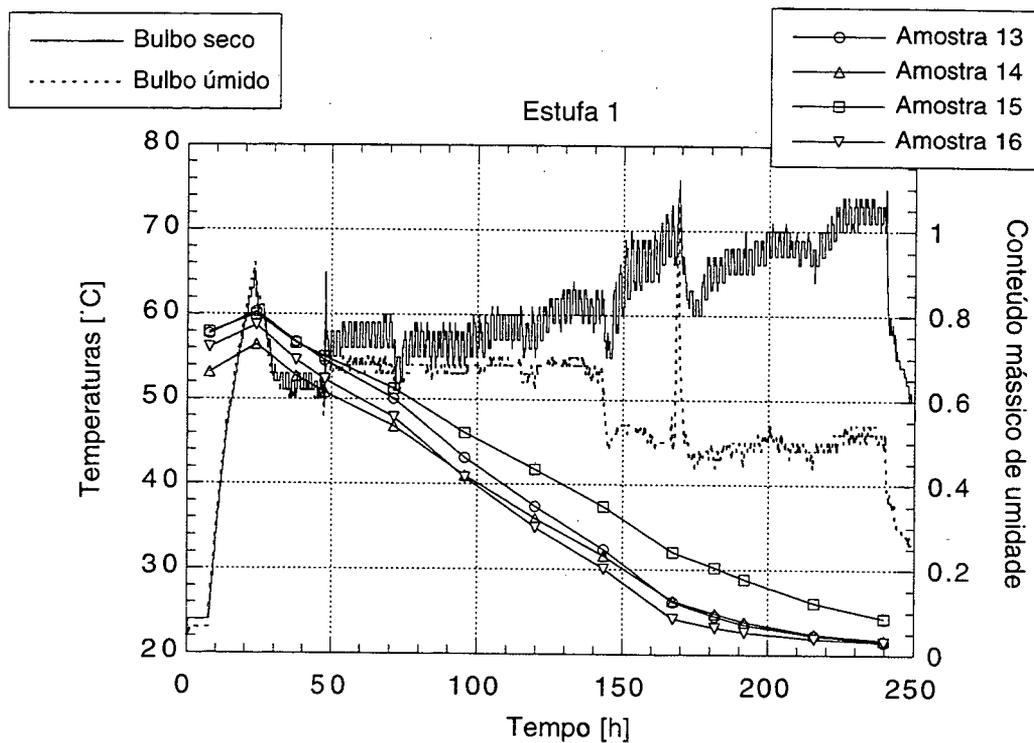


Figura 6.9 - Quinta secagem em estufa do curupixá 40 mm. Secagem com banho de vapor.

6.2.6 - Sexta Secagem do Curupixá em Estufa

As evoluções de temperatura (bulbos seco e úmido) e de conteúdo mássico de umidade de uma carga de curupixá 27mm podem ser observadas na figura 6.10. Os conteúdos iniciais de

umidade das amostras de controle ficaram entre 0.20 e 0.24. O conteúdo final de umidade das amostras foi de 0.10 a 0.12. A temperatura de bulbo seco aumentou até aproximadamente 40 horas de processo, enquanto a temperatura de bulbo úmido apresentou-se praticamente constante, com pequena diminuição durante a etapa de secagem. O aquecimento durou 6 horas, a secagem 34 horas. A partir das 40 horas de processo iniciou-se o resfriamento, onde pode-se observar a evolução das temperaturas de bulbo seco e úmido até 66 horas.

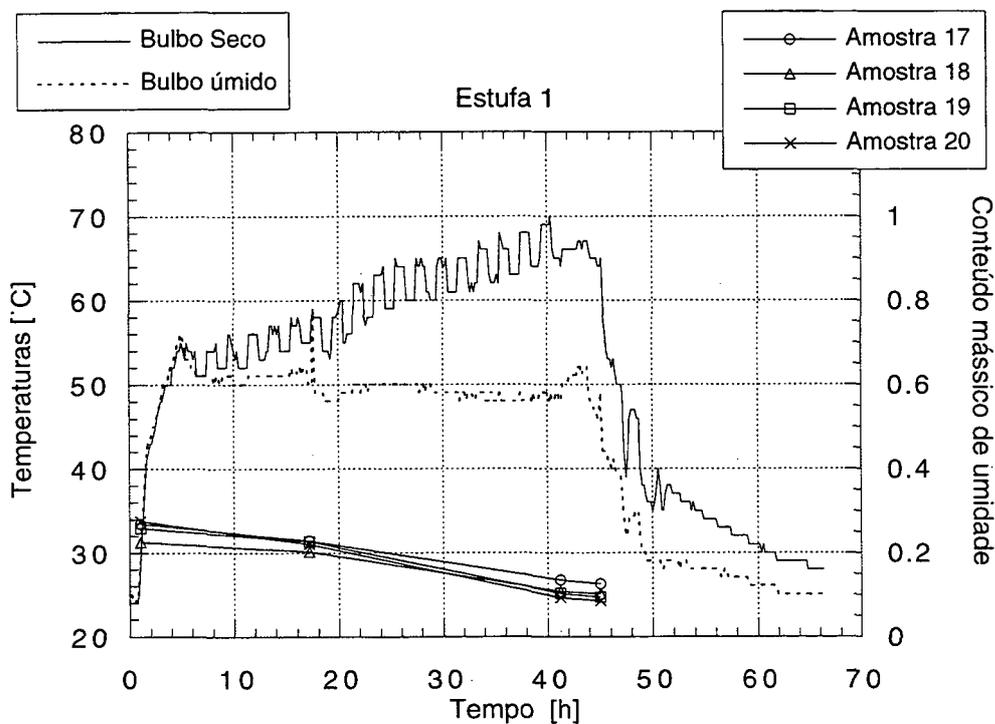


Figura 6.10 - Sexta secagem em estufa de curupixá 27 mm. Secagem com banho de vapor.

6.2.7 - Sétima Secagem do Curupixá em Estufa

A secagem do curupixá 27mm pode ser observada na figura 6.11, onde estão registradas as evoluções das temperaturas de bulbo seco e úmido, assim como o conteúdo mássico de

umidade das amostras de controle. A umidade inicial das amostras foi de 0.60 a 1.02. A etapa de aquecimento durou 20 horas com banho de vapor até atingir a temperatura de 55 °C. Foram realizados dois banhos de acondicionamento, após 170 e 190 horas de processo respectivamente. O conteúdo mássico de umidade das amostras para um valor entre 0.05 e 0.10, ficando dentro de uma variação aceitável, principalmente considerando-se a enorme diferença de umidade inicial entre as amostras de controle. O resfriamento iniciou-se após as 190 horas de processo, onde pode-se observar a evolução das temperaturas de bulbo seco e úmido durante o resfriamento.

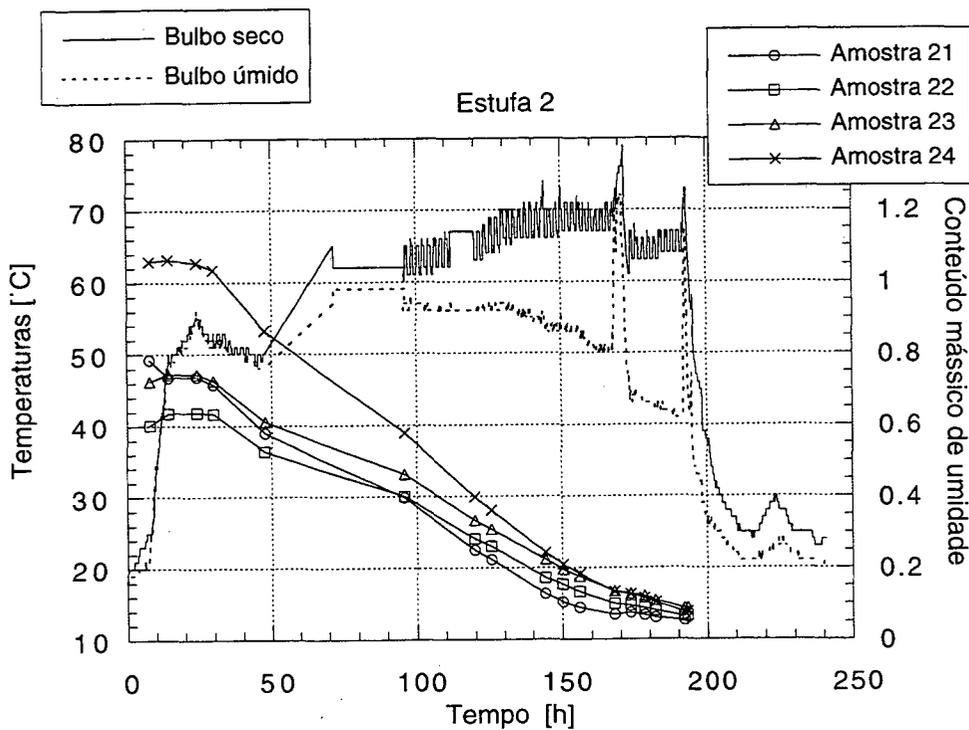


Figura 6.11 - Sétima secagem em estufa do curupixá 27 mm. Secagem com banho de vapor.

6.2.8 - Oitava Secagem do Curupixá em Estufa

A figura 6.12 apresenta novamente uma típica secagem do curupixá 27mm seco inicialmente através da secagem na grade (natural). Percebeu-se uma maior homogeneidade entre os conteúdos mássicos de umidade iniciais das amostras, variando entre 0.17 e 0.22. O aquecimento com banho de vapor durou apenas duas horas. Após isto, a temperatura de bulbo seco manteve-se aproximadamente constante até 20 horas de processo, assim como a temperatura de bulbo úmido. A partir deste ponto, observou-se um aumento da temperatura de bulbo seco e um conseqüente aumento na diferença entre as temperaturas de bulbo seco e úmido. Um único banho de condicionamento foi realizado após as 40 horas de secagem.

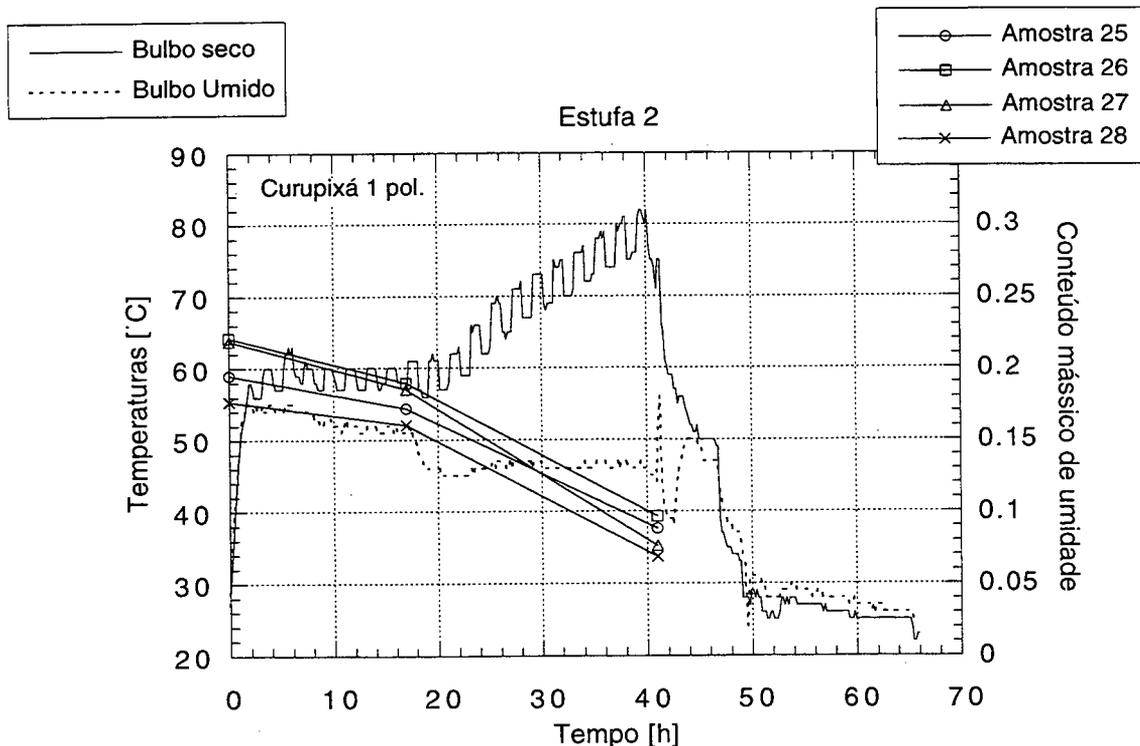


Figura 6.12 - Oitava secagem em estufa do curupixá 27mm. Secagem com banho de vapor.

6.2.9 - Nona Secagem do Curupixá em Estufa

A secagem de outra carga de curupixá 27mm seco inicialmente na grade pode ser observada na figura 6.13. O conteúdo mássico das amostras de controle ficou entre 0.18 e 0.24. A etapa de aquecimento durou apenas 5 horas. Durante a etapa de secagem gradual, observou-se o aumento progressivo da temperatura de bulbo seco até o patamar de 72°C, enquanto que a temperatura de bulbo úmido diminuiu em dois estágios. Um banho de condicionamento final foi realizado para aliviar as tensões do processo de secagem. O processo durou ao todo 42 horas. Após isto, iniciou-se a etapa de resfriamento. As aquisições de temperatura foram feitas até que a temperatura interna da estufa atingisse a temperatura do ar ambiente externo.

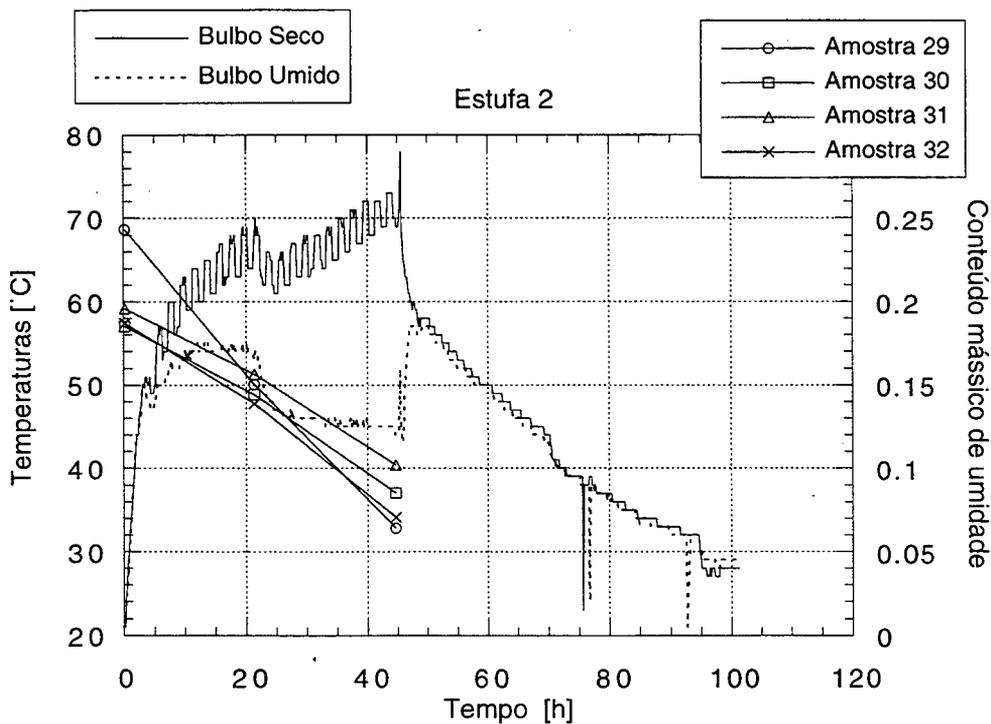


Figura 6.13 - Nona secagem em estufa do curupixá 27mm. Secagem com banho de vapor.

6.2.10 - Primeira Secagem do Eucalipto em Estufa

Existem aproximadamente entre 60 a 70 espécies de eucalipto sendo desenvolvidas no Brasil, incluindo pesquisas sobre desenvolvimento genético, plantio, manejo de floresta, modo de serrar e técnicas de secagem. A espécie que possui a maior área reflorestada é o *Eucalyptus grandis* e é a que tem sido explorada com mais intensidade para aplicações no setor moveleiro, tendo apresentado os melhores resultados.

Já se sabe que o eucalipto é uma espécie de madeira que desenvolve grandes tensões internas quando de sua secagem em estufa. Em grande parte, isto está associado às tensões de crescimento do eucalipto, uma vez que esta espécie se desenvolve muito rapidamente. O abate das florestas de eucalipto no Brasil ocorre em média quando as árvores possuem entre 18 a 20 anos, enquanto que na Argentina e no Chile isto ocorre quando as florestas possuem aproximadamente 40 anos de idade.

O processo de secagem a vapor e especialmente os condicionamentos a vapor mostram-se mais importantes nesse caso (Ananías et alii, 1983, Campbell, 1961). A secagem de uma carga de madeira de eucalipto de 52 mm de espessura (2 polegadas nominais) foi acompanhada e registrada. A madeira já havia permanecido durante algum tempo exposta ao ambiente em grades (secagem natural), de forma que seu conteúdo mássico de umidade se encontrava de certo modo reduzido. Das quatro amostras de controle para a secagem natural, três amostras estavam com conteúdo de umidade em torno de 0.23 e uma amostra estava a 0.18.

A secagem foi realizada com vários condicionamentos a vapor durante o processo a fim de manter baixas as tensões internas. Rachaduras no topo ao fim da secagem são até certo ponto comuns nessas madeiras, pois já no recebimento da carga de madeira verde observa-se diversas peças com esta característica. Dada a espessura das peças, 52 mm, a redução do conteúdo de umidade foi gradual e uniforme para todas as amostras de controle (33, 34, 35 e 36). Pode-se

notar, porém, um ganho inicial de massa (umidade) destas amostras durante a fase de aquecimento.

Os conteúdos de umidade finais das amostras se situam entre 0.10 e 0.13 após 140 horas de secagem. A secagem a vapor de outras cargas de madeira de eucalipto de 27 mm de espessura (1 polegada nominal) foram registradas mas não se encontram aqui descritas por não se afastarem significativamente do comportamento deste ensaio. Uma ausência de dados adquiridos entre 25 e 45 horas de secagem causada por pane no equipamento, não resultou em nenhuma descontinuidade importante na evolução da redução de massa.

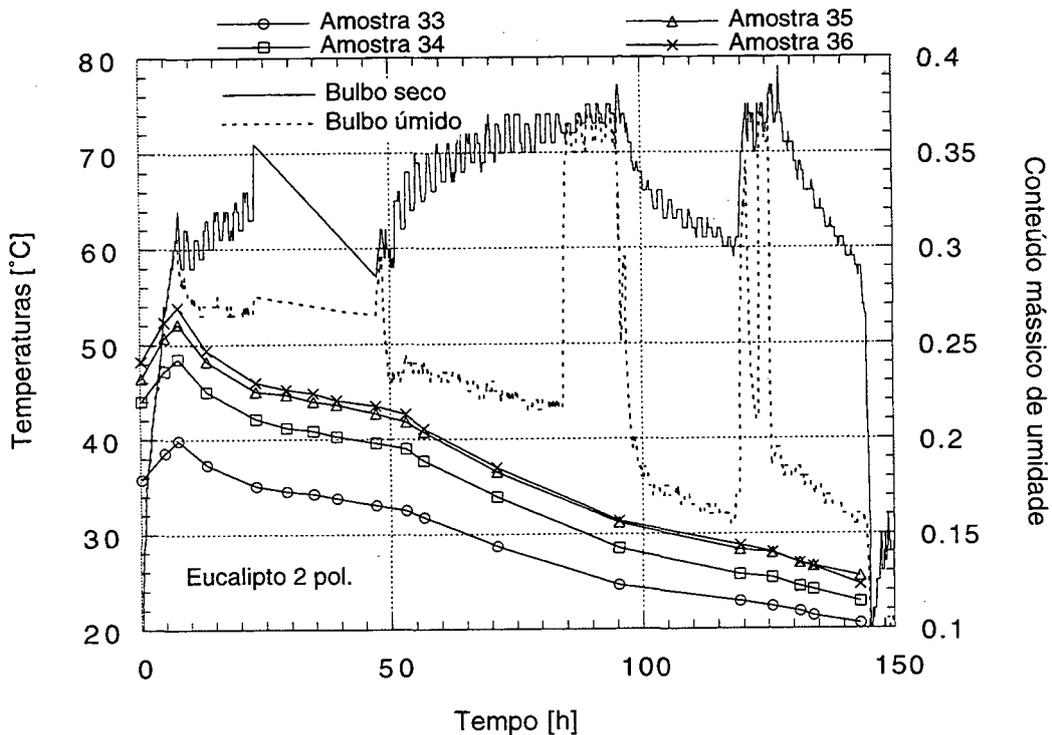


Figura 6.14 - Primeira secagem em estufa de eucalipto de 52 mm de espessura. Secagem com banho de vapor.

6.2.11 - Segunda Secagem do Eucalipto em Estufa

A segunda secagem do eucalipto 55mm pode ser observada na figura 6.15. O conteúdo mássico inicial das amostras variou entre 0.18 e 0.23, em função da secagem natural prévia. A etapa de aquecimento durou 5 horas, atingindo um máximo de 53°C. A partir deste ponto observa-se a evolução das temperaturas de bulbo seco e úmido durante a etapa de secagem gradual. Após 50 horas de processo, realizou-se um banho de condicionamento para alívio das tensões e para aumento da temperatura de bulbo seco e de sua diferença em relação à temperatura de bulbo úmido. O processo de secagem encerra-se com 70 horas, onde as amostras de controle apresentam uma variação de conteúdo mássico entre 0.09 e 0.12. Após as 70 horas tem-se o resfriamento até o atingimento da temperatura do ambiente externo.

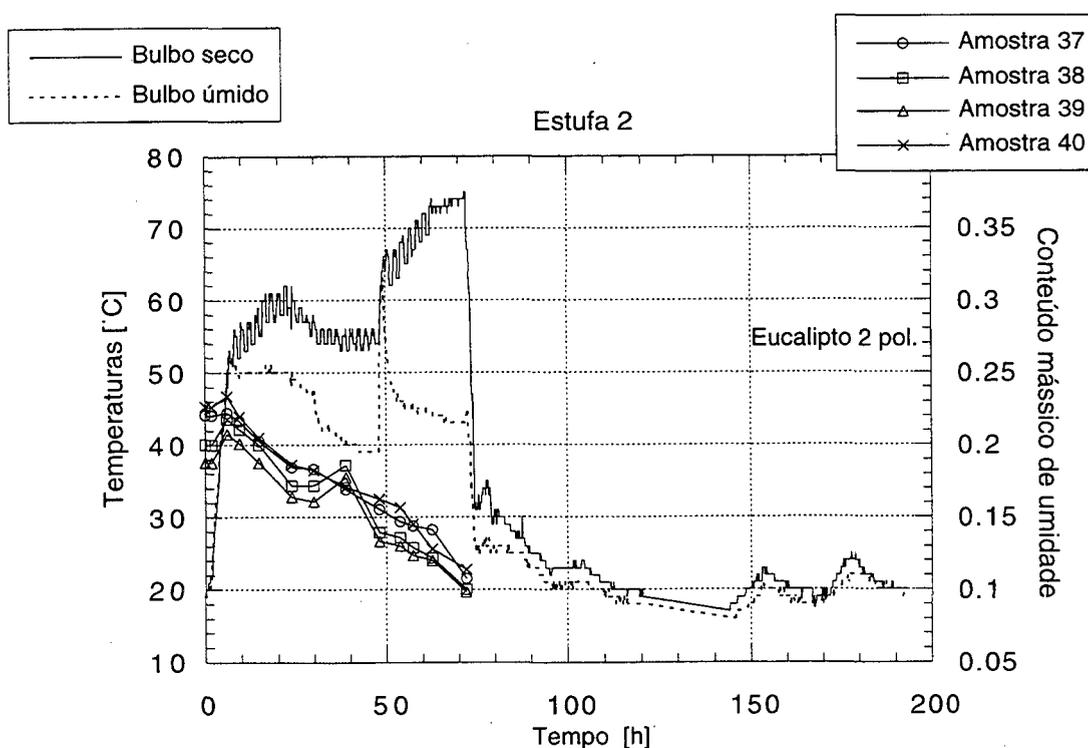


Figura 6.15 - Segunda secagem em estufa do eucalipto 52mm. Secagem com banho de vapor.

6.2.12 - Terceira Secagem do Eucalipto em Estufa

A terceira secagem de eucalipto foi realizada misturando-se as espessuras de 27mm e 40mm, em função da falta de madeira de 27mm para completar a carga. Obviamente, o processo foi conduzido considerando as restrições impostas pela madeira de maior espessura. O conteúdo mássico inicial das amostras ficou entre 0.12 e 0.15. Novamente esta madeira ficou inicialmente um determinado período secando pelo método natural (grade). Inicialmente foi realizado um aquecimento de 3 horas com banho de vapor. Após isto iniciou-se a etapa de secagem gradual com aumento da temperatura. Entre 55 e 70 horas de processo foi realizado um banho de recondicionamento mais lento sem que houvesse um significativo aumento da temperatura de bulbo seco. O processo encerrou com 75 horas, onde as amostras de controle atingiram uma umidade de 0.06 a 0.08. Após as 75 horas de aquecimento e secagem gradual, tem-se a etapa de resfriamento. Esta secagem pode ser observada na figura 6.16.

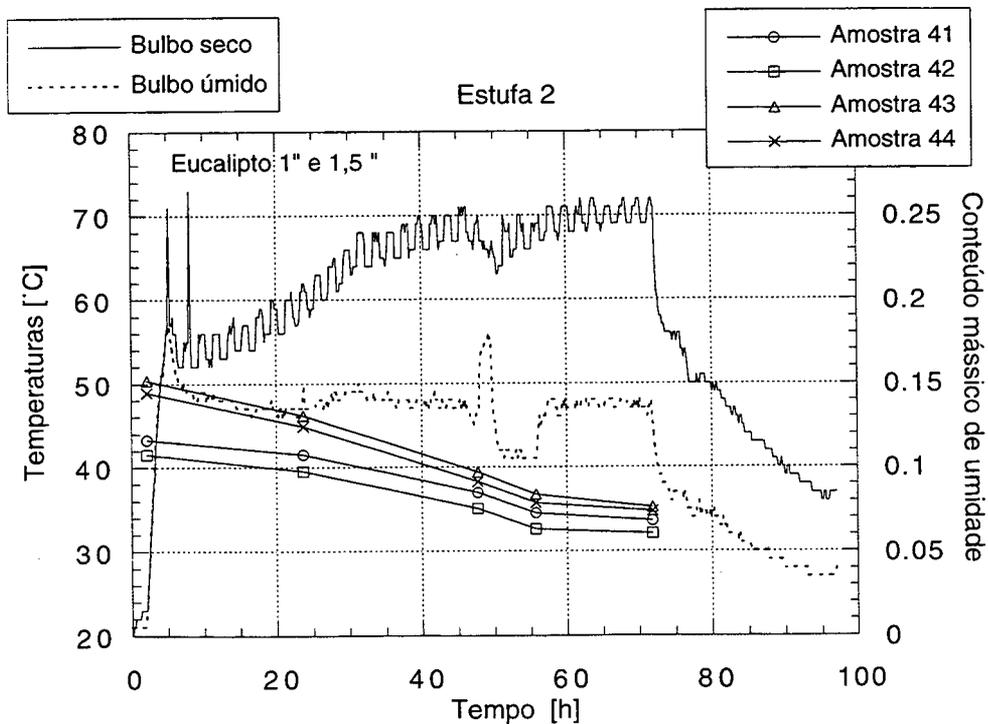


Figura 6.16 - Terceira secagem em estufa de eucalipto 27 e 40mm. Secagem com banho de vapor.

6.2.13 - Heterogeneidades na Secagem em Estufa

O conteúdo de umidade de duas secagens da madeira de curupixá de 27 mm foi verificada após o resfriamento, em diferentes posições na pilha, para se avaliar a variação do conteúdo de umidade final. A distribuição do ar circulante, o correto posicionamento dos dampers e a uniformidade da distribuição do calor nos trocadores são responsáveis pela homogeneidade da madeira ao final do processo de secagem com banho de vapor (CRT).

Um medidor elétrico de umidade, do tipo de pinos cravados medindo resistividade, foi utilizado para esta finalidade, tendo em vista a qualidade aceitável desse tipo de instrumento quando se trata de medir baixos conteúdos de umidade. Os resultados encontram-se na figura 5.8.

O eixo das ordenadas corresponde à posição de medição a partir da porta de carregamento da estufa. Três alturas foram avaliadas, três localizações laterais foram tomadas para cada altura e posição e três posições no comprimento da carga de madeira foram consideradas. Desta forma, percebe-se que obtém-se uma matriz de conteúdo de umidade para cada carga de madeira seca, perfazendo um total de 27 pontos para cada carga. A figura 6.17 mostra os valores medidos para duas estufas de madeira de curupixá, totalizando 54 medições de umidade da madeira, as quais se dispersam em torno da média de 0.07. A única posição que apresenta uma certa tendência, é a inferior, junto ao vagonete da estufa número 1, onde os conteúdos de umidade das tábuas foram ligeiramente superiores às demais. Esta dispersão pode ser justificada pela fuga de ar circulante junto à base da pilha de madeira no vagonete, uma vez que existe uma folga entre o conjunto vagonete/carga de madeira e a parte inferior da rampa inclinada dentro da estufa. No entanto, a dispersão no todo é bastante aceitável e a qualidade dos resultados é satisfatória.

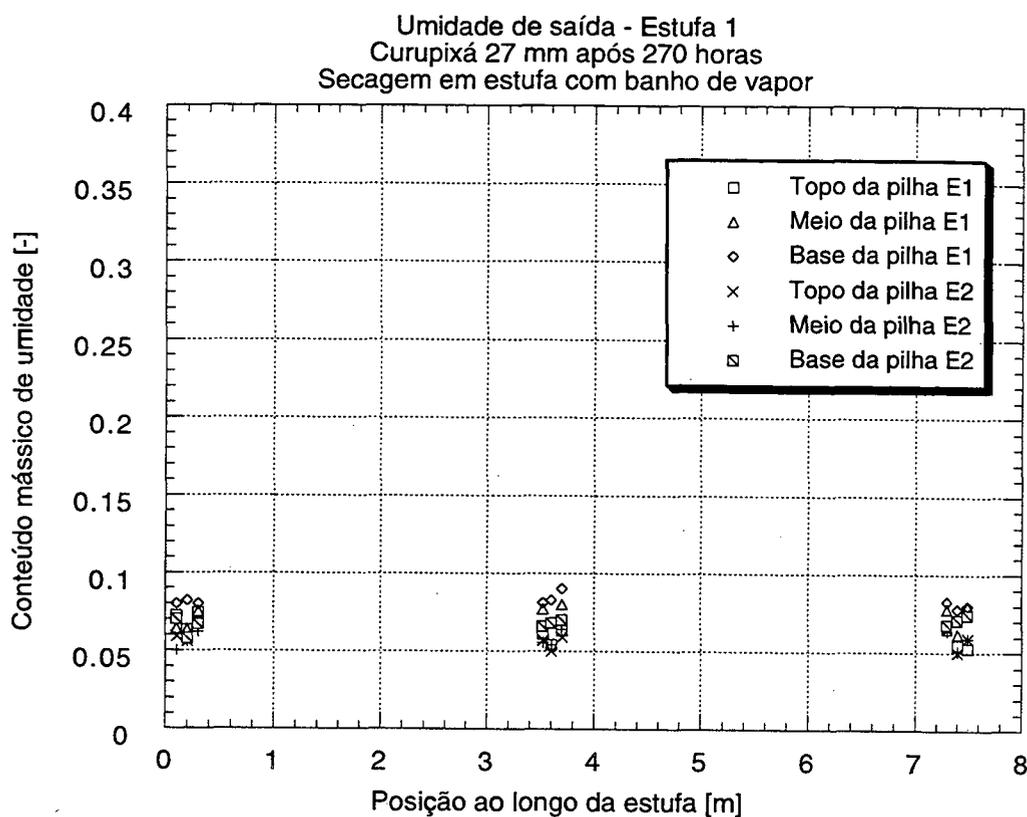


Figura 6.17 - Distribuição espacial do conteúdo de umidade na pilha de madeira de curupixá 27mm após a secagem em estufa com banho de vapor.

A figura 6.18 mostra a distribuição espacial (matriz de umidade) de umidade de uma carga de madeira de eucalipto de espessura 27 mm com umidade inicial superior a 50% seca no processo com banho de vapor (CRT).

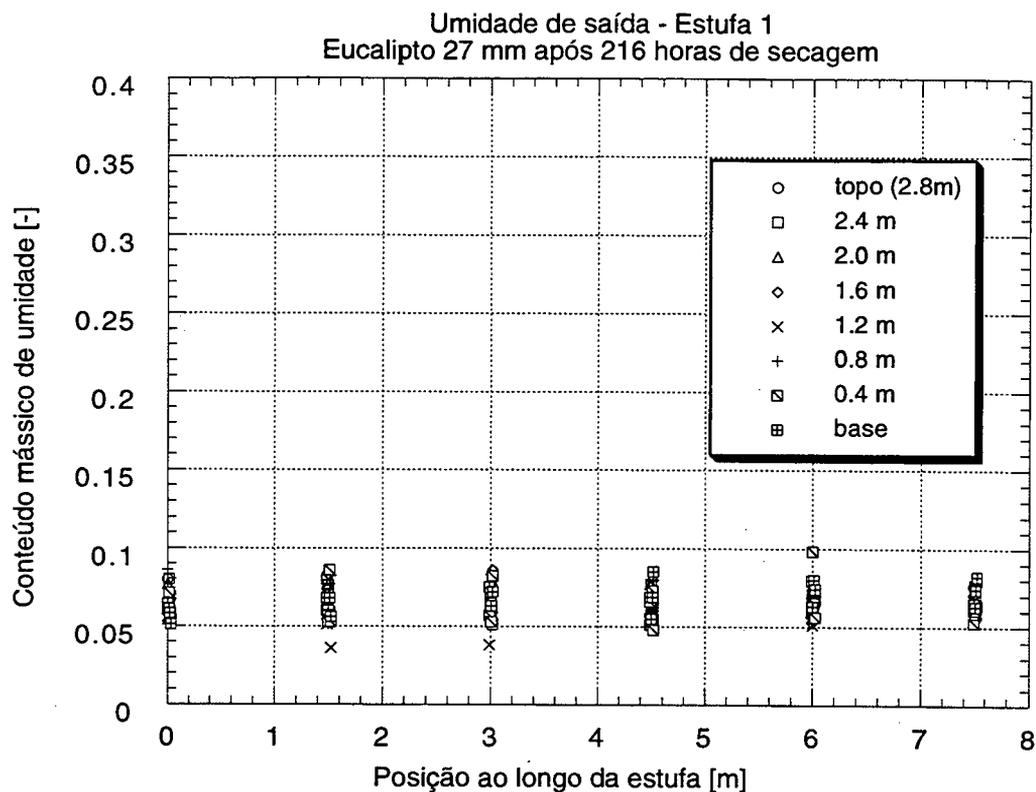


Figura 6.18 - Distribuição espacial do conteúdo de umidade na pilha de madeira de eucalipto 27mm após a secagem em estufa com banho de vapor.

6.3 - Secagem Natural

Com o objetivo de se realizar uma comparação, uma carga de madeira de eucalipto de espessura 40 mm (1,5 polegadas nominais) foi gradeada e acompanhada durante o processo de secagem natural, por exposição ao ambiente. A evolução do conteúdo mássico (umidade) de três amostras de controle foram acompanhadas semanalmente durante os quatro primeiros meses de secagem. Duas destas amostras de controle foram reexaminadas após um ano de secagem. A figura 6.19 mostra a evolução dos conteúdos de umidade dessas amostras. A temperatura de bulbo seco do ar foi igualmente registrada no momento das pesagens, que se realizaram entre

8:30 e 16:00 horas. As temperaturas registradas são ilustrativas dos valores que esse parâmetro pode assumir durante o dia, no período de secagem. O período de secagem desta grade de madeira foi entre junho de 1995 e maio de 1996.

A figura 6.20 preserva a escala de tempo em horas para facilitar a comparação com a secagem em estufa. A taxa de secagem é bastante regular no decorrer do processo, pelo menos para as amostras 46 e 47. Após os quatro meses iniciais de secagem, as aquisições semanais do conteúdo de umidade das amostras de controle foram encerradas.

Após 8 meses de secagem natural, a aquisição de conteúdo de umidade voltou a ser realizada, quando pode-se observar que o conteúdo de umidade das amostras de controle 46 e 47 diminuiu apenas 2 pontos percentuais. A partir desse ponto, deve-se esperar uma variação muito pequena na evolução do conteúdo de umidade das amostras.

O tempo de secagem pode ser bastante elevado, chegando a mais de 100 dias. Observa-se que o conteúdo de umidade das amostras não diminui muito abaixo de 0.2, mesmo após um ano de exposição às condições ambientais. Pode-se dizer que neste ponto, essas amostras atingiram um conteúdo de umidade que é a umidade de equilíbrio da madeira para as condições de temperatura e umidade relativa médias ambientais.

Percebe-se, deste modo, que o conteúdo de umidade das amostras para esta espécie de eucalipto dificilmente será inferior a 0.2 na secagem por exposição ao ar ambiente, em função das condições do clima local. Uma secagem em estufa é necessária a fim de viabilizar a utilização da madeira como matéria-prima para móveis. O conteúdo de umidade para a fabricação de móveis para o mercado interno, ou seja, para o Brasil, é entre 0.08 e 0.12, enquanto que para o mercado externo, ou seja, Alemanha e Estados Unidos da América, exige-se teores de umidade entre 0.06 e 0.08.

A eficiência da secagem a vapor não pode ser avaliada pela simples comparação dos tempos de secagem. A principal resistência no processo, excetuando-se os instantes iniciais, é o

transporte de massa do interior da madeira até sua superfície. Um parâmetro que pode ser usado como referência é a taxa de secagem para um certo nível de conteúdo de umidade. A figura 6.19 mostra as taxas de secagem em função dos conteúdos médios de umidade para diversas operações com eucalipto de 27 mm, 40 mm e 52 mm de espessura (1", 1,5" e 2" nominais), em processos de secagem natural e com banho de vapor. Os dados indicam claramente taxas de secagem significativamente mais elevadas para a secagem a vapor em estufa, mesmo a baixos conteúdos de umidade, onde as permeabilidades são menores. As retas na figura 6.20 são apenas indicativas, não representando regressões lineares sobre os dados.

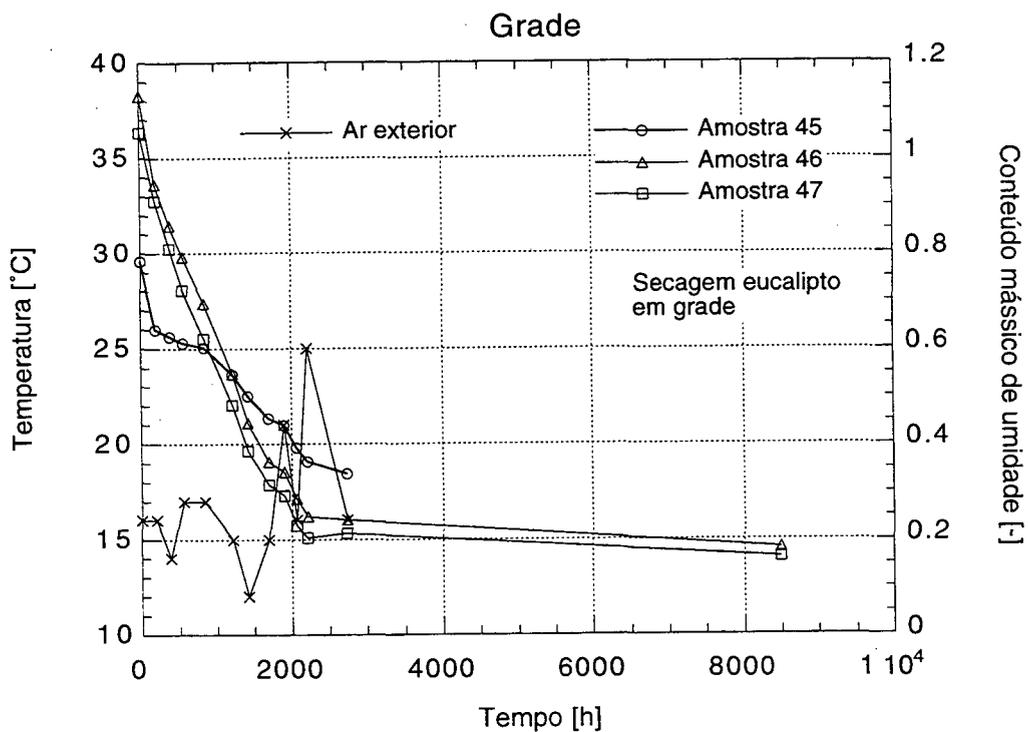


Figura 6.19 - Secagem natural de eucalipto de 40 mm (1,5 polegadas).

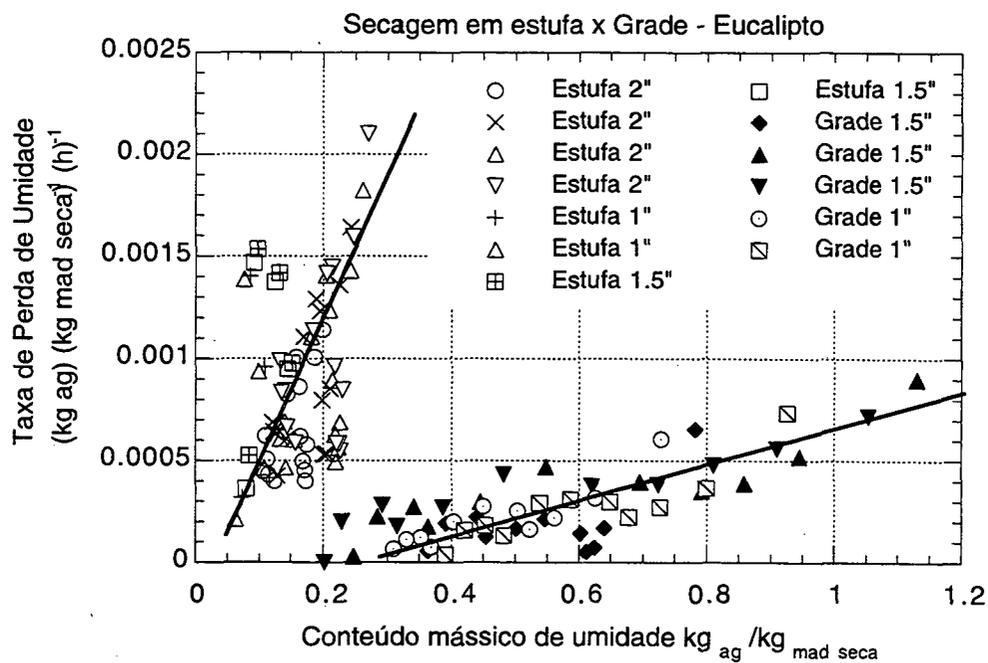


Figura 6.20 - Comparação das taxas de secagem natural e em estufa com banho de vapor em função do conteúdo de umidade para eucalipto de diferentes espessuras.

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES

As observações experimentais de secagens de tábuas das madeiras de curupixá e eucalipto através do processo com banho de vapor, realizadas em estufas de porte industrial, permitiram colocar em evidência alguns aspectos deste processo:

- A redução inquestionável do tempo de secagem, de alguns meses em secagem natural, para menos de 10 dias através do processo de secagem com banho de vapor, uma vez que a secagem da madeira em estufas permite possuir condições de temperatura e umidade relativa do ar controladas independente das condições das condições atmosféricas do ar externo às estufas;

- O tempo de secagem utilizando-se o processo com banho de vapor é menor do que o tempo necessário para a secagem através do método convencional em função da utilização da injeção de vapor ao longo de todo o processo e de banhos intermediários de condicionamento;

- O pré-condicionamento provocado pelo aquecimento com banho de vapor saturado, reduz as tensões internas e restabelece os caminhos da fase líquida entre o interior das tábuas e sua superfície, implicando em aumento das taxas de transporte de umidade e melhoria da qualidade do produto final em termos de fissuras superficiais e deformações;

- O conteúdo mássico de umidade final da madeira é satisfatoriamente uniforme, mesmo quando a carga de madeira apresenta considerável variação de conteúdo de umidade inicial. Pode-se observar que o conteúdo mássico de umidade inicial é diferenciado, mas que o processo com banho de vapor permite obter uma boa homogeneidade na umidade final da madeira aliado, obviamente, a boas condições de funcionamento das estufas;

- A distribuição espacial da umidade final na pilha é bastante uniforme, não apresentando regiões de secagem mais acentuada por causa do bom empilhamento das tábuas que formam a carga, da reversão do sentido de rotação dos ventiladores, da uniformidade de ventilação e aporte de calor, da adequada renovação de ar e da condução do processo com banho de vapor;

- A qualidade dos dados adquiridos pelo equipamento de controle industrial não permite que se façam modelos preditivos do comportamento da secagem para madeiras diferentes das ensaiadas. A limitação de resolução das leituras de temperatura em valores inteiros de graus centígrados reduz a precisão das aquisições de dados. As aquisições de dados sobre vazão de ar de renovação, vazão de vapor nos sistemas de aquecimento e umidificação não foram possíveis em função de não se possuir equipamentos adequados. Experimentos complementares para a aquisição destes dados permitirão desenvolver modelos com razoável precisão;

- A automatização do referido processo pode ser feita desde que o sistema de automatização seja desenvolvido para permitir a reprodução dos procedimentos até agora utilizados. A evolução da umidade contida nas amostras deve ser um parâmetro de controle, mas a aquisição não pode ser feita por medidores elétricos do tipo resistivo. Estes apresentam um funcionamento insatisfatório, principalmente para altos conteúdos de umidade (madeira verde), e não foram considerados neste estudo. Os equipamentos automatizados de controle de secagem de madeira utilizam os medidores elétricos tipo resistivo para acompanhar as evoluções dos conteúdos mássicos de umidade de um conjunto de tábuas. O funcionamento insatisfatório deste sistema de medição de umidade da madeira pode fazer a secagem evoluir em ritmo mais rápido ou mais lento. A evolução da secagem em ritmo mais rápido, ocasionado por leituras de umidade da madeira menores que a umidade real, faz com que o risco de aparecimento de defeitos de secagem aumente. A evolução do processo em ritmo mais lento, ocasionado por leituras de umidade maiores que a umidade real, faz com que a secagem demore mais tempo que o necessário. Desta forma, percebe-se que o desenvolvimento de um sistema de medição de umidade da madeira confiável é fundamental para a obtenção de resultados positivos para as secagens com controle automatizado;

- Os banhos de vapor intermediários para acondicionamento e alívio de tensões internas, melhoram a qualidade da madeira seca, sem retardar o processo de secagem, uma vez que os banhos de vapor restabelecem os caminhos da fase líquida no meio poroso;

- Altas taxas de remoção de umidade podem ser conseguidas, ainda que a baixos conteúdos de umidade, sem que a madeira entre em colapso ou sofra encruamento em função dos banhos de vapor e do aumento constante da temperatura ao longo do processo;

- As taxas de secagem são mantidas constantes durante todo o processo pelo aumento da temperatura através do aumento da pressão de saturação do vapor;

- O processo de secagem com banho de vapor com aumento de temperatura permite desenvolver secagens onde o potencial de secagem é maior que o sugerido por Kollmann e Côté (1968) para madeiras duras e de difícil secagem;

- As amostras de controle com sentido de corte tangencial, determinando transporte predominante na direção radial, normalmente secam mais rápido que as amostras com sentido de corte radial, que determina o transporte predominante na direção tangencial. Isto ocorre em função da posição dos elementos raios da estrutura da madeira em orientação favorável nas tábuas de corte tangencial, fazendo com que o transporte na direção tangencial seja favorecido.

APÊNDICE A
CONDUTIVIDADE TÉRMICA

APÊNDICE A - CONDUTIVIDADE TÉRMICA

O fluxo de calor em regime permanente é descrito pela lei de Fourier. Pode-se dizer que a lei de Fourier para o fluxo de calor é análoga a lei de Darcy para o escoamento de líquidos. A condutividade térmica de um material é determinada dividindo-se o fluxo pelo gradiente, ou melhor:

$$K = \frac{Q^* / tA}{\Delta t / L} = \frac{Q^* L}{tA \Delta T} \quad (\text{A.1})$$

ou então:

$$Q^* = \frac{KA t \Delta T}{L} \quad (\text{A.2})$$

onde : K : condutividade térmica, J/(m K s) ou W/mK ;

: Q* : quantidade de calor transferido, J;

: t : intervalo de tempo, s;

: A : área da seção transversal perpendicular a direção do escoamento, m²;

: L : distância do caminho do fluxo do calor no material, m;

: ΔT : diferença de temperatura entre as faces, K.

Caso se deseje desenvolver modelos de simulação numérica para o fluxo de calor e escoamento de fluidos na madeira, pode-se utilizar como referência as equações relacionadas ao longo deste capítulo.

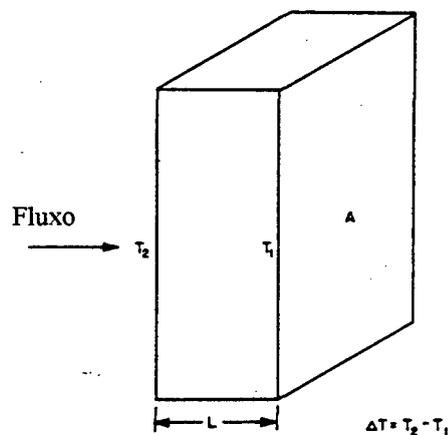


Figura A.1 - Significado dos termos da lei de Fourier (Siau, 1984).

A árvore possui um formato cilíndrico, o que sugere a utilização, a princípio, da lei de Fourier em coordenadas cilíndricas (r, θ, z) . Porém, a árvore é cortada em diversos pedaços com formato retangular, tábuas, fazendo com que a lei de Fourier seja utilizada em coordenadas cartesianas (x, y, z) para se avaliar o fluxo de calor durante a secagem da madeira. Como consequência, ao se utilizar a lei de Fourier em coordenadas cartesianas para se descrever a troca de calor na tábua, a propriedade de transporte, condutividade térmica, não é isotrópica.

A equação A.1 revela que a condutividade térmica é igual à taxa de fluxo de calor (J/s) através de um material de 1 m^3 de volume com uma diferença de $1 \text{ }^\circ\text{C}$ de temperatura entre as duas faces. A figura A.1 auxilia no entendimento da equação A.1. A partir da tabela 3.1, percebe-

se que a madeira pode ser considerada como um bom isolante térmico, principalmente na direção perpendicular à direção longitudinal, onde existe alta resistência térmica devido a cavidades celulares cheias de ar, dificultando a condução do calor.

A.1 - Equações Empíricas para a Condutividade Térmica

A condutividade térmica de muitas amostras de madeira foi medida por Maclean (1941) considerando diversos conteúdos de umidade e gravidades específicas. As equações abaixo são empíricas, mas apresentam a melhor concordância com seus dados experimentais.

A condutividade térmica transversal da madeira pode ser calculada, para um conteúdo de umidade inferior a 40%, através de:

$$K_{gT} = [G(5.18 + 0.096M) + 0.57v_a] \times 4.186 \times 10^{-2} \quad (\text{A.3})$$

onde: K_{gT} : condutividade térmica transversal da madeira, W/m K ;

v_a : conteúdo de volumétrico de ar.

O conteúdo de ar pode ser calculado para todos os conteúdos de umidade através de:

$$v_a = 1 - G(0.667 + 0.01 M)$$

Substituindo a equação anterior na equação A.3, tem-se:

$$K_{gT} = [G(4.80 + 0.090M) + 0.57] \times 4.186 \times 10^{-2} \quad (\text{A.4})$$

Para conteúdos de umidade superiores a 40%, uma boa parte da umidade é representada pela água capilar nos lúmens (cavidades celulares). Aparentemente a água capilar contribui mais que a água de impregnação na condutividade térmica. Assim, para um conteúdo de umidade maior que 40%, tem-se:

$$K_{gT} = [G(5.18 + 0.131M) + 0.57v_a] \times 4.186 \times 10^{-2} \quad (A.5)$$

Substituindo a equação da porosidade na equação 1.5, tem-se:

$$K_{gT} = [G(4.80 + 0.125M) + 0.57] \times 4.186 \times 10^{-2} \quad (A.6)$$

Maclean (1952) estabeleceu que a relação entre as condutividades térmicas longitudinal e transversal possui em média a razão de 2.5. Desta forma, torna-se válido escrever a seguinte expressão:

$$K_{gL} = 2.5 K_{gT} \quad (A.7)$$

onde: K_{gL} : condutividade térmica longitudinal da madeira.

Um modelo constituído por caminhos condutivos paralelos representa o que é descrito pela equação A.3. Estes caminhos paralelos são a substância da parede da célula, a água de impregnação e o ar, e estão melhor apresentados na figura A.2. A equação A.4 determina valores de 0.32 , 0.41 e 0.03 W/m K para a substância da parede celular seca, água de impregnação e ar respectivamente. A equação A.6 apresenta um valor 0.55 W/m K para uma mistura de água de impregnação e água capilar.

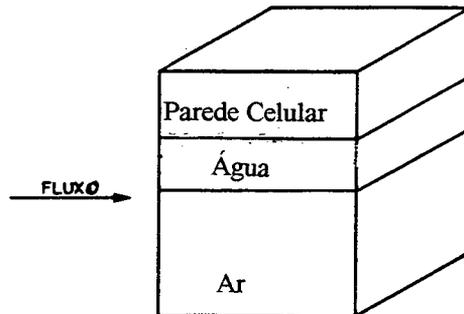


Figura A.2 - Modelo geométrico que representa a equação (3.3).

A.2 - Modelo de Condutividade

Na maior parte dos processos de transporte existe um considerável fluxo através da substância das paredes das células e às vezes ocorre através do ar que está contido no lúmen das células. É interessante ressaltar que o que foi comentado acima não é válido para o escoamento hidrodinâmico de fluidos. O fluxo de calor através das aberturas pode ser negligenciado muitas vezes em função das suas pequenas áreas superficiais em relação a área superficial da parede das células, uma vez que esta relação aberturas/superfície das paredes representa aproximadamente 1%. O modelo apresentado na figura A.3 possui dimensões unitárias. Admite-se que este modelo seja aplicado para todas as células na direção longitudinal, como traqueídeos, fibras, vasos e parênquima longitudinal. As paredes das células nas direções tangencial e radial são consideradas como tendo espessura igual e a proporção da espessura da parede da célula para o diâmetro é admitida como sendo igual para uma determinada espécie de madeira. Está se desconsiderando neste modelo a presença de paredes nas extremidades das células, pontuações e de células orientadas transversalmente. Desta forma, o modelo acima proposto pode ser aplicado para

descrever a condutividade térmica e elétrica, comportamento dielétrico e difusão do vapor d'água.

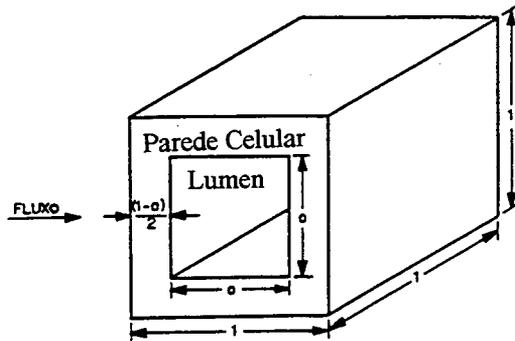


Figura A.3 - Modelo geométrico para uma célula unitária da madeira.

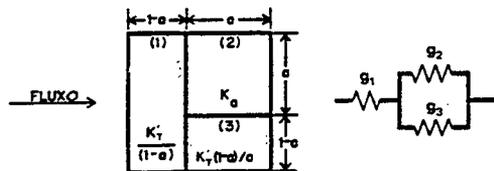


Figura A.4 - Circuito elétrico análogo para a condutância.

A figura A.4 auxilia no entendimento do fluxo na direção transversal, onde (1) e (3) são parede celular e (2) é o lumen. Isto pode ser visto em função da separação do fluxo de acordo com a formação do caminho a ser percorrido. A parede possui uma seção (1) com um comprimento equivalente a $(1-a)$ na direção do fluxo e com uma largura igual a unidade admitida inicialmente no modelo. A seção (2), ou lumen, é representada por um quadrado de lado (a). A

seção (3) da parede é representada pelas células da parede paralelas com o respectivo fluxo, tendo um comprimento igual ao lúmen, a , e uma largura igual a $(1-a)$ (Stamm, 1964).

Através de uma análise na figura A.4, pode-se notar que o calor é transferido através da seção (1) até atingir as seções (2) e (3), onde escoa em paralelo. A partir disto, pode-se analisar o modelo utilizando uma analogia com os circuitos elétricos tipo série/paralelo. O parâmetro a apresentado no modelo já foi definido e é igual a raiz quadrada da porosidade da madeira. Sabe-se que o conteúdo de ar da madeira pode ser calculado a partir da gravidade específica e do conteúdo de umidade. Assim:

$$a = \sqrt{v_a} \quad (\text{A.8a})$$

ou

$$v_a = a^2 \quad (\text{A.8b})$$

A.3 - Equação Teórica da Condutividade Transversal

Os circuitos elétricos ou térmicos podem ser estudados considerando as resistências e condutâncias porque as resistividades e condutividades podem ser aplicadas em cubos unitários de materiais. A resistência elétrica é expressa através da seguinte equação:

$$R = \frac{r^* L}{A} \quad (\text{A.9})$$

onde: R: resistência, ohm, volt/ampere ou K/W;

r^* : resistividade, ohm m ou m k / W;

L: comprimento, m;

A: área da seção transversal, m².

A equação anterior pode ser alterada para atingir a forma abaixo, mostrando a equação da condutância. Assim:

$$g = \frac{KA}{L} \quad (\text{A.10})$$

onde: g: condutância, ohm⁻¹ ou W/K

K: condutividade, ohm⁻¹ m⁻¹ ou W/mK

Pode-se calcular a resistência de circuitos com associações em série e em paralelo através da equação:

$$R_T = R_1 + \frac{1}{1/R_2 + 1/R_3} \quad (\text{A.11})$$

onde: R_T: resistência da madeira na direção transversal, ohm ou (s °C)/cal

R₁, R₂, R₃: resistências das seções 1, 2 e 3.

Escrevendo a equação A.11 em termos da condutância, tem-se:

$$\frac{1}{g_T} = \frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_2 + g_3} \quad (\text{A.12})$$

Considerando para esta análise um modelo cúbico com dimensões unitárias, tem-se:

$$g_T = K_{gT} \quad (\text{A.13})$$

$$g_1 = \frac{K'_T}{(1-a)} \quad (\text{A.14})$$

$$g_2 = K_a \quad (\text{A.15})$$

$$g_3 = \frac{K'_T(1-a)}{a} \quad (\text{A.16})$$

onde: K_{gT} : condutividade térmica transversal de uma célula de madeira, W/mK;

K_a : condutividade térmica do ar, W/mK;

K'_T : condutividade térmica transversal do material da parede da célula,

W/mK.

Substituindo as condutâncias acima descritas na equação A.12, obtém a equação geral da condutividade, que é:

$$\frac{1}{K_{gT}} = \frac{(1-a)}{K'_T} + \frac{a}{(1-a)K'_T + aK_a} \quad (\text{A.17})$$

ou

$$K_{gT} = \frac{(1-a)K_T'^2 + aK_a K_T'}{(1-a)^2 K_T' + a(1-a)K_a + aK_T'} \quad (\text{A.18})$$

onde: a : igual à razão entre dimensão do lúmen e da célula. Sendo também igual à raiz quadrada do conteúdo de ar:

A figura A.5 também mostra que o fluxo nas extremidades das paredes é não uniforme. É interessante lembrar que este fluxo foi considerado uniforme para o desenvolvimento da equação anterior. Com o objetivo de corrigir esta deficiência, deve-se utilizar um coeficiente de correção Z . Desta forma, tem-se:

$$K_{gT} = \frac{(1-a)ZK_T'^2 + aZK_a K_T'}{(1-a)^2 K_T' + a(1-a)K_a + aZK_T'} \quad (\text{A.19})$$

onde: Z : fração largura total da parede que pode ser considerada efetiva para a condução.

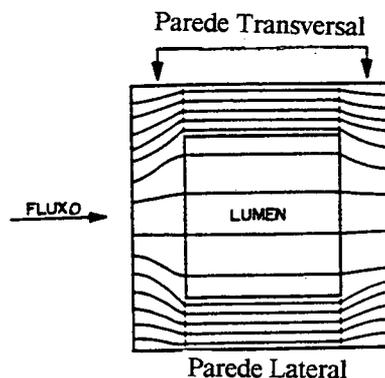


Figura A.5 - Concentração de fluxos aproximados através das paredes celulares (Siau, 1984).

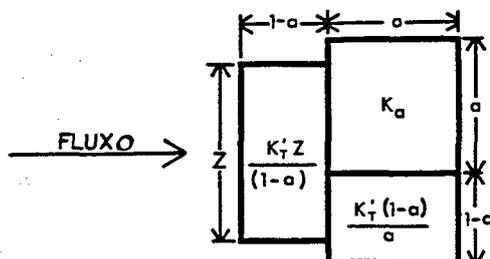


Figura A.6 - Modelo de condução transversal (Siau, 1984).

O modelo referente à equação A.15 é apresentado na figura A.6

Hart (1964) desenvolveu uma equação empírica para a fração (w_1) da largura da parede transversal adjacente ao lúmen que pode ser considerado efetivo para a condução, considerando que não existe condutividade para o espaço dentro do lúmen. Assim, tem-se:

$$w_1 = \frac{0.48(1-a)}{a} \{1 - \exp[-2.08a / (1-a)]\} \quad (\text{A.20})$$

onde: w_1 : fração da parede da célula, adjacente ao lúmen que tem condutividade efetiva.

A partir do foi que exposto acima, pode-se concluir que a parte da parede adjacente totalmente condutiva é representada por $w_1 a$. As outras partes da parede adjacente, representadas por $(1-a)$, são consideradas como totalmente condutivas. Para o caso do fluxo do calor, existe um considerável fluxo no lúmen devido à condutividade do ar. A concentração de fluxo no lúmen é

determinada por (K_a/K_T) , e a largura da fração adicional condutiva é determinada através de $(a K_a/K_T)$. Desta forma, as frações totais efetivamente condutivas, ou Z , são calculadas através de:

$$Z = w_1 a + (1-a) + a K_a/K_T$$

$$Z = 1 - a(1 - w_1 - K_a/K_T) \quad (\text{A.21})$$

A equação A.21, que define a forma de cálculo de Z , é apresentada na forma gráfica na figura A.7. Neste gráfico, tem-se Z plotado como uma função da variável a .

A relação entre o parâmetro a e a densidade e gravidade específica é apresentada na figura A.8 para vários conteúdos de umidade. Na figura A.9 tem-se a representação da relação entre a porosidade e a gravidade específica para vários conteúdos de umidade.

Os valores das condutividades térmicas transversais encontradas na literatura são mostradas na figura A.10. Analisando a figura A.10, percebe-se que existe uma grande tendência de que a condutividade térmica da substância da parede da célula (K_T) seja independente do conteúdo de umidade e que isto pode ser considerado verdadeiro para aplicações práticas. Os valores dos parâmetros K_a e K_T , conforme considerações anteriores, podem ser considerados independentes do conteúdo de umidade. Como o parâmetro K_{gT} é calculado através da equação A.19, percebe-se que ele é dependente do conteúdo de umidade. Assim, um aumento do conteúdo de umidade diminui a porosidade da madeira (e do parâmetro a), fazendo com que K_{gT} aumente.

O gráfico da figura A.11 apresenta uma relação aproximadamente linear de v_w e v_a com K_{gT} . É importante definir que $v_w = 1 - v_a$.

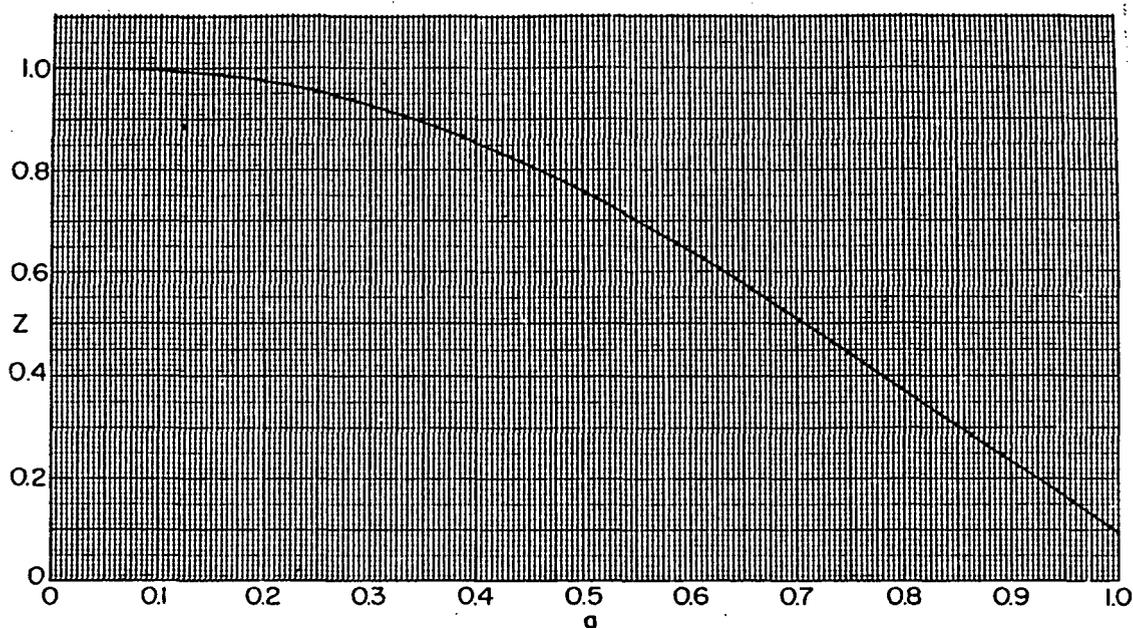


Figura A.7 - Parâmetro Z como função da variável a para a porosidade (Siau, 1984).

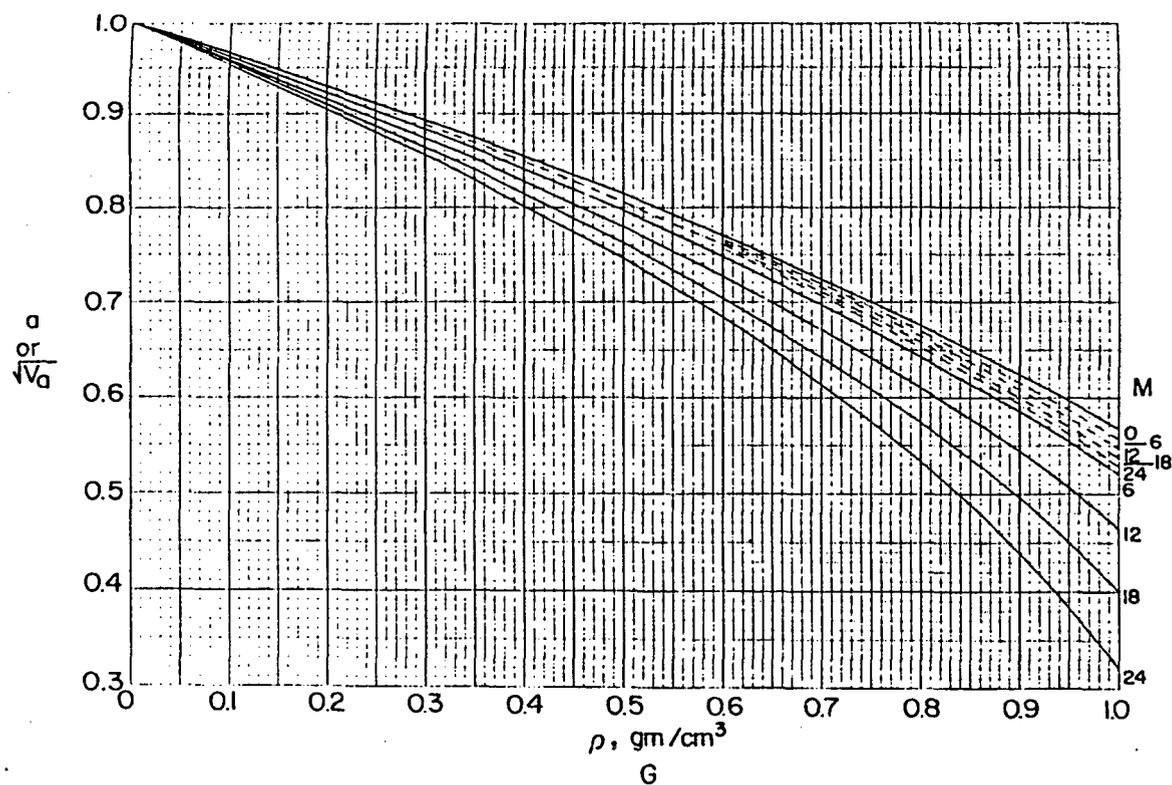


Figura A.8 - Parâmetro a como função da gravidade específica e densidade para vários conteúdos de umidade. As linhas contínuas representam a gravidade específica e as linhas tracejadas representam a densidade (Siau, 1984).

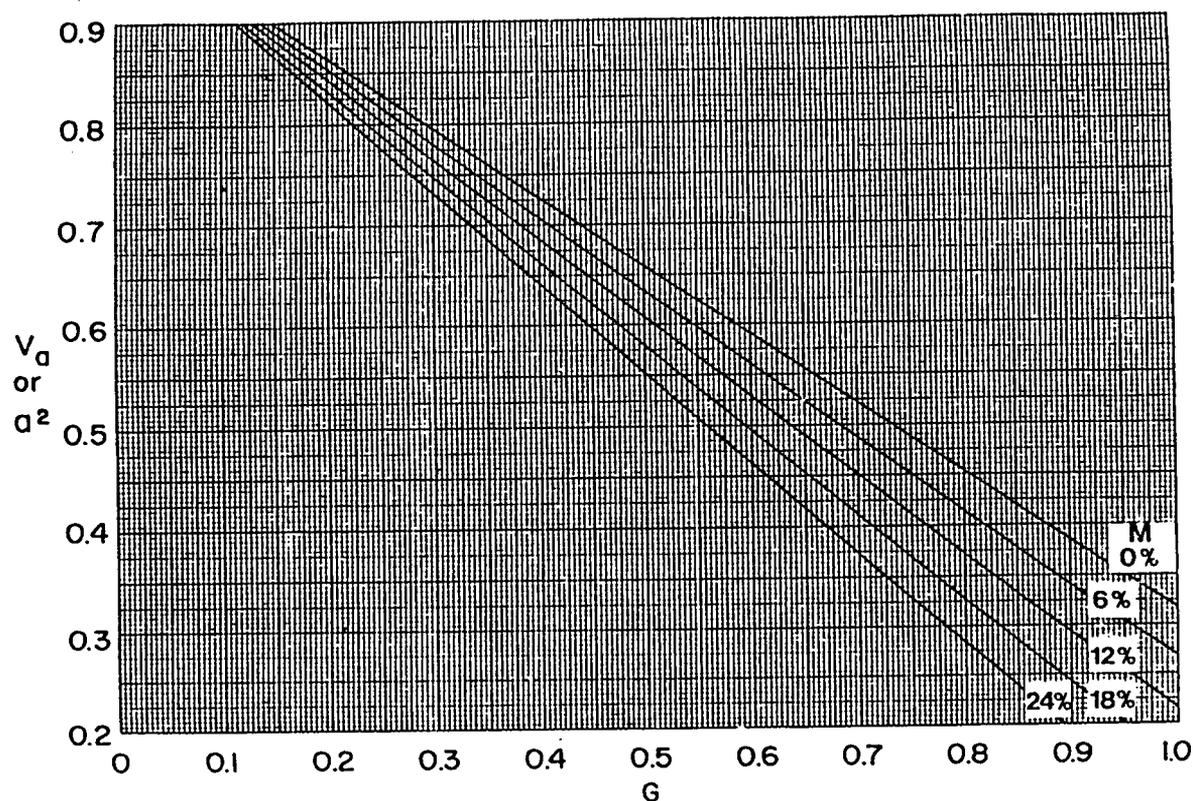


Figura A.9 - Porosidade como função da gravidade específica.

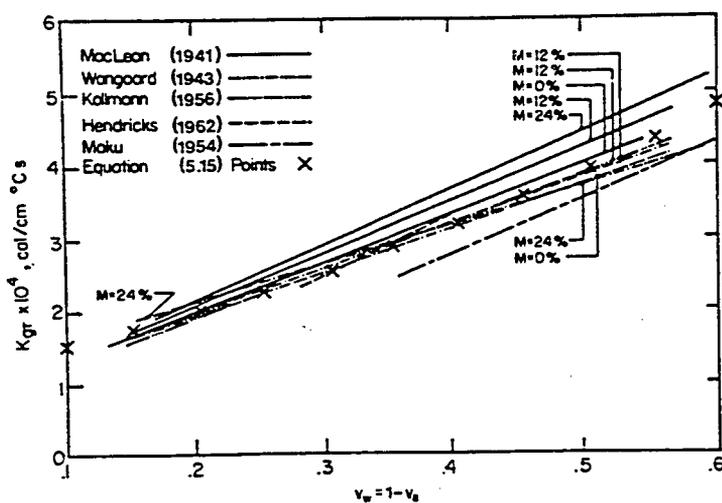


Figura A.10 - Condutividade térmica transversal da literatura, como uma função da fração de volume da substância da parede celular (Siau, 1970).

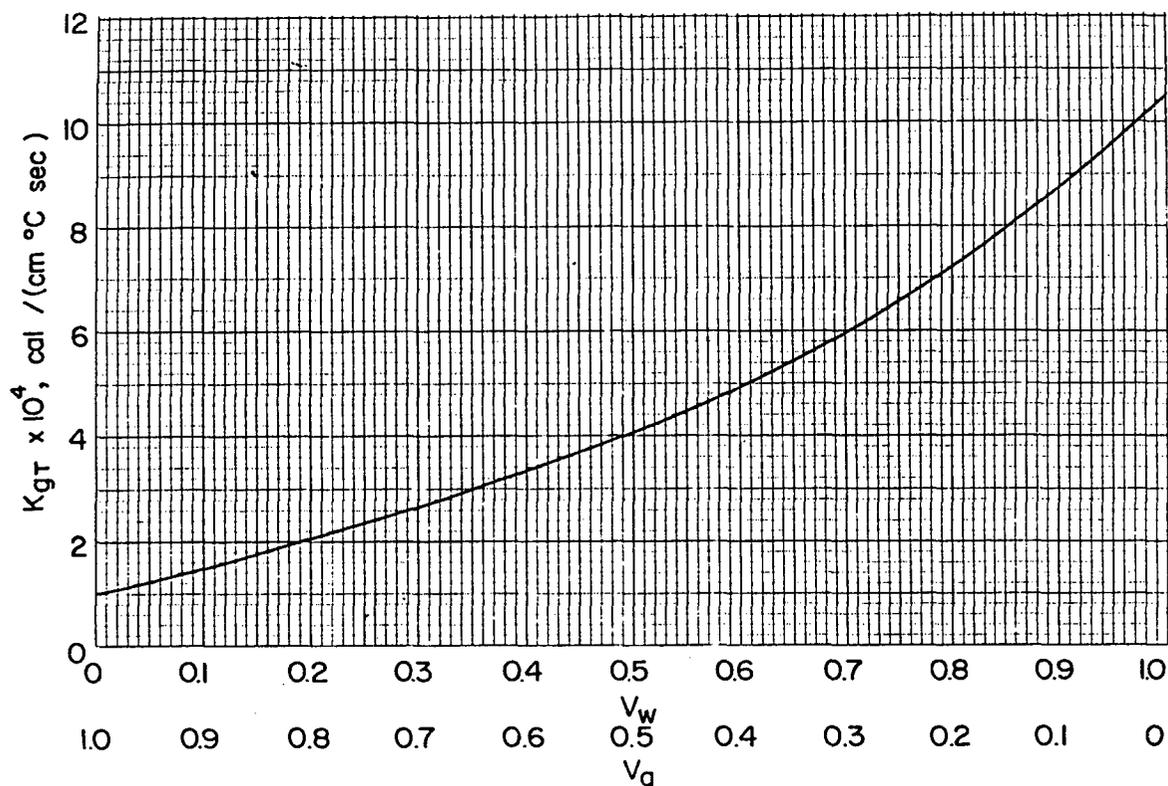


Figura A.11 - Condutividade térmica transversal da madeira versus fração de volume da substância da parede celular e porosidade (Siau, 1970).

A.4 - Equação Teórica da Condutividade Longitudinal

A equação teórica resultante da aplicação de um fluxo na direção do eixo das fibras para o modelo apresentado na figura A.3 é:

$$K_{gl} = K_L(1-v_a) + K_a v_a \quad (\text{A.22a})$$

ou

$$K_{gl} = K_L(1-a^2) + K_a a^2 \quad (\text{A.22b})$$

onde: K_L : condutividade térmica longitudinal da substância da parede da célula.

A figura A.12 mostra os valores da razão entre K_{gl} e K_{gr} , assumindo para K_L o valor de 0.88 W/mK. Os valores entre 0.45 e 0.37 estão de acordo com os resultados encontrados por MacLean (1952), representando as gravidades específicas normais da madeira.

Substituindo na equação A.22 o valor citado anteriormente, tem-se as seguintes equações:

$$K_{gl} = (21-20 v_a) \times 4.186 \times 10^{-2} \quad (\text{A.23a})$$

ou

$$K_{gl} = (21-20 a^2) \times 4.186 \times 10^{-2} \quad (\text{A.23b})$$

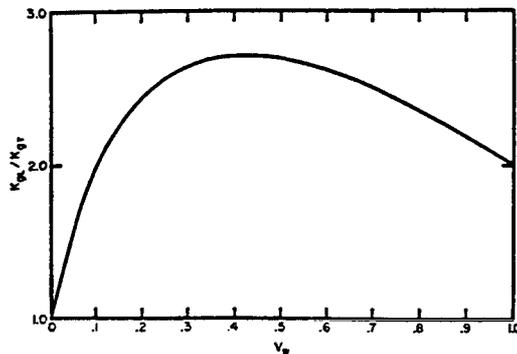


Figura A.12 - Relação entre as condutividades térmicas longitudinais e transversais como função da fração do volume da substância da parede celular.

A.5 - Convecção e Radiação

A resistência térmica de um determinado caminho com uma área unitária é diretamente proporcional ao comprimento na direção do escoamento do calor. A resistência térmica é calculada de acordo com a equação abaixo:

$$R = \frac{e}{K} \quad (\text{A.24})$$

onde: R : resistência térmica, $\text{m}^2 \text{K/W}$;

e : espessura, m.

De maneira análoga aos circuitos elétricos, para as resistências térmicas em série, tem-se:

$$R_t = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (\text{A.25})$$

onde: R_t : resistência térmica total;

$R_1, R_2 \dots R_n$: série de resistências térmicas.

A condutância de um material pode ser determinada através das equações:

$$U = \frac{1}{R} = \frac{K}{e} \quad (\text{A.26})$$

onde: U : condutância, $W/m^2 K$

Desta forma, pode-se calcular a taxa de transferência de calor através da equação:

$$\frac{Q^*}{t} = UA\Delta T \quad (A.27)$$

onde: Q^*/t : expresso em W .

A condutância térmica facilita o cálculo que envolve caminhos paralelos. Assim, cada caminho pode possuir sua condutância, mas uma condutância média pode ser obtida através da soma das condutâncias e frações de área dos componentes, como mostrado abaixo:

$$U_m = U_1 a_1 + U_2 a_2 + \dots + U_i a_i \quad (A.28)$$

onde: U_m : condutância média da área total;

$U_1 a_1 \dots U_i a_i$: condutâncias e frações de área dos componentes, tal que

$$\sum_1^i a_i = 1.$$

O calor é transferido para uma parede ou superfície através de uma combinação de convecção e radiação. O processo de transferência por convecção resulta na formação de uma camada limite turbulenta ou laminar na superfície que é conhecido como coeficiente de convecção (h), que possui as mesmas unidades da condutância. Desta forma, o valor de $(1/h)$ é uma resistência térmica que pode ser acrescentada a resistência térmica da parede.

O coeficiente de convecção, também conhecido como coeficiente de película, depende da diferença de temperatura entre a superfície e o ar, da velocidade de escoamento do ar, da viscosidade e difusividade térmica do ar. Estas propriedades podem ser representadas por números adimensionais tais como o número de Reynolds, número de Grashoff e o número de Prandtl. Da combinação dos números anteriores, pode-se determinar o número de Nusselt, que representa um coeficiente de película adimensional. O cálculo de um coeficiente de convecção necessita o conhecimento do tipo de convecção, ou seja, se ela é natural ou forçada e se o escoamento é laminar ou turbulento.

O número de Reynolds crítico é 20.000 para uma superfície. O número de Reynolds pode ser calculado para uma superfície plana através da equação:

$$\text{Re} = \frac{L' v \rho}{\mu} \quad (\text{A.29})$$

onde: L' : comprimento efetivo paralelo à superfície ao longo da qual se forma a camada limite, m;

v : velocidade média do ar relativo à superfície, m/s.

Maiores detalhes sobre a forma de se calcular os coeficientes de convecção podem ser encontrados na ASHRAE Handbook (1977).

APÊNDICE B

MODELOS DE PERMEABILIDADE APLICÁVEIS À MADEIRA

APÊNDICE B - MODELOS DE PERMEABILIDADE APLICÁVEIS À MADEIRA

Existem três modelos básicos de permeabilidade que podem ser aplicados ao material poroso madeira: o modelo de capilares paralelos simples, o modelo Petty para condutâncias em série e o modelo de Comstock para madeiras moles. Maiores detalhes sobre cada um destes modelos podem ser vistos a seguir.

B.1 - Modelo de Capilares Paralelos Simples

Este é o modelo mais simples de permeabilidade e sobre ele usa a equação de Poiseuille. Este modelo é o de capilares uniformes paralelos circulares. Como já foi estabelecido anteriormente, este modelo pode ser aplicável a vasos abertos de poros difusos de madeiras duras na direção longitudinal das fibras.

O raio r pode ser calculado através da inclinação e intersecção o gráfico de Klinkenberg usando a equação 4.41a ou 4.41b. O cálculo de n é possível a partir da intersecção da permeabilidade usando a equação 4.26 se a pressão é expressa em Pa. Caso a pressão esteja expressa em atmosferas, deve-se utilizar um fator de conversão. Deste modo, a equação que se obtém é a seguinte:

$$k = n \pi r^4 / (8\mu) \quad (\text{B.1})$$

onde: k : expressa em $\text{m}^2/\text{Pa s}$.

Este modelo foi utilizado por Smith e Lee (1958) para comparar as permeabilidades longitudinais teóricas ao ar de madeiras duras com valores experimentais. Foi encontrada uma boa concordância entre os valores teóricos e práticos para diversas espécies de madeiras duras estudadas.

B.2 - Modelo PETTY para Condutâncias em Série.

Os gráficos de permeabilidade $\times 1/P_m$ ou vazão específica $\times P_m$, para espécies de madeira são normalmente de formato curvilíneo, como pode ser observado na figura B.1. Isto tem sido atribuído por Petty à presença de altas e baixas condutâncias agindo em série em alguns elementos tais como traqueídeos e pontoações nas madeiras moles, vasos e pontoações intervalos nas madeiras duras. A medição da condutância pode ser relacionada a dois ou mais componentes, conforme segue:

$$1/g = 1/g_t + 1/g_p \quad (\text{B.2})$$

onde: g : condutância de duas resistências em série;

g_t : condutância do traqueídeo;

g_p : condutância através das pontoações.

A condutância também pode ser apresentada em termos da permeabilidade longitudinal ao gás, através da equação:

$$g = k_{gl} A/L \quad (\text{B.3})$$

Considerando que A é um termo comum a ambas as partes, ele pode ser simplificado.

Desta forma, pode-se substituir a equação B.3 na B.2 e obter-se:

$$L / k_{gL} = L_{Lt}/k_{Lt} + L_{Lp}/k_{Lp} \quad (\text{B.4})$$

onde: L : comprimento da amostra ($L = L_{Lt} + L_{Lp}$)

L_{Lt} : comprimento total do traqueídeo

L_{Lp} : comprimento total das pontoações

k_{Lt} : permeabilidade superficial ao gás do traqueídeo;

k_{Lp} : permeabilidade superficial ao gás das pontoações.

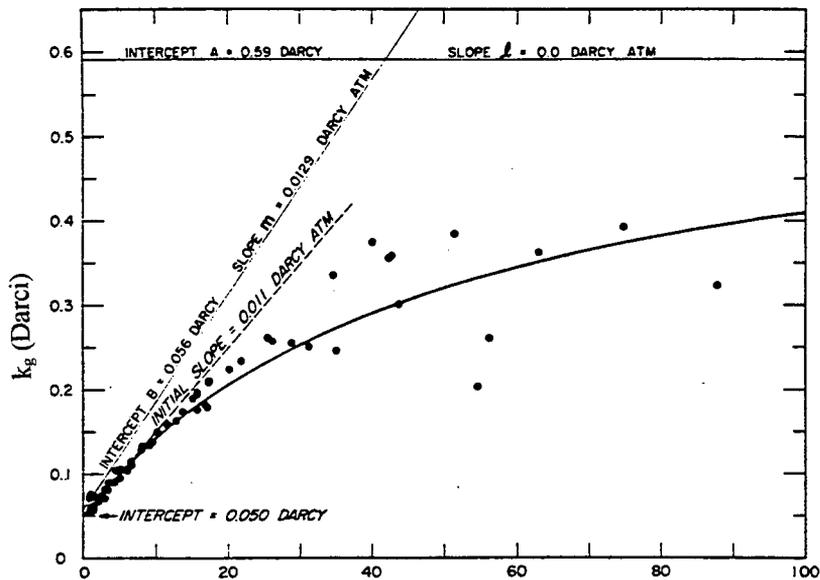


Figura B.1 - Permeabilidade longitudinal em regime estacionário versus pressão média (Siau, 1984).

Uma vez que a membrana da pontuação é muito fina (aproximadamente $0.1 \mu\text{m}$), tem-se que $L_{ip} \ll L_{it}$. Desta forma, pode-se negligenciar L_{ip} e, portanto, o comprimento total da amostra, L , será aproximadamente igual a L_{it} . Levando em conta o exposto anteriormente, pode-se reescrever a equação 4.46:

$$1/k_{gl} = 1/k_{Lt} + L_{ip}/k_{Lp} \cdot L \quad (\text{B.5})$$

O termo (k_{Lt}) da equação anterior é apresentado no modelo de Petty pela expressão $(A + l/P)$ onde A é a intersecção na permeabilidade e l é a inclinação da função $k_{Lt} \times 1/P_m$ de acordo com a equação de Klinkenberg. O termo $(k_{Lp} \cdot L/L_{ip})$ representa a condutância da parte das pontuações e é escrito no formato de $(B + m/P_m)$, onde B é a intersecção na condutância e m é a inclinação da função condutância $\times 1/P_m$. De acordo com o modelo de Petty de duas condutâncias em série, pode ser escrita como:

$$k_{gl} = (A + l/P_m)(B + m/P_m) / [(l + m) / P_m + A + B] \quad (\text{B.6})$$

Os dados experimentais de $k_g \times 1/P_m$ podem ser utilizados para gerar valores para as inclinações e intersecções dos dois componentes. As inclinações e intersecções podem ser utilizadas também para calcular os raios de acordo com que prevêm as equações 4.41a e 4.41b. O fator de correção para capilares curtos pode ser aplicado conforme descrito anteriormente. Petty usou isto para caracterizar a estrutura da madeira da espécie *Picea sitchensis*. Este modelo também possui a versatilidade de permitir a determinação das resistências relativas dos componentes de acordo com o número e o tamanho das aberturas.

Uma relação não-linear entre k_{gl} e $1/P_m$ pode ser causada pelo escoamento não-linear devido a perdas de energia cinética. A causa anterior é facilmente notada pelo aumento na permeabilidade calculada quando a vazão é reduzida a uma dada pressão média. Quando o escoamento é linear e obedece a equação B.1, a permeabilidade é independente da vazão para uma pressão média constante. Além disso, quando a não-linearidade está presente existirá um enorme espalhamento nos dados do gráfico que relaciona k_{gl} e $1/P_m$, a menos que eles tenham todos o mesmo número de Reynolds.

B.3 - Modelo de Comstock

O modelo de Comstock é aplicado normalmente para o estudo do escoamento de fluidos em madeiras moles. Este escoamento através das madeiras moles ocorre em grande parte através dos traqueídeos que estão interconectadas por pares de pontoações areoladas. As aberturas das pontoações possuem um diâmetro muito pequeno quando comparadas ao lúmen e portanto, promovem toda a resistência ao escoamento de fluidos. Desta forma, na madeira é o número e a condição das aberturas das pontoações que determinam a permeabilidade. O modelo proposto por Comstock assume que todas as pontoações estão nas superfícies radiais das extremidades sobrepostas, conforme pode ser visto na figura B.2. O modelo considera ainda que todas as aberturas das pontoações possuem o mesmo tamanho. Pode-se observar nesta figura quatro pontoações abertos para cada traqueídeo que compartilha com outros dois traqueídeos resultando em dois pares de pontoação por traqueídeo. Torna-se claro que as permeabilidades tangencial e longitudinal aumentam com o número relativo de pares de pontoações areoladas em paralelo por unidade de área perpendicular à direção do escoamento e estas permeabilidades diminuem com o número de pontoações em série por unidade de comprimento na direção do escoamento.

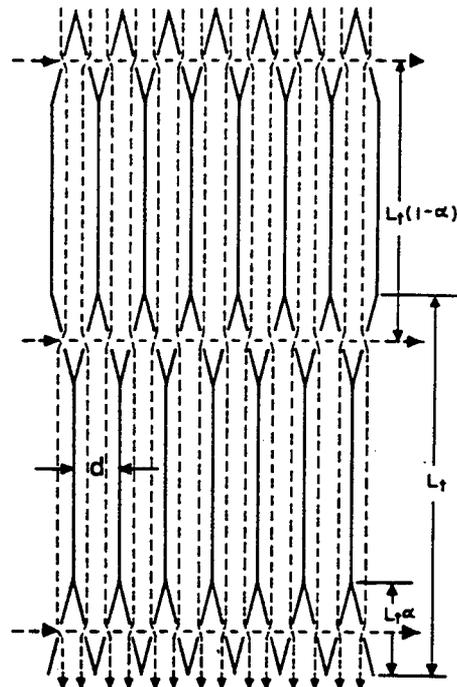


Figura B.2 - Ilustração do modelo de Comstock (1970) para uma conífera. Seção tangencial mostra as pontuações nas superfícies radiais das extremidades sobrepostas dos traqueídeos.

Na direção longitudinal existem dois caminhos paralelos por traqueídeo, ou $2/(2r_t)^2$, ou $1/(2r_t^2)$ por m^2 de área de seção transversal, sendo que r_t representa o raio do traqueídeo. O número de aberturas das pontuações na direção tangencial por cm de comprimento é $1/[L_t (1-\alpha)]$, onde L_t representa o comprimento do traqueídeo e α é a fração da sobreposição. Considerando o exposto acima, tem-se:

$$k_L \propto 1/2r_t^2 / [1/L_t (1-\alpha)] = L_t (1-\alpha) / (2r_t^2) \quad (\text{B.7})$$

Na direção tangencial existe um caminho paralelo por traqueídeo, ou $1/[2r_t L_t (1-\alpha)]$ por cm^2 de área. O número de aberturas de pontoações na direção tangencial por cm de comprimento é $1/r_t$. Desta forma, tem-se:

$$k_T \propto 1 / [2L_t (1-\alpha)] \quad (\text{B.8})$$

Relacionando as expressões para as permeabilidades longitudinal e tangencial, obtém-se:

$$k_L / k_T = L_t^2 (1-\alpha)^2 / r_t^2 \quad (\text{B.9})$$

Considerando como 100 o valor para a razão entre comprimento/diâmetro para os traqueídeos e considerando também $L_t / r_t = 200$. Aplicando estes valores na equação B.9, tem-se a seguinte equação simplificada:

$$k_L / k_T = 40.000 (1-\alpha)^2 \quad (\text{B.10})$$

A equação B.10 mostra que a relação entre as permeabilidades longitudinal e tangencial pode variar entre os valores 10.000 e 40.000 com α variando de 0.5 até zero. Estes valores possuem boa concordância com os resultados experimentais.

É concebível que este modelo possa ser aplicado para madeiras duras cujos vasos estejam fechados por tiloses, desde que o escoamento ocorra entre as fibras das células interconectadas por pontoações. Quando estes vasos estão abertos nas madeiras duras, a relação entre as permeabilidades longitudinal e tangencial assume valores elevados em função da alta condutividade destes vasos.

APÊNDICE C

MODELOS DE DIFUSÃO NA MADEIRA

APÊNDICE C - MODELOS DE DIFUSÃO NA MADEIRA

C.1 - Modelo da Difusão Transversal da Umidade

Os coeficientes de difusão D_v e D_{BT} possuem um comportamento muito dependente da temperatura e do conteúdo de umidade. Para que se possa calcular o coeficiente de difusão transversal da madeira, deve-se considerar a influência da temperatura e do conteúdo de umidade.

Considerando a difusão do vapor d'água, de acordo com Siau (1984), tem-se que a relação dos coeficientes D_v / D_{BT} variando de 20 a 20000. A comparação entre os resultados das duas relações permite simplificações no modelo proposto para o cálculo do coeficiente de difusão transversal.

No modelo proposto para a direção transversal, conforme mostrado na figura 6.4, tem-se que a cavidade celular está localizada em paralelo com as paredes celulares laterais. Neste modelo, a condutância das paredes laterais, g_3 , pode ser desprezada. Como a condutância das paredes laterais foi desprezada, resta considerar as condutâncias das paredes transversais e da cavidade celular. Desta forma, tem-se:

$$\frac{1}{g_T} = \frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_2} \quad (C.1)$$

onde: g_T : condutividade da madeira, W/K;

g_1 : condutividade das paredes transversais, W/K;

g_2 : condutividade das cavidades celulares (lumens), W/K;

Para aplicar este modelo no cálculo da difusão da umidade, torna-se indispensável substituir as condutividades da parede celular (g_1) e da cavidade celular (g_2) pelos coeficientes de difusão D_{BT} e D_v respectivamente. Sendo assim, de acordo com Siau (1984), tem-se a definição das condutâncias:

$$g_T = D_T \quad (C.2)$$

$$g_1 = \frac{D_{BT}}{(1-a)(1-a^2)} \quad (C.3)$$

$$g_2 = \frac{D_v}{(1-a^2)} \quad (C.4)$$

onde a é o conteúdo de ar.

Substituindo as expressões acima na equação (C.1), tem-se para o coeficiente de difusão a seguinte equação, válida para um conteúdo de umidade menor que o ponto de saturação das fibras.

$$D_T = \frac{1}{(1-a^2)} \frac{D_{BT} D_v}{D_{BT} + D_v (1-a)} \quad (C.5)$$

Para os casos em que o conteúdo de umidade da madeira é menor que 15%, a condutância da cavidade celular torna-se muito elevada em relação à condutância da parede transversal. Desta forma, pode-se desprezar a condutância da cavidade celular, sem risco de perder muito em

precisão dos cálculos. Assim, a equação que determina o cálculo do coeficiente de difusão transversal, considerando fluxo uniforme nas paredes transversais é:

$$D_T = \frac{D_{BT}}{(1-a^2)(1-a)} \quad (C.6)$$

C.2 - Modelo da Difusão Longitudinal da Umidade

O modelo para a determinação da difusão longitudinal considerado é o da figura C.1. As extremidades das paredes das células não podem ser eliminadas, uma vez que o coeficiente de difusão longitudinal da parede celular (D_{BL}) é muito menor que o coeficiente de difusão D_v . De acordo com o modelo representado, nota-se que a cavidade celular (lumen) e as paredes celulares laterais estão em paralelo, enquanto que estão em série com as extremidades. Assim:

$$\frac{1}{g_L} = \frac{1}{g_4 + g_6} + \frac{1}{g_5} \quad (C.7)$$

onde: g_L : condutância longitudinal do vapor d'água na madeira, W/K.

A condutância das paredes laterais (g_6) pode ser desprezada, principalmente em baixos conteúdos de umidade, em função da relação entre os coeficientes de difusão do vapor d'água nas cavidades celulares e o longitudinal da parede celular. Desta forma, a equação fica:

$$\frac{1}{g_L} = \frac{1}{g_4} + \frac{1}{g_5} \quad (C.8)$$

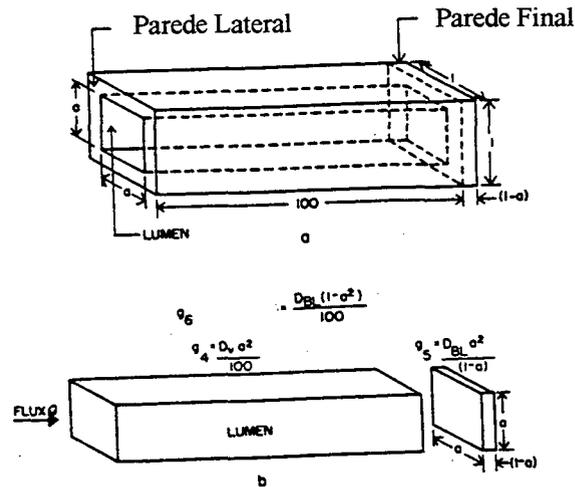


Figura C.1 - Modelo de difusão longitudinal. (a) Geometria celular e (b) elementos significantes do modelo geométrico (Siau, 1984).

De acordo com Siau (1984), o coeficiente de difusão longitudinal, para conteúdos de umidade inferiores a 20%, pode ser expresso por:

$$D_L = \frac{a^2}{(1-a^2)} \frac{D_V D_{BL}}{D_{BL} + 0.01(1-a)D_V} \quad (\text{C.9})$$

Quando o conteúdo de umidade da madeira está maior que 20%, mas ainda menor que o ponto de saturação das fibras, a condutância das paredes laterais (g_6) que foi anteriormente desprezada, deve agora ser considerada na equação. Assim:

$$\frac{1}{D_L} = (1-a^2) \left[\frac{1}{D_V a^2 + D_{BL} (1-a^2)} + \frac{(1-a)}{100 D_{BL} a^2} \right] \quad (\text{C.9})$$

A figura C.2 apresenta o comportamento dos coeficientes de difusão transversal e longitudinal em função da temperatura e do conteúdo de umidade.

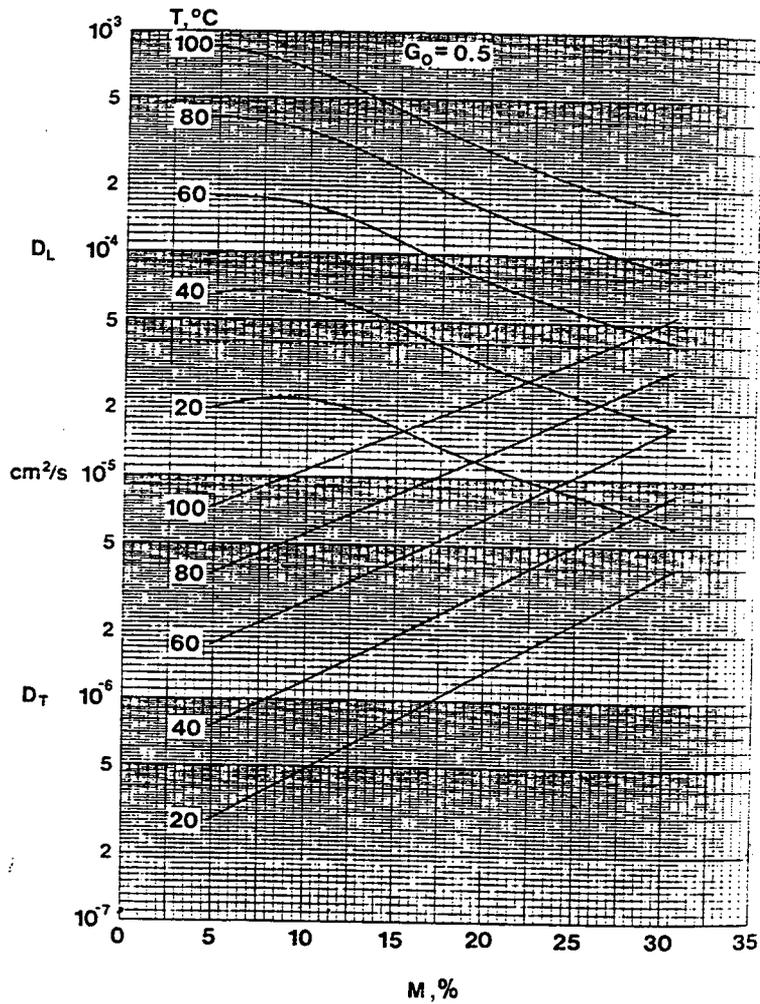


Figura C.2 - Coeficientes de difusão longitudinal e transversal para a madeira com gravidade específica de 0.5 (Siau, 1984).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alexiou, P. N. *Effect of presteaming on drying rate. Wood anatomy and shrinkage of regrowth Eucalyptus pilularis*, Wood Sci. Technol., New York, 1990.

Adzumi, H. *On the flow of gases through a porous wall*, Bull Chem. Soc. Jpn, 1937.

Ananias, R. A. "Efecto del Pretratamiento en Ambiente Saturado sobre el Aliviamento de Tensiones y la Recuperacion del Colapso durante el Secado de Eucalipto", Simposio Los Eucaliptos en el Desarrollo Florestal de Chile, Noviembre, Puncón, Chile, 1982

ASHRAE handbook. Fundamentals, New York, 1977.

Avramidis, S. *Exploratory radio-frequency/vacuum drying*. For Prod J, Madison, 1992.

Avramidis, S. *Radio-frequency/vacuum drying of softwoods*, For Prod J, Madison, 1994.

Banks, W. B. *Some factors affecting the permeability of Scots pine and Norway spruce*, J Inst Wood Sci, 1970

Barnes, H. M. *Treatment of peeler cores with water distersible preservative formulations*, Wood fiber Sci., Madison, 1996.

Boone, R.S. *Dry kiln schedules for commercial wood. Temperate and tropical*, USDA, For Prod J, Madison, 1988.

Bonner, L. D.; Thomas, R. J. *The ultrastructure of intercellular passageways in vessels of yellow poplar*, Wood Sci. Technol, 1972.

Bramhall, G. e Wellwood, R. W. *Kiln drying of western Canadian lumber*, Information Report, Vancouver, 1976.

Brandão, A.T.O.; Jankowsky, I.P. *A screening to select kiln schedules*, IPEF International, Piracicaba, São Paulo, 1992.

Campbell, G. S. *The value of presteaming for drying some collapse susceptible eucalyptus*, For.Prod.J., Madison, 1961.

Carpentes, J. H. *Fundamentals of psychrometrics*, Carrier Corp., Syracuse, 1982.

Castellan, G. W. *Physical chemistry*, Addison-Wesley Reading, 1966.

Chafe, S. C. *Effect of brief presteaming on shrinkage, collapse and other wood-water relationships in Eucalyptus regnans*, Wood Sci. Technol., New York, 1990

Chen, P. Y. S. *The effect of steaming time and temperature on the longitudinal permeability of black walnut heartwood*, Wood Fiber, Laurence, Kans, 1975.

Comstock, G. L. *Moisture diffusion coefficients in wood as calculated from adsorption desorption, and steady-state data*, For Prod J, 1963.

Comstock, G.L. *Physical and structural aspects of the longitudinal permeability of wood*, PhD Thesis SUNY Coll For Syracuse, 1968.

Cutter, B. E.; Phelps, J. E. *High pressure steam drying: Effects on permeability*, For Prod J, Madison, 1986.

Destro, J. G. *Apostila sobre secagem de madeira*, RTD, Senai - Fetep, 1980.

Dushmann, S., *Scientific foundations of vacuum technique*, Willey, New York, 1962

Ellwood, E. L. ; Erikson, R. W. *Effect of presteaming on seasoning stain and drying in redwood*, For Prod J, Madison, 1962.

EDG-Recommendation: *Assessment of Drying Quality of Timber*, Commission of the Euroean Communities, 1994.

Fernandes, P.S.; Galvão, A.P.M. *Gradiente de umidade em peças de jatobá*, Silvicultura em São Paulo, São Paulo, 1978.

Greenhill, W.L. *The shrinkage of Australian timbers*, CSIRO Division of Forest Products, Melbourne, 1935.

Hart, C. A. *Theoretical effect of gross anatomy upon conductivity of wood*, for Prod J, 1964.

Hart, C. A. *Mechanism of bordered pit aspiration as caused by capillarity*, For Prod J, 1966.

Haslett, A. N.; Kininmonth, J. A. *Pretreatments to hasten the drying of Nothofagus fusca*, New Zealand J. Forest Sci, 1986.

Hawley, L. F. *Wood-liquid relations*, US Dep Agr Tech Bull, 1931.

Hildebrand, R. *Kiln drying of saw timber*, Germany, R.H. Mascinenbau Gmbh, 1970.

Howard, E. T.; Manwiller, F. G. *Anatomical characteristics of southern pine stemwood*, Wood Sci, 1969.

Jankowsky, I. P. ; Galvão, A. P. M. *Secagem Racional da Madeira*, Nobel, São Paulo, 1988

Jankowsky, I. P. *Secagem de Madeira de Reflorestamento*, IV SEMADER, ABPM, Curitiba, 1996.

Kanagawa, Y. *Perspectives of the vacuum drying of wood development*, Drying of Wood'93, High Tratas, 1993.

Kininmoth, J. A. *Permeability and fine structure of certain hardwoods and effects on drying*, Holzforchung, Alemanha, 1971.

Kaumann, W. G. *Collapse in some Eucalypts after treatment in inorganic salt solutions*, For Prod J, Madison, 1961.

Knock, H. P. *Tecnologia da Madeira*, Centro de Ciências Biológicas, UFPR, Curitiba, 1978.

Kollmann, F. F. P.; Côté, W. A. *Principles of wood science and technology- solid wood*, New York, Springer, 1968.

MacKay, J.F.G. *Influence of steaming on water vapour diffusion in hardwoods*, Wood Sci, Madison, 1971.

MacLean, J.D. *Thermal conductivity of wood*, US Dep Agr., 1941.

MacLean, J.D. *Preservative treatment of wood by pressure methods*, US Dep Agr., 1952.

Mickelson, R.S. *Laminar, transition and turbulent flow in capillary tubes*, Wayne State Univ., Detroit, 1964.

McMillen, J.M. *Stresses in wood during drying*, For Prod J, Madison, 1963.

Murmanis, L; Chudnoff, M. *Lateral flow in beech an birch as revealed by the electron microscope*, Wood Sci. Technol., 1979.

Muskat, M, *The flow of homogeneous fluids through porous media*, Edwards, Ann Arbor, 1946.

Nock, H. P. *Influência de tratamentos a vapor em algumas propriedades físicas da madeira de imbuia (Ocotea porosa)*, Floresta, Curitiba, 1974.

Panshin, A.J.; Xeeuw, C. *Textbook of wood technology*, McGraw-Hill, New York, 1980

Palin, M.A.; Petty, J.A. *Permeability to water of the cell wall material of spruce hardwood*, Wood Sci Technol, 1981.

Petty, J. A. *Permeability and structure of the wood do Sitka spruce*, Proc R Soc Lond, 1970.

Pratt, G.H. *Timber drying manual*. Department of the Enviroment, London, Building, 1974.

Rasmussen, E.F. *Dry Kiln operator's manual*, USDA, Madison, 1961.

Rasmussen, E.F. *Dry Kiln operator's manual*, USDA, Madison, 1968.

- Rice, R.W. *A survey of firms kiln-drying lumber in United States: volume, species, kiln capacity, equipment and procedures*, Charlotte, 1994
- Richter, H.G. *Anatomia da Madeira*, Livraria Nobel, São Paulo, 1991.
- Siau, J.F. *A geometrical model for thermal conductivity*, Wood Fiber, 1970.
- Siau, J.F. *Flow in Wood*, Syracuse Univ. Press, Syracuse, 1971.
- Siau, J.F.; Petty, J.A. *Corrections for capillaries used in permeability measurements in wood*, Wood Sci Technol, 1979.
- Siau, J.F. *Transport process in wood*, Springer-Verlag, New York, 1984.
- Skaar, C. *Analysis of methods for determining the coefficient of moisture diffusion in wood*, For Prod J, 1954.
- Skaar, C. *Water in wood*, Syracuse Univ. Press, Syracuse, 1972.
- Smith, D.N; Lee, E. *The longitudinal permeability of some hardwoods and softwoods*, Dep Sci Ind Res For Prod Res Special, London, 1958.
- Smith, W. B.; Smith, A. *Radio-frequency vacuum drying of red oak, Profitable Solutions for Quality Drying of Softwoods and Hardwoods*, Charlotte, 1994.
- Spolek, G.S. *A model of simultaneous convective, diffusive and capillary heat and mass transport in drying wood, Phd Thesis*, Washington State University, Pullmann, WA, 1980.
- Stamm, A.J. *The bonding force of cellulosic material for water*, J Phys Chem, 1937.
- Stamm, A.J. *Bound-water diffusion into wood in the fiber direction*, For Prod J, 1959.
- Stamm, A.J.; Nelson, R.M. *Comparison between measured and theoretical drying diffusion coefficients for southern pine*, For Prod J, 1961.
- Stamm, A.J. *Wood and cellulose science*, Ronald New York, 1964.
- Simpson, W.T. *Drying wood - a review part I*, For Prod J, Madison, 1984
- Simpson, W.T. *Dry kiln operator's manual*, Madison, For Prod J, 1991.
- Swigon, J. *Some thermodynamic aspects of wood vacuum drying*, International Conference on Wood Drying, High Tratas, 1993.
- Tomkins, E.E. *Flow measurement utilizing multiple, parallel capillaries*, Instrument Soc Am, Pittsburg, 1974.
- Villiére, A. *Séchage des Bois*, 6.ed. Paris: Dunod, 1966.
- Wallis, N.K. *Australian timber handbook*, Angus & Robertson, Sidney, 1970.

Wardrop, A. B.; Davies, G.W. *Morphological factors relating to the penetration of liquids into wood*, Holzforschung, 1961.

Wheeler, E.A.; Thomas, R.J. *Ultrastructural characteristics of mature wood of southern red oak and white oak*, Wood Fiber, 1981.

Weik, B.B.; Wengert, E.M. *Practical drying techniques for yellow-poplar S-D-R fliches*, For Prod J, Madison, 1984.

Wengert, E.M. *Lumber drying: today and tomorrow*. For Prod J., Madison, 1995.

Wright, G.W. *Brief notes on moisture gradient, drying stress and movement on re-cutting*, Austrália, For Prod J, 1961.