

IVAN TOMASELLI

ASPECTOS FÍSICOS DA SECAGEM DA
MADEIRA DE **Pinus eliottii** Engelm.
ACIMA DE 100° C

Tese apresentada para fins do Concurso Público para preenchimento de cargo de Professor Titular do Departamento de Engenharia e Tecnologia Rurais da Universidade Federal do Paraná.

CURITIBA

1981

AGRADECIMENTOS

A dedicação e o empenho de muitos fez com que este trabalho pudesse ser concretizado.

O autor manifesta seus agradecimentos aos laboratoristas envolvidos nas diferentes etapas da pesquisa: Carlos G. Pessoa Silva, Lúcia Helena M. Lopes e Martinho Spicila.

O material utilizado neste estudo foi cedido pela firma Refloretamento Fraiburgo S.A, que na pessoa do Sr. Willy Frey, não mediu esforços para colaborar. O seu empenho é agradecido.

A contribuição e compreensão de uma grande parte dos colegas de trabalho, dos alunos do Curso de Graduação e Pós-Graduação em Engenharia Florestal, e de várias outras pessoas que, direta ou indiretamente foram envolvidas, é aqui salientada e agradecida.

Dedico este trabalho à minha esposa pela motivação, colaboração e compreensão que foi sempre uma constante.

BIOGRAFIA DO AUTOR

IVAN TOMASELLI, nascido em Joinville, Estado de Santa Catarina, em 12 de julho de 1951.

Concluiu o curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná em 1972. Em 1974 obteve o grau de Mestre em Ciências Florestais pela Universidade Federal do Paraná, tendo sido bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Possui o título de Ph.D. pela Universidade de Melbourne da Austrália, curso este concluído em 1977 com apoio financeiro do CNPq.

Realizou outros cursos de especialização no Brasil e exterior, tendo sido também bolsista do DAAD (Deutscher Akademischer Austauschdienst) - República Federal da Alemanha.

Desde 1977 exerce a função de Professor visitante junto ao Departamento de Engenharia e Tecnologia Rurais da Universidade Federal do Paraná, lecionando no curso de graduação e pós-graduação, e orientando alunos de mestrado.

Exerce ainda, entre outros, cargos de Assessor para Assuntos Internacionais no CNPq, Diretor Executivo da Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná e Coordenador do Projeto Florestal para Mocambique.

CONTEÚDO

	página
Lista de Ilustrações	vii
Lista de Quadros	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 \ Considerações Gerais	3
2.2 \ Aspectos Físicos da Secagem de Madeiras ..	3
2.2.1 \ \ Tipos de água na Madeira	3
2.2.2 Movimento da água em Temperaturas abaixo de 100°C	5
2.2.2.1 Movimento Capilar	5
2.2.2.2 Movimento por Difusão	7
2.2.3 \ \ Movimento da Água acima de 100°C	9
2.2.3.1 \ Primeiro Estágio de Secagem	10
2.2.3.2 \ Segundo Estágio de Secagem	16
2.2.3.3 \ Terceiro Estágio de Secagem	21
2.2.3.4 \ Fluxo Hidrodinâmico	21
2.3. \ Efeitos da Secagem e da Temperatura nas Propriedades da Madeira	25
2.3.1. \ Aspectos Gerais	25
2.3.2. \ Efeito da Temperatura de Secagem nas <u>Pro</u> <u>priedades</u> Mecânicas	26
2.3.3 \ Efeito da Temperatura de Secagem nas <u>Prô</u> <u>priedades</u> Físicas	27
2.3.3.1 \ Efeito no Peso Específico	27
2.3.3.2 \ Efeito no Teor de Umidade de Equilíbrio ..	28
2.3.3.3 \ Efeito na Contração	28

	página
2.3.3.4 \ Efeito nas Características e Propriedades da Superfície	30
2.4 \ Consumo de Energia em Secagem	31
3. MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1 Coleta de Material	34
3.2 Preparo do Material	34
3.2.1 Preparo do Material para Secagem em Estufa de Laboratório	34
3.2.2 Preparo do Material para Secagem em Estufa Piloto	37
3.3 Estudos em Estufa de Laboratório	39
3.3.1 Condições e Equipamento de Secagem Utilizados	39
3.3.2 Determinação da Taxa de Secagem	39
3.3.3 Determinação da Contração	42
3.3.4 Consumo de Energia	44
3.4 Estudo em Estufa Piloto	44
3.4.1 Equipamento Utilizado	44
3.4.2 Condições de Secagem	46
3.4.3 Determinação das Taxas de Secagem e Contração	47
3.4.4 Consumo de Energia	48
3.5 Outras Observações	49
3.5.1 Umidade de Equilíbrio	49
3.5.2 Observações de Defeitos e outras Alterações	49
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1 Secagem em Estufa de Laboratório	50

	página
4.1.1	Taxa de Secagem 50
4.1.1.1	Taxa de Secagem durante o Segundo Estágio 50
4.1.1.2	Taxa de Secagem durante o Segundo Estágio 61
4.1.2	Efeito do Teor de Umidade de Equilíbrio.. 66
4.1.3	Estudos da Contração 75
4.1.3.1	Efeitos na Contração 75
4.1.3.2	Desenvolvimento da Contração 80
4.1.4	Efeitos no Peso Específico Aparente 82
4.1.5	Outras Observações 86
4.2	Secagem em Estufa Piloto 87
4.2.1	Taxa de Secagem 87
4.2.2	Efeito no Teor de Umidade de Equilíbrio,, 90
4.2.3	Efeito na Contração 95
4.2.4	Efeito no Peso Específico Aparente 98
4.2.5	Outras Observações 101
4.3	Consumo de Energia 103
5.	CONCLUSÕES 109
	RESUMO 113
	SUMMARY 115
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 117
	ANEXO 124

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Nº	Página
01 - Esquema simplificado do movimento da água em um capilar	6
02 - Primeiro estágio de secagem - curva típica para corpo de prova de <u>Pinus radiata</u> seco à 180°C	12
03 - Segundo estágio de secagem: curva típica para corpo de prova de <u>Pinus radiata</u> seco à 180°C	18
04 - Fluxo de vapor da água na madeira através do fluxo hidrodinâmico (H) e difusão (D)	23
05 - Comparação da pressão teórica desenvolvida em um recipiente fechado (A) e a pressão desenvolvida na madeira obtida através de dados experimentais	24
06 - Metodologia utilizada para retirar os corpos de prova à serem secos em estufa de laboratório	36
07 - Metodologia adotada para obtenção das amostras à serem secas em estufa piloto	38
08 - Corpo de prova em pesagem contínua para a determinação da taxa de secagem	40
09 - Equipamento utilizado para a determinação das dimensões dos corpos de prova em secagem	43
10 - Esquema simplificado da estufa piloto utilizada neste estudo	45
11 - Curva típica do primeiro estágio de secagem para <u>Pinus elliottii</u> seco à 80°C em estufa de laboratório	51
12 - Curva típica do segundo estágio de secagem para <u>Pinus elliottii</u> seco à 80°C em estufa de laboratório	52

Nº	Página
13 - Relação entre a taxa de secagem durante o primeiro estágio (K_1) e a temperatura (t) para <u>Pinus elliottii</u>	57
14 - Relação entre a taxa de secagem durante o segundo estágio (K_2) e a temperatura de secagem (t) para <u>Pinus elliottii</u>	67
15 - Efeito da temperatura na contração da madeira de <u>Pinus elliottii</u> - razão entre a contração nas diversas temperaturas ($C_{TR} X$) e a contração à 80°C ($C_{TR} 80$)	79
16 - Desenvolvimento da contração em corpos de prova de <u>Pinus elliottii</u> submetidos à secagem em estufa de laboratório à 80°C e 180°C	81
17 - Consumo total de energia para secagem de <u>Pinus elliottii</u> em estufa de laboratório nas diversas temperaturas	106

LISTA DE QUADROS

Nº	página
01 - Taxa de secagem durante o primeiro estágio e teor de umidade inicial para <u>Pinus elliottii</u> (secagem em estufa de laboratório)	54
02 - Taxa de secagem média no primeiro estágio para <u>Pinus elliottii</u> (secagem em estufa de laboratório).....	55
03 - Peso específico aparente seco das amostras de <u>Pinus elliottii</u> utilizados nos estudos de taxa de secagem em estufa de laboratório	60
04 - Taxa de secagem durante o segundo estágio e teor de umidade inicial para <u>Pinus elliottii</u> (secagem em estufa de laboratório)	63
05 - Taxa de secagem média no segundo estágio para <u>Pinus elliottii</u> (secagem em estufa de laboratório).	64
06 - Teor de umidade de equilíbrio para madeira de <u>Pinus elliottii</u> (secagem em estufa de laboratório).....	69
07 - Teor de umidade de equilíbrio - comparação de médias através do teste de Tukey (secagem em estufa piloto)	71
08 - Teor de umidade de equilíbrio - comparação dos valores obtidos para madeira seca à 80°C e os obtidos nas outras temperaturas (secagem em estufa de laboratório)	73
09 - Contração da madeira de <u>Pinus elliottii</u> (secagem em estufa de laboratório)	76
10 - Contração - comparação entre valores obtidos para madeira de <u>Pinus elliottii</u> seca	

Nº	Página
à 80°C e os obtidos nas outras temperaturas (secagem em estufa de laboratório) ...	78
11 - Peso específico aparente - comparação dos valores obtidos para madeira de <u>Pinus eliottii</u> seco à 80°C com os obtidos nas outras temperaturas (secagem em estufa de laboratório)	83
12 - Peso específico aparente - comparação de médias através do teste de Tukey (secagem em estufa de laboratório)	85
13 - Taxa de secagem durante o primeiro estágio e o teor de umidade inicial para <u>Pinus eliottii</u> (secagem em estufa piloto)	88
14 - Teor de umidade de equilíbrio médio para madeira de <u>Pinus eliottii</u> (secagem em estufa piloto)	91
15 - Teor de umidade de equilíbrio - Comparação de médias através do teste de Tukey (secagem em estufa piloto)	93
16 - Teor de umidade de equilíbrio - comparação dos valores obtidos para madeira de <u>Pinus eliottii</u> seca à 80°C com os obtidos nas outras temperaturas (secagem em estufa piloto)	94
17 - Contração da madeira de <u>Pinus eliottii</u> (seca em estufa convencional)	96
18 - Contração - comparação entre valores obtidos para madeira de <u>Pinus eliottii</u> seca à 80°C e obtidos nas outras temperaturas (estufa convencional)	97
19 - Peso específico aparente - comparação de valores obtidos para madeira de <u>Pinus el</u>	

Nº	Página
<u>liottii</u> seco à 80°C com os obtidos nas outras temperaturas (secagem em estufa piloto)	99
20 - Peso específico aparente - comparação das médias através do teste de Tukey (secagem em estufa piloto)	100
21 - Consumo de energia em Kw ^h para corpos de prova de <u>Pinus eliottii</u> submetidos à secagem em estufa de laboratório nas diferentes temperaturas	104
22 - Consumo de energia em Kw ^h para a secagem de madeira de <u>Pinus eliottii</u> em estufa convencional nas diferentes temperaturas .	107

1. INTRODUÇÃO

A secagem da madeira é um processo extremamente importante na sua utilização, e vários desenvolvimentos foram realizados durante as últimas décadas.

Devido a uma série de fatores, principalmente de ordem econômica, a tecnologia mais adotada na atualidade é a da secagem em estufa convencional, utilizando temperaturas em torno de 80°C, dependendo obviamente de uma análise de parâmetros particulares a cada condição.

A secagem à temperaturas acima de 100°C, denominada como secagem à alta temperatura, foi pela primeira vez adotada há mais de um século, mas os maiores impulsos foram dados durante a primeira e a segunda guerras mundiais (Tiemann, 1917; Kollmann, 1961). Nos últimos anos os esforços foram novamente concentrados nesta tecnologia de secagem, visando principalmente a secagem de Pinus spp. (Koch, 1972).

Segundo alguns autores, a secagem à alta temperatura diferencia-se da secagem à temperaturas abaixo de 100°C em alguns aspectos físicos, e vários estudos tem sido conduzidos para serem obtidas informações básicas sobre os fatores que controlam este processo (Hann, 1963). A influência do processo na qualidade e propriedades da madeira é ainda hoje investigada em profundidade, mas as vantagens da secagem à alta temperatura, para determinadas condições, parecem terem sido suficientemente comprovadas (Salamon, 1969).

Para o caso específico do Brasil, a secagem de madeiras à alta temperatura é um processo com perspectivas de ampla utilização, principalmente devido ao fato de, na região sul, os reflorestamentos são quase que exclusivamente à base de espécies do gênero Pinus, e como já mostrado em estudos anteriores, melhoramentos sensíveis na qualidade da madeira juvenil podem ser obtidos (Mackay e Rumball, 1971). Um outro aspecto de alta importância para a situação brasileira, é a possibilidade de que o processo de secagem à alta temperatura seja acompanhado de

uma redução no consumo de energia, como relatado em pesquisas passadas (Koch, 1972).

Neste estudo a madeira de Pinus elliottii foi submetida a secagem em temperaturas variando de 80° à 180°C para estufa de laboratório, tendo sido observado a taxa de secagem, o efeito em algumas propriedades físicas da madeira e o consumo de energia. Paralelamente, foi conduzido um estudo menos detalhado em estufa convencional (piloto) para ser verificada a aplicabilidade dos dados de laboratório em condições industriais.

Além de possibilitar uma nova avaliação dos aspectos físicos que ocorrem e com isto melhor definir, caso exista, o ponto de transição de um princípio físico, para outro princípio que governa o processo, espera-se contribuir para que os dados de laboratório tenham aplicação prática, e não sejam somente considerados como trabalho acadêmico.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Considerações Gerais

A secagem da madeira é uma das medidas mais eficientes de proteção, e diferentes tecnologias de secagem tem sido estudadas há mais de um século (Kollmann e Côtê, 1968). As técnicas de secagem variam desde a simples exposição ao ar livre até a utilização de técnicas mais sofisticadas como a utilização de métodos combinados com alta frequência (Vermaas, 1978).

A maioria dos estudos foi conduzido empiricamente, e formaram uma base sólida de princípios bem fundamentados utilizados ainda hoje como ponto de partida para pesquisas conduzidas nesta área. A complexidade deste assunto, devido a uma interação entre vários fatores e à variabilidade inerente ao próprio material, aliados à importância do processo na utilização da madeira fizeram que em tecnologia da madeira, a área de secagem fosse uma das mais estudadas e apresentada como capítulo importante em praticamente todos os livros textos.

Apesar do acima exposto, existem alguns pontos ainda não claramente definidos em processos de secagem especiais como é o caso da secagem à alta temperatura e a transição entre secagem convencional e à alta temperatura (Tomaselli, 1977). Analisando-se os estudos desenvolvidos, nota-se que existem ainda aspectos interessantes como foi salientado por Hann (1964); por exemplo, a maioria das pesquisas consideram avaliações do movimento da água somente abaixo do ponto de saturação das fibras, ou seja, em forma de vapor.

2.2 - Aspectos Físicos da Secagem de Madeiras

2.2.1 - Tipos de água na madeira

A diferenciação entre os tipos de água existentes na madeira e suas implicações no processo de secagem já é conhecida há bastante tempo (Tiemann, 1917).

A água pode ser encontrada na madeira, na parede ce

lular, como água de impregnação, ou nas cavidades celulares em forma de água líquida ou vapor. Esta água encontrada nas cavidades celulares é muitas vezes chamada de água livre para ser distinguida da água impregnada nas paredes celulares. Deve-se no entanto, levar em consideração que o termo água livre não é estritamente correto, uma vez que a água contida nas cavidades celulares em forma líquida está sujeita à forças capilares (Skaar, 1972).

A água capilar ocorre na madeira, do estado saturado até o ponto de saturação das fibras (considerado em termos práticos como 28% de umidade), enquanto que a água de impregnação ocorre abaixo deste teor de umidade. O limite entre a existência de água livre e capilar não é, no entanto, fixo e o ponto de saturação das fibras varia principalmente com a espécie, teor de extrativos, temperatura, etc. Este ponto é de extrema importância devido a uma série de modificações físicas que ocorrem na madeira e no comportamento físico do próprio processo de secagem (Hann, 1964).

Considerando-se a água existente nos capilares, a água em forma de vapor é a que apresenta o maior potencial de energia enquanto que a água em forma líquida (ainda nos capilares) apresenta uma menor energia potencial. Por sua vez, a água retida nas paredes celulares em forma de solução sólida (adsorvida higroscopicamente) apresenta um nível potencial de energia ainda menor segundo Skaar (1972). A água em forma líquida existente em uma madeira teria um potencial de energia igual à água líquida existente no meio ambiente em condições normais, caso não existisse o efeito da capilaridade, que diminui a sua energia potencial. Já no caso da água absorvida nas paredes celulares, seu estado de energia se aproxima ao da água congelada em ambiente normal, com uma única diferença: no caso do gelo existe uma condição constante enquanto que no caso da madeira, a energia depende da condição de umidade em que a parede celular se encontra. Isto deve-se ao fato de que as ligações água-madeira neste caso são feitas por grupos hidroxílicos (-OH) e com o aumento do teor de umidade e a formação de multicamadas de moléculas da água, aumenta a distância do grupo hidroxílico, aumentando a energia

potencial da molécula mais distanciada.

É evidente, a partir das considerações acima, que a quantidade de energia necessária para ser retirada a água de capilaridade é significativamente menor que a energia necessária para remover-se a água de impregnação (adsorvida à estrutura celular). Este aspecto é a principal diferença existente entre as duas fases da secagem, ou seja, acima e abaixo do ponto de saturação das fibras (Kollmann e Côté, 1968).

2.2.2 - Movimento de água em temperatura abaixo de 100°C

2.2.2.1 - Movimento capilar

O movimento de líquidos acima do ponto de saturação das fibras, é causado por forças capilares, e é regido pela lei de Hagen e Poiseuille (Stamm, 1964). Em um capilar completamente cheio com um determinado líquido, o movimento é produzido pelas diferenças existentes em tensão devido às forças existentes na superfície do menisco dentro do capilar. A força de tensão "T" em um menisco balanceado de um capilar com raio "r", pode ser calculado utilizando-se a equação 1. Desconsidera-se neste caso as diferen

$$T = H \cdot \rho = \frac{2\beta}{r} = 2 \frac{\beta}{r} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Onde:

Equação 1

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

ρ = densidade do líquido (g/cm³)

β = tensão superficial do líquido (g/cm)

A figura 1 mostra um menisco balanceado e um não balanceado. Existe uma diferença em tensão nos dois meniscos, uma vez que a pressão de vapor sob uma superfície esférica é menor que a pressão de vapor em uma superfície plana ou próxima dela, o que é quantitativamente descrito pela equação de Kelvin ou Thompson (Skaar, 1972). Neste caso, existe portanto um movimento na direção do menisco mais côncavo, ou seja o menisco

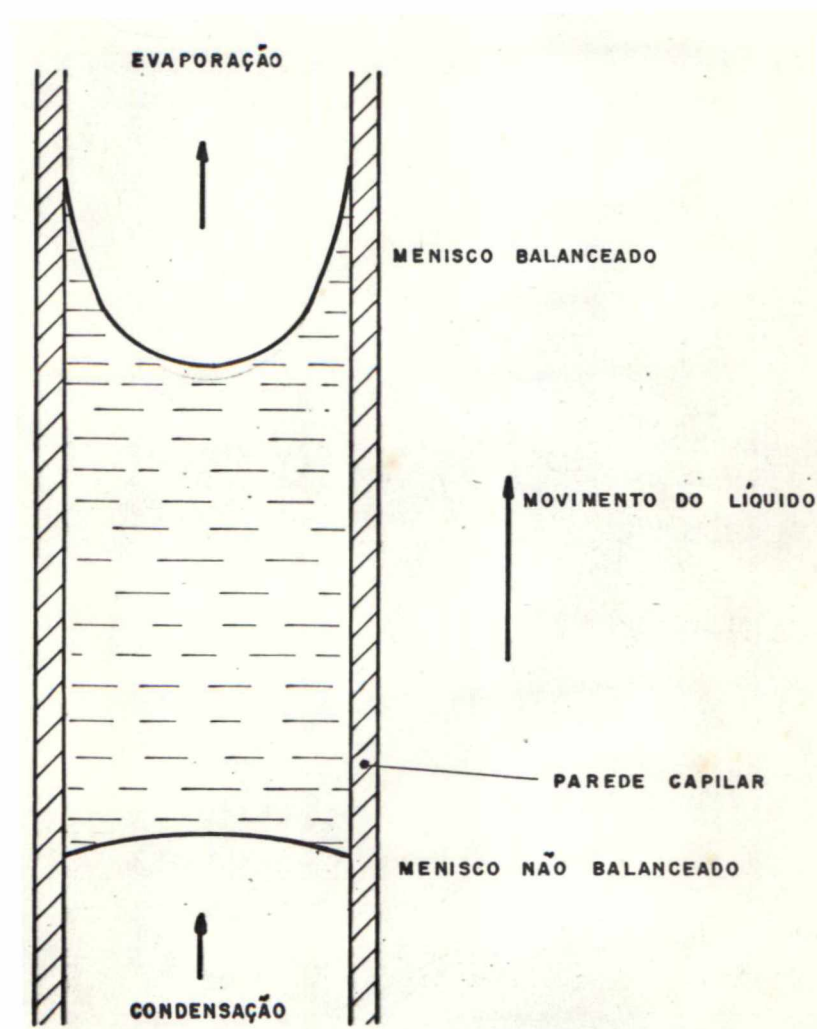


Figura 1 - Esquema simplificado do movimento da água em um capilar (adaptado de Kollmann e Côté. 1968)

superior da figura 1. A pressão de vapor diminui com a diminuição do raio do capilar, e portanto existe neste caso, um aumento da tensão capilar.

Na realidade o movimento de água por capilaridade na madeira é bem mais complexo do que foi esquematicamente mostrado na figura 1. Bolhas de ar existentes no interior da madeira diminuem o fluxo de maneira bastante significativa. Quando uma bolha de ar é forçada a passar por uma pontuação, a interface ar-água desta bolha é obrigada a deformar-se, tomando uma nova forma esférica e, teoricamente, o raio do menisco fica igual ao raio da pontuação. Portanto, existe um aumento significativo na tensão capilar e uma pressão muito maior deve ser exercida para que o movimento do líquido se processe. Isto faz com que o fluxo capilar seja significativamente reduzido (Siau, 1977).

Este aumento significativo da tensão capilar em função da diminuição do raio do menisco quando da passagem de uma bolha de ar em uma pontuação pode também causar o colapso da madeira (Kaumann, 1964). Este fenômeno ocorre desde que a tensão capilar seja maior do que a resistência da madeira à compressão no sentido perpendicular às fibras.

2.2.2.2 - Movimento por difusão

A difusão na madeira é um movimento espontâneo de vapor da água devido a uma diferença na concentração (Stamm, 1962).

O movimento de água em estado constante (steady-state movement), abaixo do ponto de saturação das fibras é governado pela primeira lei de Fick, que tem uma forma matemática análoga às leis de Darcy e Fourier (Siau, 1971). O fluxo é diretamente proporcional ao gradiente de concentração de umidade, e o coeficiente de condutividade para o movimento da água de impregnação é igual ao fluxo dividido pelo gradiente (Equação 2).

$$K_d = \frac{m/tA}{\Delta M/L} = \frac{mL}{t \cdot A \cdot \Delta M} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$$K_d = \frac{m/tA}{\Delta M/L} = \frac{mL}{t \cdot A \cdot \Delta M}$$

K_d = coeficiente de condutividade para difusão do

- vapor da água através da madeira (g/m % s)
- m = massa de vapor da água transportada através do corpo de prova (g)
- L = comprimento do corpo de prova na direção do fluxo (cm)
- t = tempo do fluxo (s)
- A = área transversal do corpo de prova perpendicular à direção do fluxo (cm²)
- ΔM = diferença de umidade entre as superfícies paralelas separadas pela distância L , expressa em porcentagem.

O coeficiente de difusão na madeira pode ser calculado para estado constante utilizando-se a equação 3 derivada, a partir da equação anterior.

$$D_g = \frac{100 K_d}{G \cdot \rho_w} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

- D_g = coeficiente de difusão de vapor da água na madeira (cm²/s)
- G = peso específico da madeira (cm³)
- ρ_w = densidade da água (1 g/cm³)

Na realidade, o fluxo por difusão na madeira é predominantemente considerado como um fluxo em estado não constante (unsteady - state flow). Neste caso o fluxo e o gradiente são variáveis em espaço e tempo, e em qualquer processo que implique em uma mudança na umidade da madeira existem sempre alterações nas condições internas num determinado espaço de tempo.

A equação 4 é conhecida como a segunda lei de Fick, aplicável ao fluxo em estado não constante. Esta equação é derivada assumindo-se que o coeficiente de difusão é constante, o que na realidade não é totalmente correto, pois ele depende da concentração (Comstock, 1963). Esta equação considera um coeficiente de difusão médio.

$$\frac{dM}{dt} = Dg^2 \frac{d^2M}{dx^2} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$$\frac{dM}{dt} = Dg^2 \frac{d^2M}{dx^2}$$

dn/dt - quantidade de umidade removida (M) na ^humidade de tempo (t)

Dg = coeficiente de difusão médio (cm²/s)

d^2M/dx^2 = variação de umidade na distância (x)

Como é sabido o movimento de água na madeira por difusão é bastante complexo, e isto deve-se principalmente a uma interação existente entre o movimento de água por difusão na estrutura aberta (lumens das células) e o movimento da água de impregnação na parede da célula (Stamm, 1962).

Os coeficientes de difusão para madeira podem ser obtidos na prática de três maneiras:

- a) determinação dos gradientes de umidade formados na madeira sob condições controladas;
- b) medição da taxa de passagem da água através da madeira sob um estado constante;
- c) medição da taxa de secagem da madeira sob condição controlada em um estado não constante.

A metodologia mais adotada, e os melhores resultados com boa correlação entre as determinações práticas e os cálculos teóricos, tem sido obtidos utilizando-se a medição da taxa de secagem da madeira sob condições controladas (Stamm e Nelson, 1961).

2.2.3 - Movimento da água acima de 100°C

O comportamento da secagem da madeira quando conduzido em temperaturas acima do ponto de ebulição da água é citado diferenciar-se daquele obtido em secagem convencional descrito anteriormente. Como analisado por Hann (1964, 1965) existe um outro movimento paralelo ao de capilaridade que ocorre na primeira fase da secagem, ou seja, o de expansão de bolhas de ar existentes no interior dos lumens das células criando pressões

interiores e com isto o aparecimento de um fluxo hidrodinâmico.

Este fato não foi inicialmente observado por Tiemann (1917), um dos precursores nos estudos da secagem à alta temperatura, que citou em suas publicações que a temperatura da madeira não aumentava acima de 100°C, durante a fase inicial da secagem à alta temperatura, quando conduzida sob pressão atmosférica. No entanto, estudos conduzidos posteriormente indicaram que a temperatura tende a aumentar acima de 100°C com a existência de água livre na madeira (Fleischer, 1953; Hann, 1965; Hart, 1963; Tomaselli e Grossman, 1980) e portanto alguma pressão interna deve ocorrer. O movimento causado pela expansão das bolhas de ar ou fluxo hidrodinâmico é provavelmente mais importante nas fases iniciais, embora o movimento por capilaridade esteja presente (Hann, 1964). É interessante observar-se que nenhuma citação é feita em literatura sobre limites ou participação de cada um dos tipos de movimento.

Análises conduzidas por alguns pesquisadores (Wiley e Choong, 1975) levaram à conclusão de que o movimento de água livre em temperatura de secagem acima de 100°C é na realidade mais complexo que o simples movimento capilar, e uma série de fatores contribuem nos erros experimentais, dificultando uma comparação entre os dados experimentais e os teóricos.

Segundo vários pesquisadores a secagem à alta temperatura pode ser considerada em três fases distintas: o primeiro estágio onde existe uma linearidade entre a água removida e o tempo, o segundo estágio onde existe linearidade gráfica quando considerada a quantidade de água removida e a raiz quadrada do tempo, e um terceiro estágio que é caracterizado por um novo período onde a taxa de secagem diminui (Fleischer, 1953; Hann, 1964; Kollman e Schneider, 1961).

2.2.3.1 - Primeiro Estágio de Secagem

Quando uma madeira é colocada em secagem à alta temperatura (acima de 100°C), e desde que o teor de umidade inicial esteja acima do ponto de saturação das fibras, o primeiro fenômeno importante é o aquecimento da superfície até 100°C.

Caso certa quantidade de água exista nesta superfície, a temperatura manter-se-á neste nível e o interior do material iniciará o seu aquecimento até atingir 100°C, ou aproximadamente 100°C (Hann, 1965).

Duas observações importantes devem ser aqui apresentadas. A primeira, diz respeito à fase inicial dentro do primeiro estágio de secagem, quando a temperatura da superfície é aumentada até atingir 100°C. Esta fase é chamada de período de ajustamento (Fleischer, 1953), e somente após a sua passagem é que o primeiro estágio de secagem é realmente iniciado e a taxa de secagem será uma função linear do tempo, o que é mostrado na figura 2 para a madeira de Pinus radiata (Tomasselli, 1977). Acredita-se que este fato é devido a secagem ocorrer somente na superfície do material, e que a taxa de secagem é controlada pela quantidade de calor que é transferida à superfície, sendo este o único fator limitante (Fleischer, 1953; Hann, 1964; Kollman e Schneider, 1961, Lowey et al 1968, Lyman, 1963).

Como a secagem ocorre somente na superfície do material, para que haja um prosseguimento no primeiro estágio, é necessário que a água seja transferida do interior para a superfície. Estes movimentos seriam predominantemente o movimento capilar e o movimento induzido pela expansão das bolhas de ar existentes no interior da madeira conforme já discutido anteriormente.

A taxa de secagem durante este estágio pode ser determinada a partir da equação 5, apresentada por Hann (1964), utilizando-se a inclinação da porção linear da curva apresentada na figura 5.

$$K_1 = \frac{dg}{d\theta} \quad \frac{1}{A} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

K_1 = taxa de secagem durante o primeiro estágio
(g/ cm²/min)

dg = peso de água evaporada (g) durante o intervalo de tempo $d\theta$ (min)

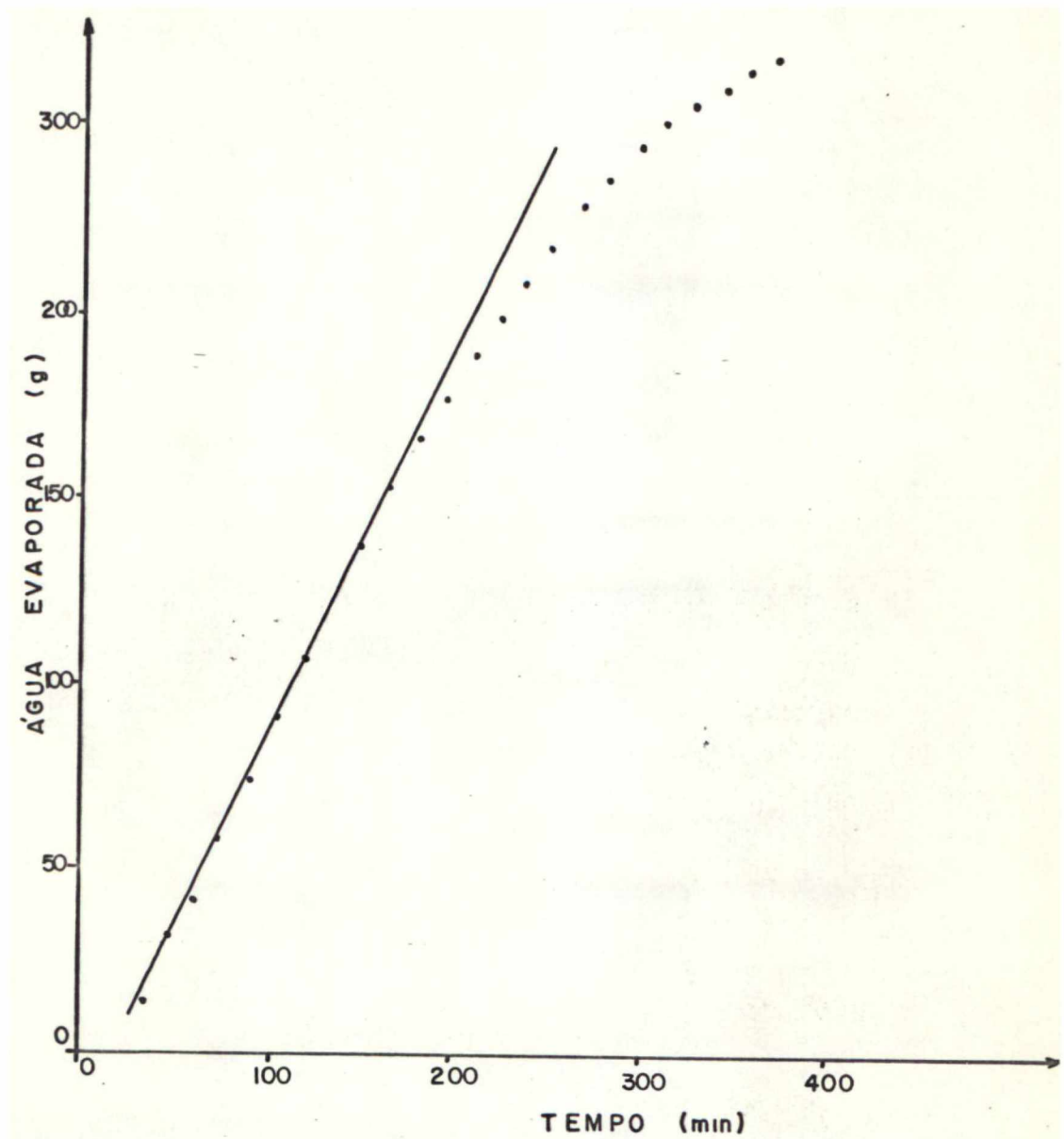


Figura 2 - Primeiro estágio de secagem - curva típica para corpo de prova de Pinus radiata seco à 180°C. (Tomaselli, 1977)

O primeiro estágio de secagem terá uma duração de pendendo da capacidade de transferência de água à superfície, de onde é evaporada. Quando a quantidade de água transferida à superfície for menor que a quantidade de água evaporada na superfície, o primeiro estágio termina, e a temperatura da superfície da madeira sobe significativamente acima de 100°C.

É interessante observar-se que neste ponto não existe água livre na superfície da madeira. Portanto somente a partir deste ponto é que a contração se inicia e com ela o aparecimento de tensões internas causadas por gradientes de umidade (Wright, 1961). Conseqüentemente, como já foi observado em estudos anteriores (Tomagelli, 1977), é interessante que o primeiro estágio seja prolongado o máximo possível.

A transferência de calor pode ser teoricamente realizada de três maneiras: por condução, por convecção e por radiação. Na prática, quando considerando-se secagem de madeiras no primeiro estágio, a transferência de calor por condução é somente de importância significativa quando analisando-se o processo de secagem por prensa (Wang e Beall, 1973; Setterholm, 1979; Chen, 1980).

No caso de secagem em estufas convencionais, o fator mais importante é a transferência de calor por convecção, ou seja, o ar aquecido transfere o calor de uma fonte de energia à superfície da madeira. Se considerarmos experimentos conduzidos em estufas de laboratório sem circulação de ar, ou em equipamentos especialmente desenvolvidos para estudos do movimento da água na madeira (Hann, 1964), a radiação é o principal fator.

O estudo de transferência de calor por convecção, trata na realidade da transferência de calor entre um fluido em movimento e uma superfície sólida (Eastop e Mc Conkey, 1963; Eckert e Drake, 1950). A lei de Newton pode ser aplicada para o cálculo do calor transferido do fluido em movimento para a superfície do sólido (Equação 6).

$$Q = h.A (t_1 - t_2) \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

$$Q = h.A (t_1 - t_2) \quad \text{calor transferido por convecção (cal/min)}$$

h = coeficiente de transferência de calor ($\text{cal}/\text{cm}^2 \text{ h.}^\circ\text{C}$)

A = área (cm^2)

t_1 = temperatura do fluido ($^\circ\text{C}$)

t_2 = temperatura da superfície sólida ($^\circ\text{C}$)

O coeficiente de transferência de calor (h) depende da condutibilidade térmica do fluido e da espessura do fluido estagnante, que forma um filme próximo à superfície (Equação 7).

$$h = \frac{kf}{d} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

h = coeficiente de transferência de calor ($\text{cal}/\text{cm}^2 \text{ h.}^\circ\text{C}$)

kf = condutibilidade térmica do fluido ($\text{cal}/\text{cm. h.}^\circ\text{C}$)

d = espessura do filme estático do fluido (cm)

Analisando-se as equações acima apresentadas na secagem de madeira, em estufas com circulação forçada de ar, a velocidade de secagem dependerá no primeiro estágio da diferença entre a temperatura de superfície e a do ar circulante, da umidade relativa do ar - o ar em condições saturadas apresenta um maior coeficiente de condutibilidade térmica (Maclean, 1952; Salamom, 1969) -, e da velocidade do ar - em velocidades do ar mais elevadas o fluxo passa de laminar a turbulento, diminuindo a espessura do filme estagnante. — //

A transferência de calor por radiação é baseada na emissão de ondas eletro-magnéticas. As ondas são similares a ondas de luz, não exigindo meio de propagação, e a sua propagação é em linha reta, à uma velocidade igual a da luz (Eastop e Mc Conkey, 1963; Roberts, 1940).

Segundo a lei de Stefan e Boltzmann (Equação 8), o poder de emissividade de um corpo é diretamente proporcional à quarta potência da temperatura absoluta.

$$\epsilon = C_r T^4 \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

$$\begin{aligned} \epsilon &= \text{poder de emissividade (k cal/m}^2 \cdot \text{h)} \\ &= \text{emissividade da superfície} \\ C_r &= \text{constante para um corpo negro (4,95 x 10}^{-8} \\ &\text{k cal/m}^2 \text{ h (} \varnothing \text{k) 4)} \\ T &= \text{temperatura absoluta (} \varnothing \text{k)} \end{aligned}$$

O fator ϵ - emissividade da superfície, é a razão existente entre o poder de emissividade de um corpo e o poder de emissividade de um corpo negro e varia de zero (para um reflector perfeito) até 1.0 (para um corpo negro perfeito). Ambos, o reflexor perfeito e o corpo negro perfeito não existem na prática. Um corpo negro perfeito é teoricamente definido como um corpo que absorve toda a radiação que recai sobre sua superfície.

A quantidade de energia emitida para radiação térmica não é a mesma para os vários comprimentos de ondas de radiação. O poder de emissividade aumenta com o aumento da temperatura do corpo, e o comprimento de onda de máximo poder de emissividade diminui com o aumento da temperatura. Portanto, uma maior quantidade de energia emitida é radiada em um menor comprimento de onda com o aumento da temperatura.

Para o cálculo da quantidade de calor transferido por radiação (Q_r) de um corpo a uma temperatura T_1 , para outro corpo a uma temperatura T_2 , pode ser utilizada a Equação 9.

$$Q_r = \epsilon C_r (T_1^4 - T_2^4) \quad \text{Equação 9}$$

A equação acima apresentada leva em consideração que a emissividade de superfície de dois corpos não é significativamente diferente. Caso isto ocorra é interessante utilizar-se a equação 10, que leva em consideração os diferentes coeficientes de emissividade.

$$Q_r = \epsilon_1 C_r T_1^4 - \epsilon_2 C_r T_2^4 \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \text{emissividade da superfície do corpo na temperatura } T_1 \\ \epsilon_2 &= \text{emissividade da superfície do corpo na temperatura } T_2 \end{aligned}$$

Quando considerada a secagem da madeira, um dos

aspectos importantes é a condição da superfície. Quanto mais escura for e quanto mais rugosa ou áspera, maior é a capacidade de absorção e emissão de energia. É importante ser salientado que nenhuma correlação foi observada entre a absorção, a emissividade e a densidade da madeira. Se for considerada a densidade da madeira com superfície com um teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras, a emissividade é aproximadamente igual à da água ($E = 0,93$), sendo que abaixo deste ponto este valor decresce (Kollmann e Côté, 1968).

Na maioria das vezes a transferência de calor está diretamente ligada à transferência de massa. Como já citado, durante o primeiro estágio da secagem à alta temperatura, assume-se que o fator limitante da secagem é a transferência de calor à superfície. Baseando-se no fato de que a transferência de calor e de massa pode ser calculado de uma maneira equivalente, Hann (1963), calculou os coeficientes de transferência de calor a partir da taxa de secagem durante o primeiro estágio. Os resultados obtidos não diferiram significativamente dos obtidos em estudos passados, concluindo o pesquisador que estes resultados confirmam que a transferência de calor à superfície é o principal fator limitante. Hann (1965) também observou que a taxa de secagem durante o primeiro estágio não aumentou de maneira exatamente linear com a temperatura e isto era esperado uma vez que seu experimento, parte do calor transferido à superfície da madeira foi por radiação e a emissividade é proporcional à quarta potência da temperatura.

2.2.3.2 - Segundo Estágio da Secagem

O segundo estágio de secagem inicia quando toda a água livre existente na superfície da madeira é evaporada, e a temperatura na superfície aumenta significativamente acima de 100°C . O término deste estágio coincide com a evaporação completa da água livre existente no interior da madeira e a temperatura no centro sobe acima de 100°C (Hann, 1964).

Este estágio é considerado como extremamente complexo, uma vez que existe uma interação entre o movimento de calor

para o interior da madeira e o fluxo de massa de vapor do interior para a superfície do material. É fácil imaginar que quando o teor de umidade da superfície cai abaixo do ponto de saturação das fibras, a "linha de água livre" que se encontrava no primeiro estágio, na superfície, começa a recuar em direção ao centro. À medida que a madeira tem o seu teor de umidade diminuído, maior será a distância entre a superfície e a "linha de água livre", ou seja a linha onde deverá estar ocorrendo a evaporação. Calor deverá ser transferido da superfície à linha de evaporação, e o fator que controla este estágio é então a transferência de calor da superfície à linha de evaporação, em vez da transferência de calor à superfície (Fleischer, 1953; Hann, 1965; Hart, 1965).

Colocando-se graficamente a quantidade de água perdida versus raiz quadrada do tempo, pode ser observada uma porção linear da curva (figura 3), e isto é realmente esperado no caso do fator limitante ser a condução de calor através da madeira. A constante secagem para o segundo estágio (K_2) é determinada através da inclinação da parte linear da curva apresentada na figura 3, dividindo-se pela área de evaporação (Equação 11). Observe-se que neste caso, incorre-se em um erro, embora pequeno, na determinação de K_2 . A área do corpo de prova varia com a diminuição do teor de umidade, pois durante este estágio inicia-se a contração da madeira.

$$K_2 = \frac{dg}{d\theta^{1/2}} \cdot \frac{1}{A} \quad \text{Equação 11}$$

$$k_2 = \text{taxa de secagem durante o segundo estágio} \\ (\text{g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$$

$$dg/d\theta^{1/2} = \text{inclinação da curva da Figura 3}$$

$$A = \text{área de evaporação (cm}^2\text{)}$$

Embora a maioria dos autores julguem que o único fator que limita a secagem durante o segundo estágio, e a quantidade de calor conduzido pela madeira à linha de evaporação, segundo Hart (1965), existe um fator secundário que deve ser considerado: a transferência de calor para a superfície, pois de qualquer maneira, o calor ainda tem que ser transferido à superfície. Outros autores mencionam ainda a possibilidade de existência de um terceiro fator envolvido - a transferência de massa da superfí

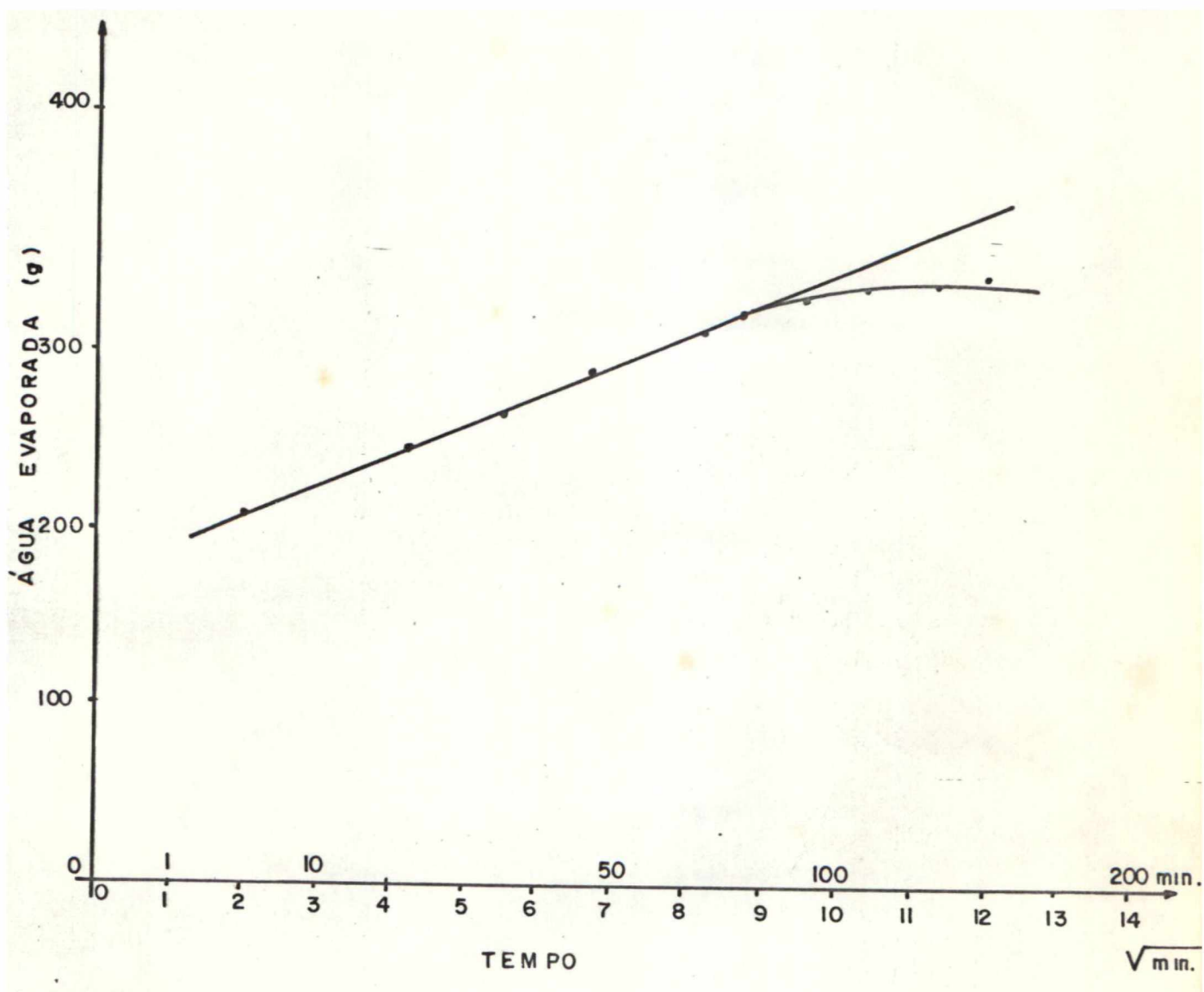


Figura 3 - Segundo estágio de secagem: curva típica para corpo de prova de Pinus radiata seco a 180°C . (Tomaselli, 1977).

cie do corpo de prova para o ambiente, principalmente quando considerada uma estufa sem circulação de ar (Tomaselli, 1977).

Também durante o segundo estágio menciona-se a possibilidade da presença do "fluxo hidrodinâmico", uma vez que a temperaturas elevadas pressões de vapor acima da pressão atmosférica, embora talvez pequenas, estarão presentes.

- Uma melhor análise do "fluxo hidrodinâmico", e a sua incorporação com o movimento de difusão puro, será feito em item apropriado.

Considerando-se que o principal fator que controla o segundo estágio de secagem é o de transferência de calor da superfície ao interior da madeira, torna-se necessário uma melhor avaliação da transferência de calor por condução.

De acordo com as teorias do calor e estrutura da matéria, é aceito que a condução de calor em sólidos amorfos, é um resultado direto da transferência de movimentos atômicos de molécula para molécula nas áreas de contato (Eckert e Drakeyr, 1950). O calor é transmitido de um corpo para outro ou de uma parte de um corpo para outra parte somente se existir uma diferença de temperatura (gradiente de temperatura). A direção do fluxo será sempre da maior para a menor temperatura.

O movimento de calor por condução é descrito pela lei empírica de Fourier. Esta lei afirma que a quantidade de calor que passa através de um sólido homogêneo e diretamente proporcional à área e ao gradiente de temperatura. A expressão matemática da lei de Fourier é apresentada abaixo (Equação 12).

Equação 12

$$Q_c = K_c \cdot A \cdot \frac{dt}{dx}$$

Onde:

Q_c = quantidade de calor transferida por condução na direção "x" (cal/min)

K_i = condutividade térmica do material (cal/cm.h.°C)

A = área (cm²)

dt/dx = mudança de temperatura (t) na distância (x)

A condutividade (K_c) varia dependendo da temperatu

ra e pressão. No caso da madeira, a condutividade é afetada também pela direção do fluxo (radial, tangencial ou longitudinal), densidade e teor de umidade (Kollmann e Côté, 1968). Considerando-se a direção do fluxo, a condutividade ao longo da grã (direção longitudinal) é cerca de 2,20 até 2,7 vezes maior do que perpendicularmente a grã, bem como a condutividade no sentido radial é maior que no sentido tangencial. O efeito do teor de umidade e do peso específico pode ser quantificado utilizando-se a equação apresentada por Siáu (1971) baseado nos estudos anteriores (Equação 13). Esta equação é válida quando considera-se um teor de umidade abaixo de 40%, para a condutividade no sentido perpendicular à grã.

$$K_{ct} = D (4,8 + 0,09 u) + 0,57 \times 10^{-4} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

K_{ct} = condutividade térmica transversal (cal/cm.°C.min)

D = densidade básica (g/cm³)

u = teor de umidade (%)

O efeito da temperatura é também importante no caso da madeira. Com o aumento da temperatura a condutividade térmica da madeira aumenta.

A equação 14, desenvolvida empiricamente pode ser aplicada dentro de uma faixa de temperatura de - 50°C à + 100°C (Kollmann e Côté, 1968). Conhecendo-se a condutividade térmica a uma determinada temperatura e o peso específico seco, pode ser determinado para qualquer temperatura dentro da faixa acima apresentada, o novo valor de condutividade térmica.

$$K_{c2} = K_{c1} \left(1 - (1,1 - 0,98 P) \frac{t_1 - t_2}{100} \right) \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

K_{c2} = condutividade térmica na temperatura t_2

K_{c1} = condutividade térmica na temperatura t_1

P = peso específico seco (0%)

Aparentemente, a suposição de que a única quantidade

de significante de água evaporada ocorre na linha de evaporação, é verdadeira, uma vez que as pesquisas de Hann (1965) mostraram uma alta compatibilidade entre os dados obtidos partindo-se do cálculo da condutividade térmica e outros métodos propostos anteriormente (Macleam, 1945).

2.2.3.3.- Terceiro Estágio de Secagem

O terceiro estágio de secagem não é facilmente distinguível do segundo (Fleischer 1953). Ele inicia quando a última porção de água livre é evaporada e a temperatura no centro do corpo de prova sobe acima de 100°C. A taxa de secagem deixa de ser linear em função da raiz quadrada do tempo, caindo progressivamente. Basicamente este estágio é governado pelas mesmas leis de movimento de vapor do segundo estágio (Hann, 1965), no entanto, à medida que o teor de umidade se aproxima do teor de umidade de equilíbrio com o ambiente, a resistência à evaporação aumenta, diminuindo a taxa de secagem.

A distribuição do teor de umidade passa a ser porabólica e a superfície já no início se encontra em equilíbrio com o ambiente. Assume-se que a taxa de difusão em qualquer um dos pontos é proporcional ao gradiente de umidade, e o principal fator limitante passa a ser o movimento de umidade no interior da madeira.

Considerando-se o ponto de saturação das fibras igual a aproximadamente 20% à uma temperatura de 100°C (Siau, 1971; Skaar, 1972; Stamm, 1962) e considerando-se o gradiente de umidade que é acentuado num processo de secagem à alta temperatura, a madeira estará suficientemente seca para ser utilizada antes do início do terceiro estágio (Hart, 1963) e portanto, o terceiro estágio tem pouca implicação prática.

2.2.3.4 - Fluxo Hidrodinâmico

Como já mencionado anteriormente, a temperatura interna da madeira quando submetida à secagem à alta temperatura, mesmo com a existência de água livre, pode exceder os 100°C

(Hann, 1963, Tomaselli e Grossman, 1980). Neste caso podem ocorrer pressões internas, e o movimento de massa de vapor passa a ser um fluxo sob pressão e não simplesmente um movimento molecular ao acaso, como em difusão de vapor.

As pontuações que são ineficientes ao movimento de vapor por difusão, passam a ser meio de passagem adequada a este novo tipo de fluxo, chamado "fluxo hidrodinâmico" (Hart, 1964, 1965). Segundo Pfallner (1950) fluxo hidrodinâmico é utilizado para descrever o fluxo de um fluido sob pressão enquanto que o termo difusão deveria ser restrito à um movimento de gases de um lado para outro de uma barreira, seja ele real ou imaginária, quando existir um gradiente parcial de pressão de vapor, mas considerando-se que a pressão total nos dois lados da barreira se mantenha constante.

Devido às características de cada um destes fluxos, é esperado que o fluxo hidrodinâmico seja significativamente maior que o fluxo por difusão. Estudos conduzidos no passado (Pfallner, 1950) demonstraram que o fluxo de gases e vapor da água através da madeira é 10 vezes maior para o caso do fluxo hidrodinâmico que para a difusão. É interessante observar ainda que o fluxo por difusão se aproxima de zero à medida que a umidade relativa se aproxima de zero, enquanto que o fluxo hidrodinâmico após passar por um mínimo em uma umidade relativa em torno de 35%, aumenta rapidamente (veja figura 4).

A quantificação da pressão desenvolvida dentro da madeira é, no entanto, difícil. Ela poderia ser avaliada através do aumento de temperatura, no entanto este aumento não é de grande magnitude e a precisão das temperaturas obtidas com termopares, devido principalmente às dificuldades de inserção é questionável (Tomaselli, 1977). Lowery, (1972) utilizando-se de uma metodologia especialmente desenvolvida, mediu as pressões internas desenvolvidas na madeira de Picea engelmannii à temperaturas de 83º, 110º e 138ºC. Este estudo é aparentemente um dos poucos desenvolvidos para quantificar as pressões desenvolvidas, principalmente para que fosse melhor entendida esta força motora citada como a responsável maior pelo movimento de massa do interior para a superfície da madeira. Um gráfico típico obtido no estudo de Lowery é apresentado na Figura 5, e é interessante observar-

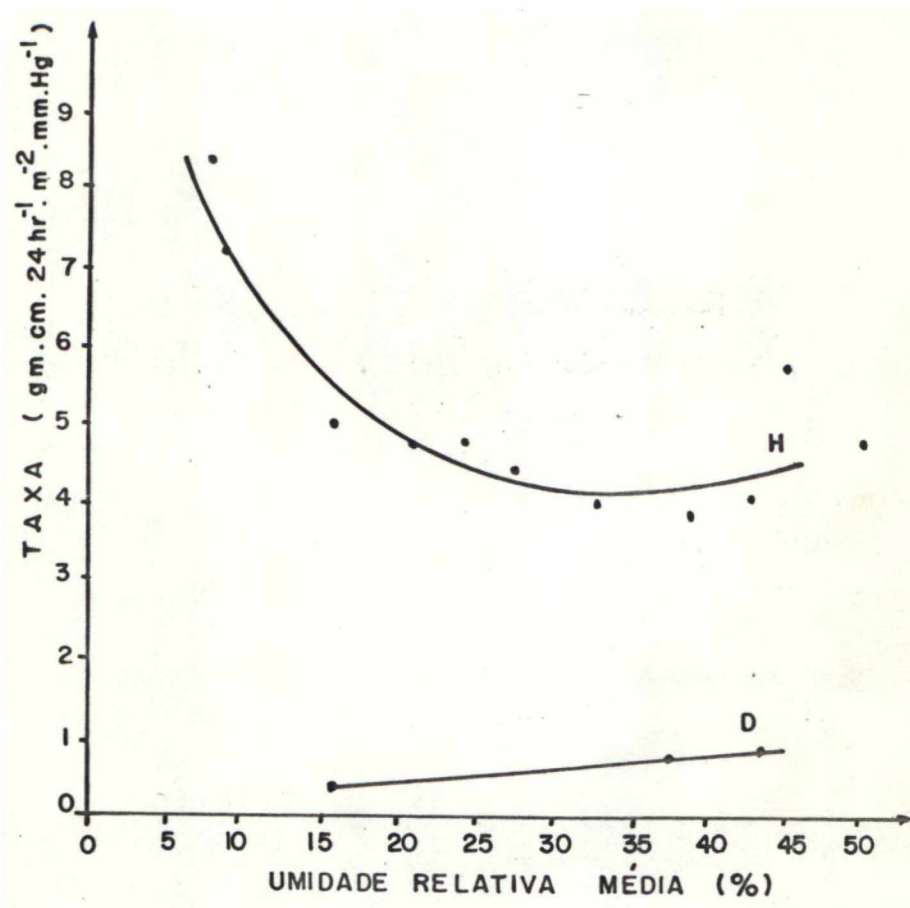


Figura 4 - Fluxo de vapor da água na madeira através do fluxo hidrodinâmico (H) e difusão (D) (segundo Pfalzner, 1950)

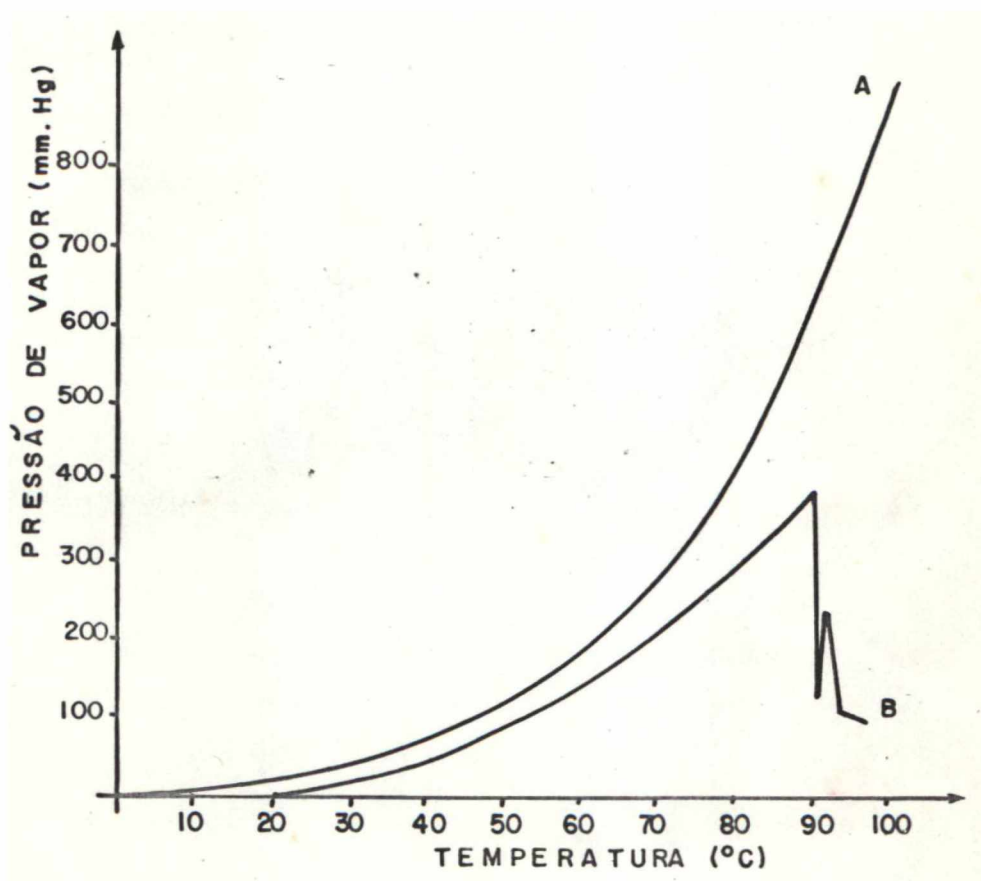


Figura 5 - Comparação da pressão teórica desenvolvida em um recipiente fechado (A) e a pressão desenvolvida na madeira obtida através de dados experimentais (B) (segundo Lowery, 1972).

se que pressões significantes desenvolvem-se mesmo à temperatura no nível 40 à 50°C.

2.3 - Efeitos da Secagem e da Temperatura nas Propriedades da Madeira

2.3.1 - Aspectos Gerais

Com a aplicação da secagem, ocorrem, dependendo principalmente da temperatura e métodos utilizados, modificações nas propriedades da madeira (Kollmann e Côté, 1968). A maioria das modificações nas propriedades da madeira ocorrem somente com a retirada da água de impregnação, ou seja, a secagem abaixo do ponto de saturação das fibras. Com a diminuição do teor de umidade abaixo deste ponto, dois aspectos de extrema importância são observados: o aparecimento da contração e o aumento da maioria das propriedades de resistência mecânica da madeira.

Os principais efeitos da secagem nas propriedades e características da madeira podem ser assim sumarizados (Brown e Bethel, 1965):

- a) - diminuição das suas dimensões, principalmente no sentido radial e tangencial, devido à retirada da água absorvida na sua estrutura;
- b) - aumento da maioria das propriedades de resistência da madeira;
- c) - aumento da resistência ao ataque de fungos e insetos;
- d) - diminuição de peso, e conseqüentemente, maior facilidade no manuseio e transporte do material;
- e) - melhoria de suas propriedades de trabalhabilidade, tais como lixamento, usinagem, colagem, aplicação de acabamento, etc.;
- f) - dentro de certos limites, e principalmente considerando-se a secagem artificial, pode ser citado que a madeira aumenta sua estabilidade dimensional.

O efeito do método de secagem nas propriedades e principalmente o efeito da temperatura tem sido de grande interesse nos últimos anos, principalmente com o desenvolvimento da secagem de madeira a alta temperatura (acima de 100°C). Os estudos conduzidos tem se dedicado principalmente a avaliar o efeito nas propriedades mecânicas (flexão estática, compressão, cisalhamento, etc.) e nas propriedades físicas (peso específico aparente, estabilidade dimensional, teor de umidade de equilíbrio, etc).

Uma revisão bastante detalhada dos trabalhos desenvolvidos nesta área foi feito por Salamon (1969).

2.3.2 - Efeito da Temperatura de Secagem nas propriedades Mecânicas

Apesar deste tópico não estar diretamente ligado à pesquisa aqui apresentada, alguns pontos de importância devem ser levantados, a fim de que se possa realizar uma análise global do problema.

Analisando-se a literatura sobre o efeito de secagem à temperaturas elevadas, resultados contraditórios são encontrados, e uma conclusão desta análise é bastante difícil (Mackay, 1976; Huber, 1976; Tomáselli, 1977). Esta variabilidade nos resultados é principalmente devida ao fato de que existem diferenças fundamentais no procedimento experimental.

Muitos experimentos foram dirigidos ao desenvolvimento de programas de secagem, e como avaliação paralela e secundária foi determinado o efeito do programa utilizado nas propriedades da madeira.

Um dos aspectos onde há concordância entre os autores é que a redução nas propriedades mecânicas é muito mais acentuada quando a secagem é conduzida em ambiente com alta umidade relativa do que em ambientes de baixa umidade relativa (Davis e Thompson, 1964; Lantican, 1959; Maclean, 1945, 1953; Salamon, 1969; Stamm, 1956). Isto deve-se provavelmente ao fato de que altas umidades relativas a degradação térmica predominante é por

hidrólise e a taxa de degradação por hidrólise é acentuadamente maior do que por pirólise (Skaar, 1976).

Um estudo conduzido em Pinus radiata, comparando as propriedades da madeira seca à 70°C com a madeira seca à 140°C e 180°C (Tomaselli, 1977), mostrou que em geral, as propriedades mecânicas da madeira não são afetadas pela temperatura de secagem dentro dos níveis estudados, desde que uma velocidade de ar apropriada seja utilizada, e que a madeira não seja seca a teores de umidade extremamente baixos. Estas conclusões foram tiradas em função de resultados experimentais e análises de distribuição da temperatura interna da madeira. Além da temperatura de secagem o teor de umidade e a velocidade do ar, exercem efeito fundamental a temperatura interna da madeira e o tempo que a madeira está sujeita a uma determinada temperatura.

2.3.3 - Efeito da Temperatura de Secagem nas Propriedades Físicas

2.3.3.1 - Efeito no peso específico

O peso específico não é normalmente afetado pela temperatura da secagem (Koch e Wellfort, 1977 b; Leont'ev et al, 1958; Tomaselli, 1977). Este fato pode ser encarado como contradição uma vez que com a aplicação de temperaturas elevadas ocorre uma diminuição de peso da madeira (Skaar, 1976). Isto se deve provavelmente ao fato de que a contração da madeira aumenta com o aumento da temperatura de secagem, como vai ser discutido posteriormente.

Algumas pesquisas tem demonstrado que o peso específico da madeira aumenta com o aumento da temperatura de secagem (Comben, 1955; Ladell, 1957). Isto é esperado caso o tratamento não induza nenhuma perda de peso e o aumento da contração faça, portanto, com que haja uma capactação da madeira. Esta capactação pode ser a responsável pelo aumento de algumas propriedades mecânicas de madeira submetida à temperaturas elevadas.

2.3.3.2 - Efeito no Teor de Umidade de Equilíbrio

À medida que se aumenta a temperatura de secagem, diminui-se a higroscopicidade da madeira (Kininmonth, 1976). Comparando-se a madeira de Pinus radiata seca a 180°C com madeira seca a 70°C, reduções maiores do que 20% podem ser esperadas.

A redução de higroscopicidade causada pela temperatura é provavelmente resultante de pequenas modificações químicas, em especial a degradação parcial das hemiceluloses (Stamm, 1964). Esta redução depende além da temperatura, do tempo que um determinado corpo de prova é submetido ao tratamento (Espeneas, 1971; Kininmonth, 1976; Kozlik, 1973; Stamm et al 1953).

A grande importância da redução de higroscopicidade é relacionada ao fato de que existe paralelamente um aumento na estabilidade dimensional. A estabilidade dimensional de uma madeira pode ser obtida através de vários tipos de tratamentos químicos (Choong e Barns, 1969), no entanto, a viabilidade econômica é sempre discutível. A aplicação de temperaturas elevadas não é o método mais eficiente, no entanto, qualquer melhoramento que se venha obter neste sentido é sempre desejável.

A menor umidade de equilíbrio para as madeiras secas à temperaturas mais elevadas também afeta os estudos do efeito da temperatura nas propriedades mecânicas da madeira. Madeiras secas à temperaturas elevadas apresentam menor umidade de equilíbrio, e este fato juntamente com a compactação do material (veja item anterior) podem fazer com que a resistência da madeira seca à temperaturas elevadas, dentro de determinados limites, seja maior do que a seca em baixas temperaturas. Skaar (1976) cita que cuidados devem ser tomados com relação a ser especificado se a comparação é feita ao mesmo teor de umidade, ou se esta comparação é feita com madeiras acondicionadas em um mesmo ambiente. Na realidade, a segunda opção se aproxima mais do caso prático.

2.3.3.3 - Efeito na Contração

De uma maneira geral, a contração da madeira aumenta com a temperatura de secagem (Hartley, 1973). Existem várias explicações sobre a causa do aumento da contração com a tempera

tura. Uma das razões associadas poderia ser a diminuição do teor de umidade de equilíbrio, o que foi discutido no item anterior. Este fator no entanto, causaria um aumento de contração menor do que 1%, e na realidade, o aumento de contração é bastante maior do que este valor (Tomaselli, 1977).

Devem, portanto, existir outros fatores que contri
buem, entre eles sugere-se:

- 1 - presença de colapso da parede celular, causado por forças capilares que excedem a resistência à compressão da madeira no sentido perpendicular às fibras (Santini e Tomaselli, 1980). Este fato leva a crer que o movimento capilar também contribui significativamente para movimento da água acima do ponto de saturação das fibras (Tomaselli, 1977).
- 2 - Outro aspecto a ser considerado é a possibilidade de que parte da contração seja na realidade uma compressão residual (compression set), resultante das tensões desenvolvidas durante a secagem (Cech, 1964).
- 3 - Pode ser ainda considerado que a contração seja também acentuada pela degradação térmica parcial do material (Wise e Jahn, 1952).

Um dos aspectos importantes, observados por vários pesquisadores (Hann, 1965; Tomaselli, 1977; Santini, 1980), é que a contração da madeira deixa de observar as regras normais de anisotropia quando a temperatura aumenta. Como é sabido, a contração tangencial é sempre maior que a radial. Com o aumento da temperatura, no entanto, esta regra não é observada e a contração em espessura é sempre maior do que em largura, independentemente da orientação (radial ou tangencial). Este fenômeno foi explicado por Hann (1965), e a sua teoria baseia-se no fato de que as células da superfície de um corpo de prova em secagem são restringidas a contrair em largura pelas células do interior (que estão com um teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras), enquanto que a contração em espessura se processa livremente.

2.3.3.4 - Efeito nas Características e Propriedades da Superfície da Madeira

De uma maneira geral é aceito que o aumento da temperatura acima de determinados níveis produz um escurecimento da superfície da madeira (Tiemann, 1977; Keylwert e Kuebler, 1954; Danvis e Thompson, 1964). Este escurecimento aumenta significativamente com a temperatura e tempo de exposição (Hann, 1965), e é possivelmente causado por extrativos que por sua natureza são escuros e são trazidos à superfície pelo movimento capilar, bem como por material protoplasmático que é trazido e degradado na superfície. É também citado que a mudança de cor pode ser também relacionada ao grau de polimerização e cristalinidade da celulose e grupos hidrossílicos na superfície da madeira (Hillis, 1975).

Apesar da mudança de cor ser a priori considerada como desvantagem (Lowery et al., 1968), na maioria dos casos de aplicação prática, não traz nenhum inconveniente uma vez que devido a pequena profundidade de penetração, a parte escurecida é completamente removida no aplainamento (Koch, 1973; Willington, 1973; Tomăselli, 1977).

Além do escurecimento da superfície, a exudação de resina que afeta a aparência da superfície também aumenta com a temperatura. Como no caso anterior existe concordância de que este problema desaparece completamente com o aplainamento da madeira (Cech e Huffman, 1971; Koch, 1973).

Um dos aspectos que tem merecido bastante atenção é o efeito da temperatura nas propriedades de colagem da superfície. Alguns autores citam que a secagem da madeira à alta temperatura não afeta a colagem (Fricke, 1975; Lowery et al., 1968), enquanto outros mencionam a possibilidade de mudanças que resultariam em uma superfície inativa com perda de resistência na colagem com resinas fenólicas (Hillis, 1975). Um trabalho conduzido por Suchsland e Stevens (1968) demonstrou que lâminas de Pinus podem ser secas à temperaturas de até 280°C, desde que seja tomado o cuidado de que o processo de secagem seja interrompido antes de que a superfície atinja a temperatura do ambiente.

2.4 - Consumo de Energia em Secagem

O consumo de energia é na realidade somente uma parcela do custo total da secagem. Em um levantamento realizado em 1974, sobre as condições da secagem artificial da madeira serrada para o Sul do Brasil (Tomaselli, 1974), a participação da energia no custo total de secagem era menor que 20%. Os dados foram levantados em estuda convencional, com aquecimento por serpentinhas de vapor, sendo que o combustível utilizado na caldeira eram resíduos de serraria.

Apesar de não existirem dados atuais, acredita-se que este percentual é hoje bem mais elevado. A crise de energia é posterior à data de realização do estudo acima citado, e os resíduos de serraria que naquela época tinham valor próximo a zero. Hoje tem um excelente mercado, com a procura maior que a oferta. Por outro lado, o preço de energia elétrica, utilizada para movimentar os ventiladores, também sofre um acréscimo acima da inflação.

As fontes de energia para a utilização em estufas de secagem de madeira são principalmente o gás natural, o óleo combustível, a eletricidade, carvão, lenha e resíduos de serraria (Henderson, 1936). A escolha do tipo de energia a ser utilizado depende principalmente do custo do processo empregado e do tipo de material em produção. Como regra geral pode ser citado que a fonte de energia mais empregada e mais econômica, devido à característica da indústria em questão, são os resíduos (Koch, 1972). Estes resíduos são utilizados para aquecer uma caldeira e produzir vapor, que fornecerá o calor necessário ao aquecimento da estufa. A circulação do ar é feita quase que exclusivamente com ventiladores acionados por motores elétricos.

O consumo de energia na secagem, além de poder ser dividido em dois grandes grupos (aquecimento e circulação do ar) pode ser separado em diferentes áreas mais específicas. Os principais pontos de consumo de energia podem ser assim relacionados (Fricke, 1976):

- a) aquecimento do ar existente no interior da estuda

- fa, da temperatura ambiente até a temperatura de secagem desejada;
- b) aquecimento da estrutura da estufa, incluindo paredes, portas e partes metálicas do interior;
 - c) aquecimento da pilha de madeira que foi colocada para secagem;
 - d) aquecimento do ar que é introduzido na estufa a fim de que se mantenha a umidade relativa dentro dos níveis estipulados pelo programa de secagem;
 - e) reposição da energia gasta na evaporação da água existente na madeira;
 - f) reposição da energia perdida através das paredes e portas da estufa.

Como pode ser observado, os três primeiros itens apresentados referem-se quase essencialmente à fase de aquecimento inicial da estufa, e é justamente nesta fase que o maior consumo de energia existe (Bateson, 1952).

A preocupação com o custo de energia foi um dos fatores que levou os pesquisadores a intensificar os estudos em várias áreas, como na utilização da energia solar (Sharma e Nath, 1972; Chen, 1979; Lumley e Choong, 1979; Tschernitz e Simpson, 1979). Os experimentos tem mostrado resultados animadores e a estufa solar é economicamente vantajosa (Lumley e Choong, 1979). Além do pequeno investimento, o custo de manutenção é baixo e a energia é somente gasta para a movimentação do ar.

Outros estudos dirigidos a comparação do consumo de energia tem sido também alvo de interesse recentemente. Cech e Pfaff (1978) compararam o custo de Acer saccharum utilizando dois métodos de secagem: convencional e por desumidificação. Os resultados mostraram que para as condições do estudo o consumo de energia foi de 44 à 53% menor em secagem por desumidificação. Os desumidificadores são equipamentos que trabalham a baixa temperatura e baixa umidade relativa.

A combinação de sistemas, como secagem inicial à al

ta temperatura e uma segunda fase, quando a madeira atinge teores de umidade menores, com secagem em temperaturas convencionais, também tem sido tentada como método de economia do consumo de energia, tendo-se conseguido reduções significantes (Rosen, 1980). Paralelamente os estudos tem também sido dirigidos à recuperação de energia em estufas, o que é defendido como um grande potencial na redução do consumo de energia na secagem de madeiras (Rosen, 1979, 1980).

A secagem à alta temperatura tem sido citada como um processo de secagem onde o consumo de energia é significativamente menor do que em secagem convencional (Koch, 1972; Tomasel li, 1976). O consumo de energia em secagem à alta temperatura é maior quando considerado um determinado intervalo de tempo, no entanto como a duração da secagem é significativamente menor, o consumo total do processo é cerca da metade daquele em secagem convencional.

Um estudo conduzido por Koch (1977) com madeira de Pinus sp mostrou que o consumo de energia, considerando-se energia necessária para o aquecimento, controle de umidade e ventilação, foi em torno de 600 Kwh para a secagem à alta temperatura, comparado à 1 200 Kwh para temperatura convencional. Koch salienta que evidentemente os resultados de seu estudo não podem ser diretamente transferidos à prática, mas estudos conduzidos por outros pesquisadores (Keylwert, 1952) tem chegado a resultados semelhantes. Os experimentos de Keylwert mostraram que o consumo de energia para a secagem à alta temperatura foi entre 1,2 e 1,5 Kwh por quilograma de água evaporada, contra 2 à 4 Kwh por quilograma de água evaporada em secagem convencional.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 - Coleta de Material

O material utilizado neste estudo foi obtido em serraria localizada em Friburgo, Santa Catarina. O lote de madeira selecionado era representativo do primeiro desbaste de um povoamento de Pinus elliottii com idade de 9 anos.

Aproximadamente um metro cúbico de tábuas com espessura aproximada de 25 mm e larguras variando, em função do diâmetro das toras, entre 80 a 170 mm, foram transportadas para o laboratório de tecnologia da madeira, da Universidade Federal do Paraná. O comprimento das tábuas variou entre 1,40 e 2,50 metros.

3.2 - Preparo do Material

No laboratório, o material foi dividido em dois lotes distintos: um (lote) destinado aos estudos em estufa de laboratório de pequeno porte, e o outro, destinado aos estudos em estufa piloto de secagem.

3.2.1 - Preparo do Material para Secagem em Estufas de Laboratório

O material destinado aos estudos em estufa de laboratório, definido como lote 1, foi rigorosamente selecionado, utilizando-se os seguintes critérios:

- a) as tábuas deveriam ser bem orientadas, quer fosse esta orientação tangencial ou radial;
- b) os anéis de crescimento deveriam ser necessariamente paralelos ao comprimento da tábua;
- c) tábuas com defeitos tais como nós, grã reversa, ou outro tipo de anomalia foram eliminadas;
- d) o número de tábuas orientadas radialmente devia ser o mesmo que o número de tábuas orientadas tangencialmente.

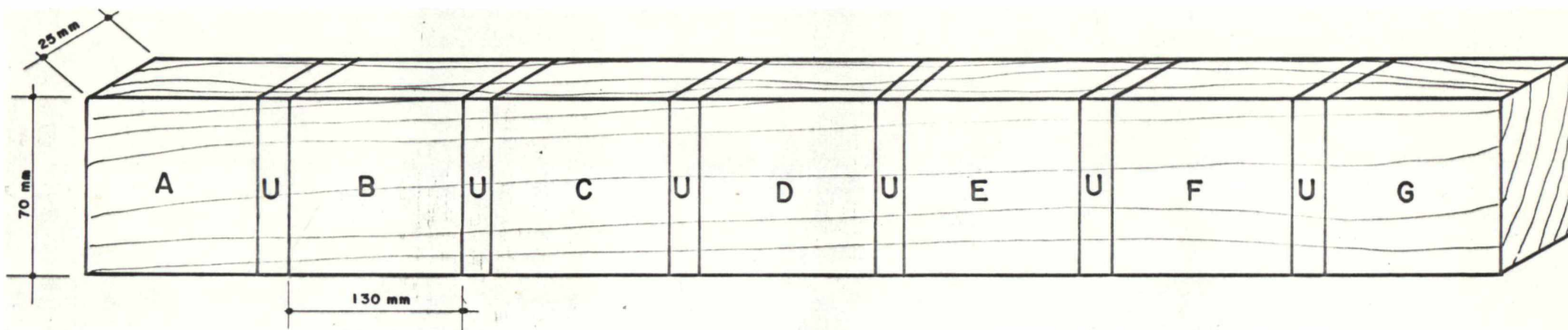
Entende-se aqui como orientação tangencial, tábuas com os anéis de crescimento paralelos à largura da tábua ("flat-sawn") e como orientação radial as tábuas com anéis de crescimento paralelos à espessura da mesma ("back-sawn").

O lote 1 foi formado por 12 tábuas sendo que de 6 destas foram obtidos corpos de prova para os estudos de taxa de secagem e 6 para os estudos de contração. Para os corpos de prova utilizados para os estudos de taxa de secagem as dimensões adotadas foram 130mm X 70mm X 25mm. De cada uma das 6 tábuas selecionadas foram retirados 7 corpos de prova, os quais foram codificados de A a G, tendo entre eles pequenas amostras para a determinação do teor de umidade (Veja figura 6).

Cada um dos 7 corpos de prova foi submetido à secagem em determinada temperatura, ou seja, tratamento. Utilizou-se este critério rigoroso na obtenção dos corpos de prova justamente para que o material apresentasse características exatamente similares e que a única diferença no comportamento físico dos corpos de prova fosse relacionada ao tipo de tratamento utilizado. Considera-se esta metodologia como a técnica de corpos de prova "combinados", já utilizada em pesquisas anteriores (Tomaselli, 1977), para a avaliação do efeito da temperatura de secagem nas propriedades físicas e mecânicas da madeira.

Os corpos de prova destinados ao estudo do comportamento da contração nas diferentes temperaturas, foram também obtidos de maneira a serem "combinados", como mostra a figura 6, excluindo-se neste caso as amostras para a determinação do teor de umidade.

A seleção do tamanho dos corpos de prova para os estudos na estufa de laboratório foi feita levando-se em consideração que deveriam, pelo menos em parte, ter dimensões aproximadas às do material que seria secado na estufa piloto. Manteve-se a espessura original (25 mm) e para melhor representar o comprimento real, efetuou-se a selagem dos topos. Baseando-se em estudos passados conduzidos pelo autor e experimentos preliminares, foram testados alguns produtos incluindo, principalmente tintas existentes no mercado e resinas fenólicas. O melhor resultado, como era esperado, foi obtido com a utilização de adesivo



**Figura 6 - Metodologia utilizada para retirar os corpos de prova
à serem secos em estufa de laboratório (A à G)
U - amostra para determinação do teor de umidade.**

de contacto e papel alumínio. Este tipo de selagem do topo reúne as características desejáveis, ou seja:

- a) pode ser aplicada em madeira verde;
- b) é pouco afetado pela temperatura, pelo menos nos níveis utilizados para a secagem de madeiras;
- c) é flexível, "acompanhando" os movimentos (contrações, rachaduras, etc) durante o processo de secagem;
- d) mesmo que hajam pressões extremas que venham romper a linha de cola, o papel alumínio impede qualquer escape de vapor.

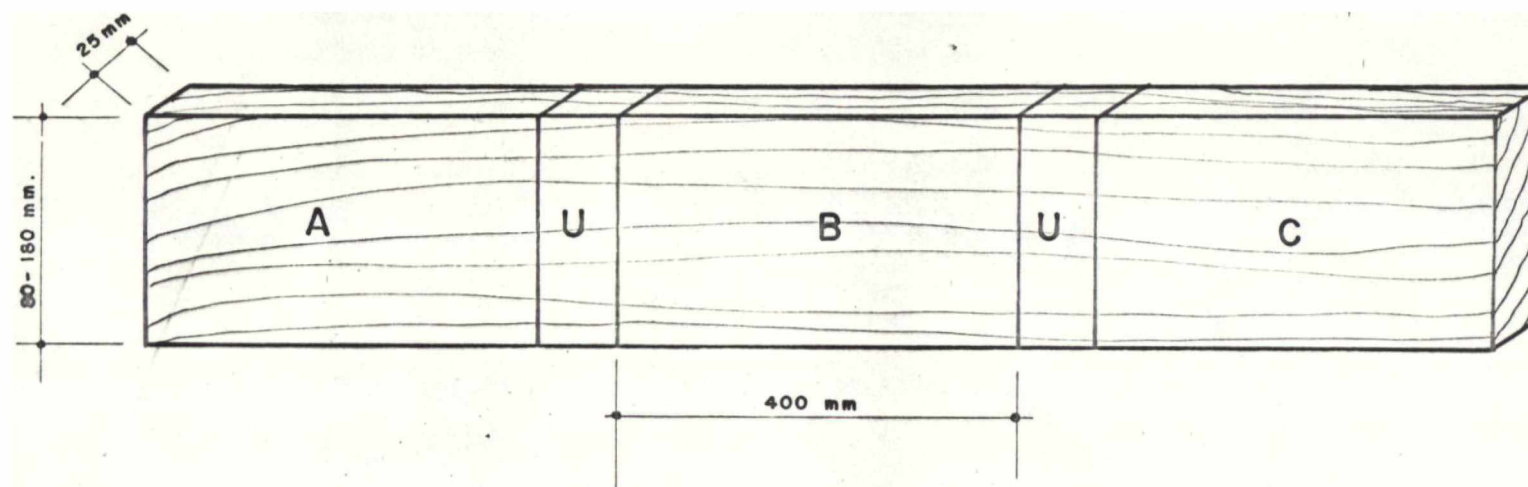
O material preparado e devidamente codificado foi aleatoriamente separado em grupos, segundo as temperaturas de secagem e acondicionado em plástico para minimizar perdas.

3.2.2 - Preparo do Material para Secagem em Estufa Piloto

Para este estudo foram selecionadas 38 tábuas do total de material coletado. Na seleção destas tábuas levou-se em consideração principalmente a uniformidade das características do material no seu comprimento.

As tábuas foram seccionadas em amostras de 400 mm de comprimento. A espessura foi mantida em 25 mm e a largura variou de acordo com a largura das tábuas (entre 80 e 170 mm). A figura 7 demonstra esquematicamente a metodologia adotada. Como pode ser observado, de cada uma das tábuas foram obtidas 3 amostras "combinadas" (já descrito anteriormente), sendo que cada uma destas amostras foi destinada a uma determinada temperatura de secagem.

Dentre cada uma das amostras foi retirado um pequeno corpo de prova destinado à determinação do teor de umidade inicial. Todas as amostras tiveram seus topos selados utilizando-se a mesma metodologia aplicada para os corpos de prova destinados aos estudos em estufa de laboratório.



**Figura 7 - Metodologia adotada para obtenção das amostras a serem secadas em estufa piloto (A,B e C).
U - amostras para determinação do teor de umidade inicial**

3.3 - Estudos em Estufa de Laboratório

3.3.1 - Condições e equipamento de secagem utilizados

Para este estudo a secagem foi conduzida em estufa de laboratório sem circulação de ar forçada e controle sobre a umidade relativa. O controle de temperatura na estufa utilizada era feito através de um termostato. Suas dimensões internas eram de 60mm X 50mm X 50mm, sendo que a temperatura interna era bastante uniforme. As variações de temperatura observadas com termopares nos diversos pontos não foram superiores a 2°C.

Utilizou-se temperaturas de secagem de 80, 90, 100, 110, 120, 150 e 180°C. A seleção das temperaturas de secagem seguiram o critério de que deveriam ser intensificadas as observações em temperaturas próximas a 100°C, temperatura esta considerada como o limite entre a secagem convencional e a alta temperatura (Hann, 1964; Tomaselli, 1977, 1980). Para todas as condições de secagem a estufa foi pré-aquecida antes do início da secagem, ou seja, antes da introdução do corpo de prova a ser testado na estufa.

3.3.2 - Determinações da Taxa de Secagem

Como já mencionado anteriormente, para cada uma das temperaturas em estudo, foram utilizados seis corpos de prova. Destes corpos de prova 3 eram tangenciais (anéis de crescimento paralelos à largura) e 3 eram radiais (anéis de crescimento perpendiculares à largura).

A determinação da taxa de secagem foi feita utilizando-se de metodologia adotada por outros pesquisadores que se dedicaram à determinação de coeficientes de difusão e taxas de secagem (Biggerstaff, 1965; Stamm e Nelson, 1961; Tomaselli, 1977). Utilizou-se de uma balança colocada no topo da estufa, possibilitando desta maneira a avaliação contínua da perda de massa do corpo de prova em secagem dentro da estufa. O corpo de prova estava preso à balança através de um arame que passava por um orifício existente no teto. Este método é mostrado esquematicamente na figura 8.

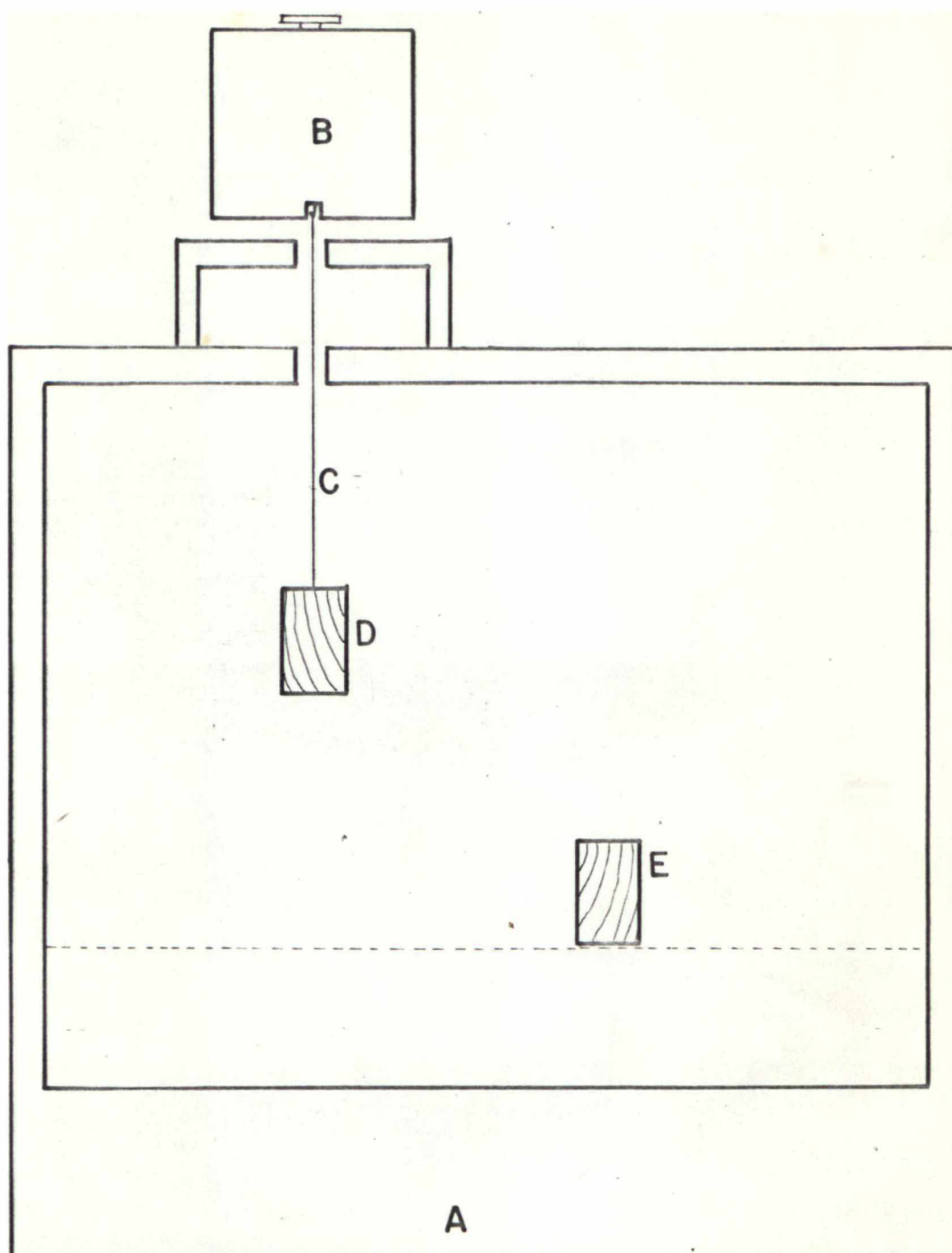


Figura 8 - Corpo de prova em pesagem contínua para a determinação da taxa de secagem.

A - estufa

B - balança

C - arame

D - corpo de prova para determinação da taxa de secagem

E - corpo de prova para determinação da contração

Antes do corpo de prova ser colocado em teste, a estufa era aquecida até a temperatura desejada e a balança era tarada para o peso do arame e do prego de fixação ao corpo da prova. As leituras de perda de peso eram feitas em intervalos que variavam entre 10 e 60 minutos, dependendo da temperatura de secagem utilizada. Evidentemente, à medida que a temperatura aumentava, menores foram os intervalos de tempo entre uma e outra leitura.

O processo era considerado como concluído quando a perda de umidade (peso de água evaporada) se tornava insignificante em relação ao peso total perdido. Paralelamente era realizada uma estimativa do teor de umidade do corpo de prova, tendo por base o teor de umidade inicial determinado através das pequenas amostras (veja figura 6). Esta estimativa era realizada, utilizando-se o peso inicial, o teor de umidade inicial é aplicando-se a equação 15 (Tomaselli, 1979). De qualquer maneira, mesmo que a quantidade de água perdida fosse insignificante, o processo não era encerrado caso o teor de umidade calculado não fosse inferior à 8%.

$$U_a = \frac{P_a (U_i + 100)}{P_i} - 100 \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

- U_a = Umidade atual do corpo de prova em %
- P_a = peso atual do corpo de prova em g
- U_i = teor de umidade inicial em %
- P_i = peso inicial em g.

Para uma confirmação desta estimativa do teor de umidade os corpos de prova foram, após o término do processo de secagem, acondicionados em câmara a 20°C e 65% de umidade relativa e em seguida deixados em estufa a 103°C + 2°C até peso constante, e os teores de umidade foram recalculados. Observou-se que, em geral, a estimativa preencheu as necessidades de precisão desta pesquisa.

Os corpos de prova foram testados individualmente, ou seja, em cada secagem somente um corpo de prova para determinação da taxa se encontrava na estufa, e portanto 6 secagens fo

ram realizados para cada temperatura.

3.3.3 - Determinação da Contração

Paralelamente à determinação da taxa de secagem foi acompanhado o desenvolvimento de contração em 6 corpos de prova para cada uma das temperaturas estudadas, e a contração do teor de umidade inicial até o teor de umidade final, dos corpos de prova destinados à determinação da taxa de secagem.

O corpo de prova destinado à determinação da taxa de secagem, que se encontrava preso por arame à balança, era somente medido antes da secagem e após o término do processo. O outro corpo de prova que era somente apoiado na prateleira da estufa (veja figura 8) era retirado à determinados intervalos de tempo e medido em espessura e largura, bem como pesado. Adotou-se como norma que os intervalos seriam o dobro dos adotados para a leitura dos pesos, uma vez que a perda em dimensão é muito mais lenta que a em peso e que seriam desta maneira minimizadas as perturbações no ambiente de secagem através da abertura da porta da estufa para a retirada do corpo de prova.

Para que as medições pudessem ser feitas dentro do menor tempo possível e com precisão, bem como para a minimização de erros nas medições e erros ocasionados pelo tempo que o corpo de prova ficava fora da estufa (diminuição da sua temperatura e conseqüente perda de taxa de secagem), desenvolveu-se um sistema de medição com deflectômetro, o qual é mostrado na figura 9. Basicamente este equipamento constitui-se de uma base à qual é colocada uma haste onde é fixado um deflectômetro com possibilidade de medir centésimos de milímetro.

Observe-se que a orientação do corpo de prova para a medição da contração, em uma determinada secagem, era sempre a mesma do corpo de prova em secagem contínua (para determinação da taxa de secagem). A determinação do teor de umidade do corpo de prova destinado à medição da contração foi feita após o término do processo, através da obtenção do peso seco em estufa a 0%.

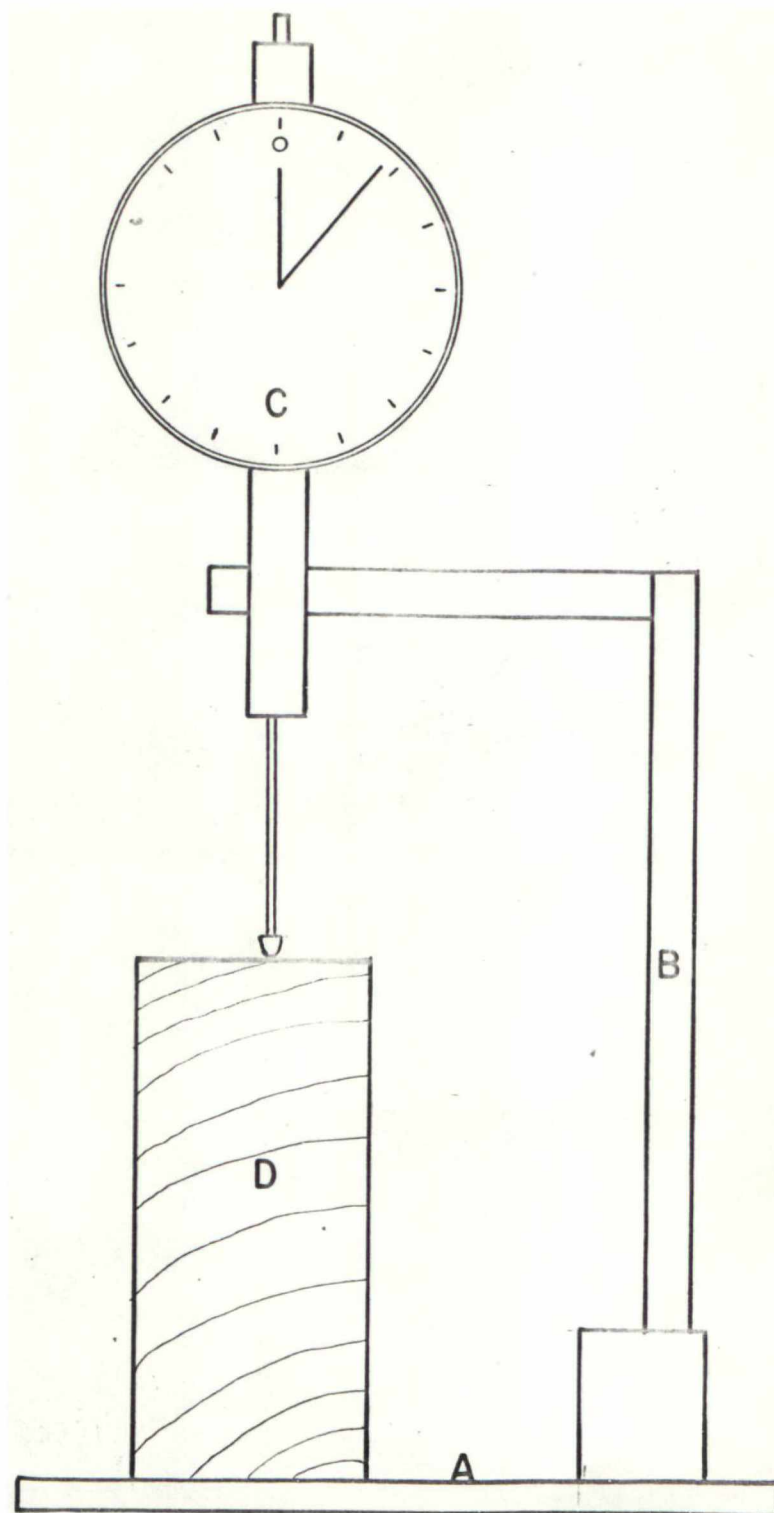


Figura 9 - Equipamento utilizado para a determinação das dimensões dos corpos de prova em seca gem.

A - Base

B - Haste

C - Deflectômetro

D - Corpo de prova

3.3.4 - Consumo de Energia

Para cada uma das secagens foi medido o consumo de energia utilizando-se um medidor de consumo com a precisão de centésimos de Kwh.

As anotações foram feitas inicialmente do consumo para ser atingida a temperatura de secagem desejada e também a intervalos coincidentes com as medições do peso de água evaporada. Objetivou-se principalmente a avaliação comparativa do consumo de energia entre as diversas temperaturas de secagem, desconsiderando-se parâmetros como perdas através da parede da estufa, quantidade de energia necessária para o aquecimento do corpo de prova, etc. As anotações foram feitas dentro dos intervalos pré-selecionadas com a função de serem avaliadas também diferenças em consumo nos vários estágios de secagem.

3.4 - Estudos em Estufa Piloto

3.4.1 - Equipamento Utilizado

A estufa utilizada nesta parte da pesquisa é esquematicamente mostrada na figura 10. A capacidade deste equipamento é de aproximadamente 1 metro cúbico, mas somente uma parte desta capacidade foi utilizada. O aquecimento é elétrico, e os controles de temperatura e umidade relativa automáticos. O ventilador tem uma capacidade de produção de ar em torno de 1 metro cúbico/segundo, e o fluxo de ar é longitudinal. A variação da velocidade do ar entre as tábuas somente pode ser obtida variando-se a área de passagem do ar. Neste experimento, construiu-se uma área de passagem de aproximadamente $0,250 \text{ m}^2$, o que resultou em uma velocidade média de 4 m/s. medições realizadas com um anemômetro demonstraram variações entre um máximo de 4,5 m/s e um mínimo de 3,4 m/s, que é considerada uma distribuição aceitável.

Devido ao fato do fluxo de ar ser longitudinal (paralelo ao comprimento das tábuas), os sarrafos separadores são de alumínio ondulado, permitindo a passagem do ar. Este sistema apresenta determinados inconvenientes, principalmente quan

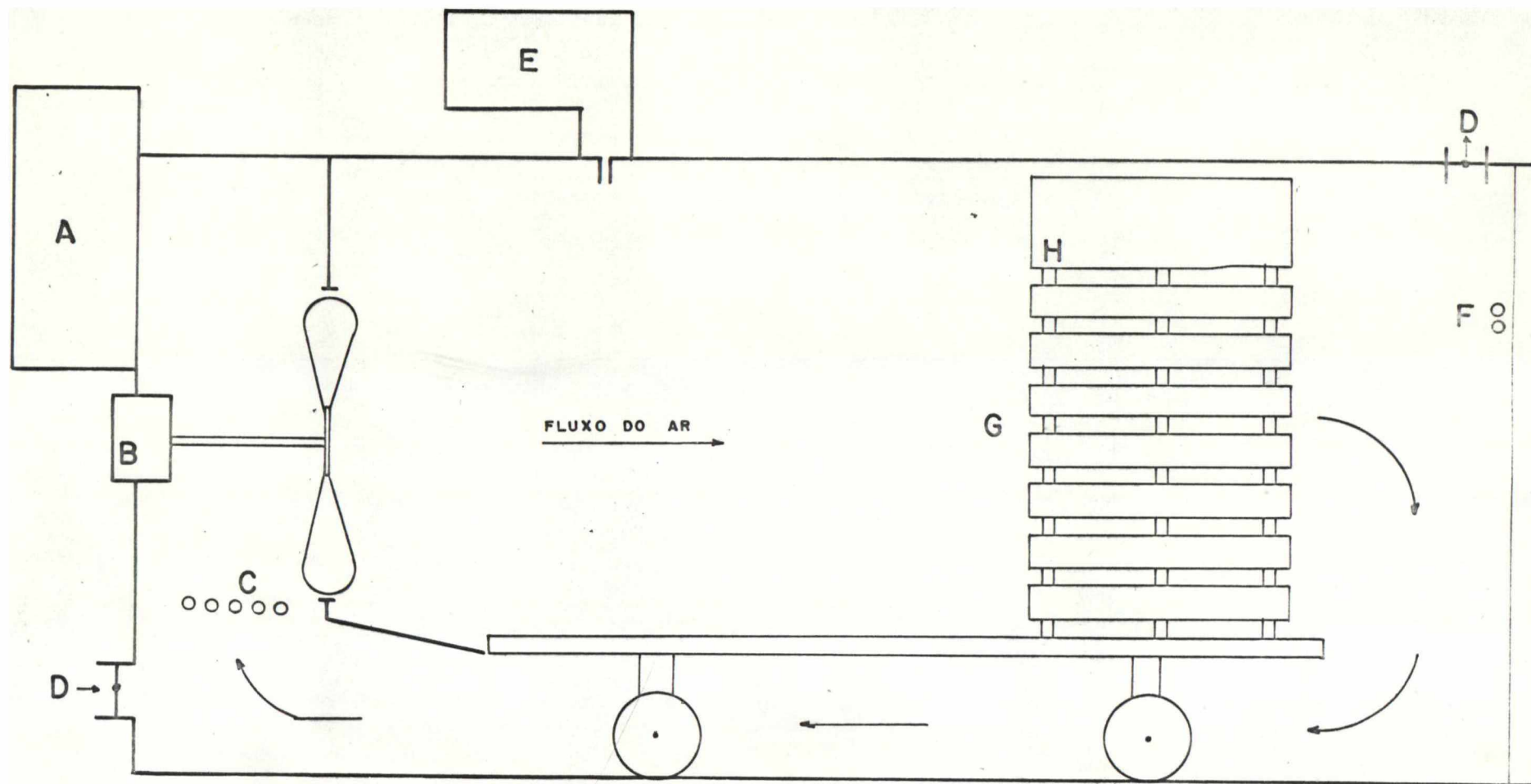


Figura 10 - Esquema simplificado da estufa piloto utilizada neste estudo

- | | |
|---------------------------------|-----------------------------|
| A - painel de controle | F - Instrumentos de medição |
| B - Ventilador | G - Pilha |
| C - Serpentina nos aquecimentos | H - Bloco de concreto |
| D - Entradas e saídas de ar | |
| E - Caldeira | |

do as tábuas de secagem são de pequena largura.

A estufa utilizada possui também um sistema para a observação contínua do teor de umidade em 3 pontos na carga, funcionando com medidores de resistência à passagem de uma corrente elétrica contínua. Este sistema não foi utilizado devido aos seguintes aspectos:

- a) as temperaturas utilizadas foram bastante elevadas e erros significantes são esperados;
- b) tratando-se de tábuas de pequeno comprimento, é relativamente fácil e rápido retirar amostras da estufa e fazer o controle por pesagem utilizando-se a equação 15;
- c) retirando-se as tábuas da estufa além do controle da perda de massa, pode-se observar a perda em dimensão, e em uma fase posterior comparar com os dados obtidos para os pequenos corpos de prova em estufa de laboratório.

3.4.2 Condições de Secagem

A secagem em estufa piloto foi conduzida para ser avaliada a possibilidade de transferência dos dados obtidos na estufa de laboratório para uma situação mais próxima da prática, principalmente pela existência da ventilação forçada.

Foram estabelecidas três temperaturas de secagem: 80, 100 e 120°C. O equipamento utilizado não permitia temperaturas acima de 120°C, mas acredita-se que há condições de, pelo menos a caráter preliminar, ser extrapolado para temperaturas mais altas. A umidade de equilíbrio para as três temperaturas foi mantida dentro do menor nível que o equipamento permitia, ou seja, 2%. Acredita-se que este teor de umidade de equilíbrio esteja próximo àquele que ocorre em uma estufa de laboratório pelo menos para a temperatura de 80 (Skaar, 1972). Para as temperaturas de 100 e 120°C possivelmente o teor de umidade de equilíbrio estaria abaixo de 2%, mas esta limitação do equipamento não pode ser resolvida, uma vez que envolveria modificações profundas no

painel de controle.

Como mostra a figura 10, a pilha em secagem foi mantida sob restrição, isto para que representasse mais de perto a situação real, minimizando emperramentos da madeira juvenil (Mackay e Rumball, 1971). Para a restrição foi usado um bloco de concreto que aplicaria uma pressão de 300 kg/m^2

Em todos os programas de secagem a estufa foi previamente aquecida antes da introdução do carro com a carga de madeira. Este cuidado foi tomado para que pudesse ser melhor determinada a taxa de secagem durante o primeiro estágio, conforme descrito no item seguinte.

3.4.3 - Determinação da Taxa de Secagem e Contração

Para a determinação da taxa de secagem foram selecionadas três amostras, para cada temperatura testada. Tomou-se o cuidado de que as amostras selecionadas para 80°C fossem as provenientes da mesma tábua das selecionadas para 100 e 120°C , caracterizando desta maneira amostras "combinadas", ou seja com características físicas similares (os mesmos anéis ou porção da árvore estariam sendo analisadas em três condições de secagem diferentes).

Para ser evitado ou minimizado o período de ajustamento verificado em estudos anteriores (Tomaselli, 1977), período este que ocorre durante o aquecimento da estufa, e portanto a taxa de secagem é uma taxa representando uma fase de temperatura crescente e não a uma determinada temperatura, decidiu-se aquecer a estufa antes de ser introduzido o material para ser dado início à secagem. Evidentemente com a introdução da carga, como esperado, houve uma redução na temperatura; no entanto, esta redução foi pequena e rapidamente recuperada.

As amostras selecionadas eram retiradas da estufa à intervalos de uma hora e pesadas. Além da determinação da perda de massa para posterior cálculo da taxa de secagem, os valores obtidos também tiveram a finalidade de determinar quando o processo de secagem se encontrava concluído (utilizando-se da

equação 15). Considerou-se como concluído quando a média dos teores de umidade das amostras era igual à 8%.

Estas mesmas amostras também foram utilizadas para a determinação da perda de dimensão (contração) Após a pesagem as amostras eram medidas em espessura com micrômetro e em largura com paquímetro, e novamente colocados na estufa. Toda esta operação, ou seja, retirada das amostras, pesagem e medições pode ser feita dentro de um tempo de aproximadamente um minuto, e portanto acredita-se que isto não tenha afetado significativamente o andamento da secagem.

Além da observação da taxa de secagem e contração nas três amostras para cada uma das temperatura foi também determinado o teor de umidade final e a contração até o teor de umidade final das demais tábuas em secagem (38 no total). Para que pudesse ser determinado o teor de umidade final e a contração máxima as tábuas após serem retiradas da estufa, e acondicionadas em uma temperatura de 20°C e 65% de umidade relativa, foram secas até peso constante à 103,0 ± 2,0°C (0%).

Em nenhum dos casos foi aplicada a vaporização inicial ou final indicada para a plasticização da madeira quando em secagem à alta temperatura (Mackay e Rumball, 1972)

3.4.4 - Consumo de Energia

O consumo de energia foi neste caso obtido com um medidor de consumo em Kwh. Manteve-se a sistemática de observar-se o consumo para o aquecimento, bem como leituras eram feitas a cada intervalo em que eram retiradas as amostras para avaliação da perda de massa e dimensões. Considerou-se o consumo total do equipamento englobando o gasto de energia para aquecimento, ventilação, produção de vapor e painel de controle. Deve ser mencionado que raras vezes o sistema automático acionou a caldeira uma vez que o teor de umidade de equilíbrio adotado foi bastante baixo, e a pré e pós vaporização, seja para plasticização ou acondicionamento não foram utilizados.

3.5 - Outras Observações

3.5.1 - Umidade de Equilíbrio

Como já foi mencionado anteriormente todo o material seco na estufa de laboratório, foi levado a uma câmara de acondicionamento, regulada para uma temperatura de 20°C e 65% de umidade relativa, permanecendo no local até estar em equilíbrio com o ambiente.

O material foi considerado como em equilíbrio com o ambiente quando em duas pesagens consecutivas tomadas num intervalo de 24 horas não apresentou diferença significativa.

Além de ter sido anotado o peso, cada corpo de prova foi novamente medido (espessura e largura), e posteriormente colocados em estufa à 103° + 2°C até peso constante para ser então repetida a operação.

3.5.2 - Observação de Defeitos e Outras Alterações

Os corpos de prova, tanto da estufa de laboratório como da estufa piloto foram avaliados quanto a defeitos como rachaduras, empenamentos, encanoamentos, mudanças de cor, exudação de resina, etc.

Esta avaliação além de ter sido feita no final da secagem, foi também feita nas amostras que eram retiradas da estufa durante o processo de secagem. Isto permitiria, caso surgisse alguma anormalidade, detectar o ponto inicial e o seu desenvolvimento durante as fases subsequentes da secagem.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - Secagem em Estufa de Laboratório

4.1.1 - Taxa de Secagem

As taxas de secagem foram determinadas utilizando-se as equações 5 e 11, propostas por Hann (1963). É interessante observar que embora estas equações, e a sistemática envolvida nos cálculos, tenham sido propostas para a secagem à alta temperatura (acima de 100°C), houve possibilidade de empregar a mesma metodologia para secagens abaixo de 100°C, ou seja: a porção linear da curva durante o primeiro estágio quando é colocada graficamente a perda de água versus tempo, e a linearidade do segundo estágio de secagem (peso da água removida X raiz quadrada do tempo) estiveram presente em todas as temperaturas, mesmo na menor temperatura utilizada neste experimento (80°C). Curvas para o primeiro e segundo estágios de secagem para um corpo de prova submetido a secagem a 80°C são mostrados nas figuras 11 e 12. A única diferença apresentada entre as curvas obtidas nas várias temperaturas foi a inclinação da parte linear, o que é naturalmente refletido nos valores de K_1 e K_2 discutidos a seguir. Deve ser observado que o período de ajustamento para o primeiro estágio de secagem observado por Hann (1965) está praticamente ausente na curva apresentada na figura 11, e a linha de taxa constante corta o eixo do "x" muito próximo do ponto zero. Isto deve-se provavelmente ao fato de que a temperatura de secagem é relativamente baixa, e o tempo para que a temperatura da superfície atinja a temperatura de secagem é bastante curto. Em temperaturas mais elevadas o período de ajustamento esteve sempre presente.

4.1.1.1 - Taxa de Secagem Durante o Primeiro Estágio

A taxa de secagem para o primeiro estágio (K_1) calculado utilizando-se a equação 5, para os diversos corpos de prova submetidos à secagem nas diversas temperaturas é mostrada

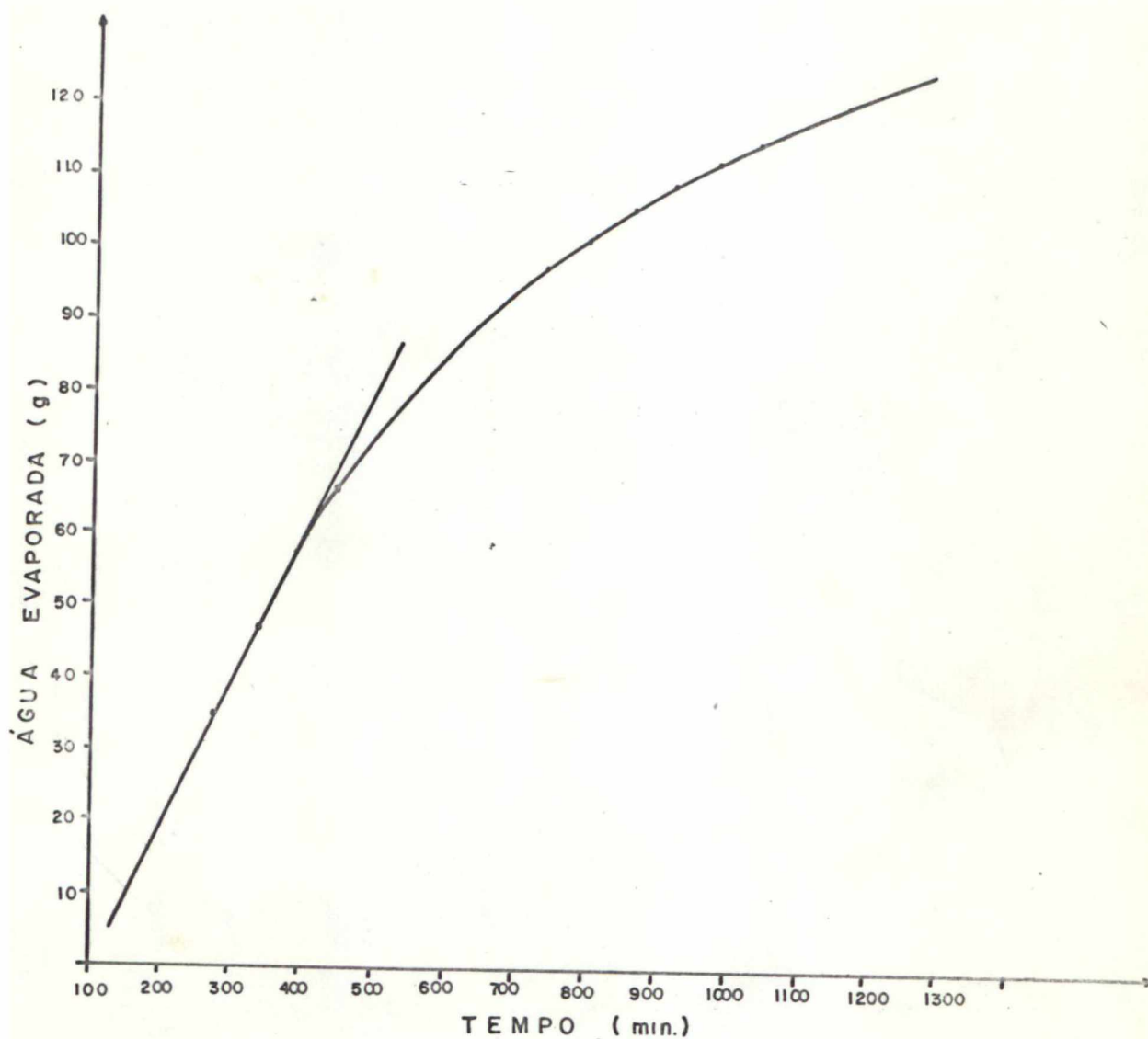


Figura 11 - Curva típica do primeiro estágio de secagem para Pinus elliottii seco à 80°C em estufa de laboratório.

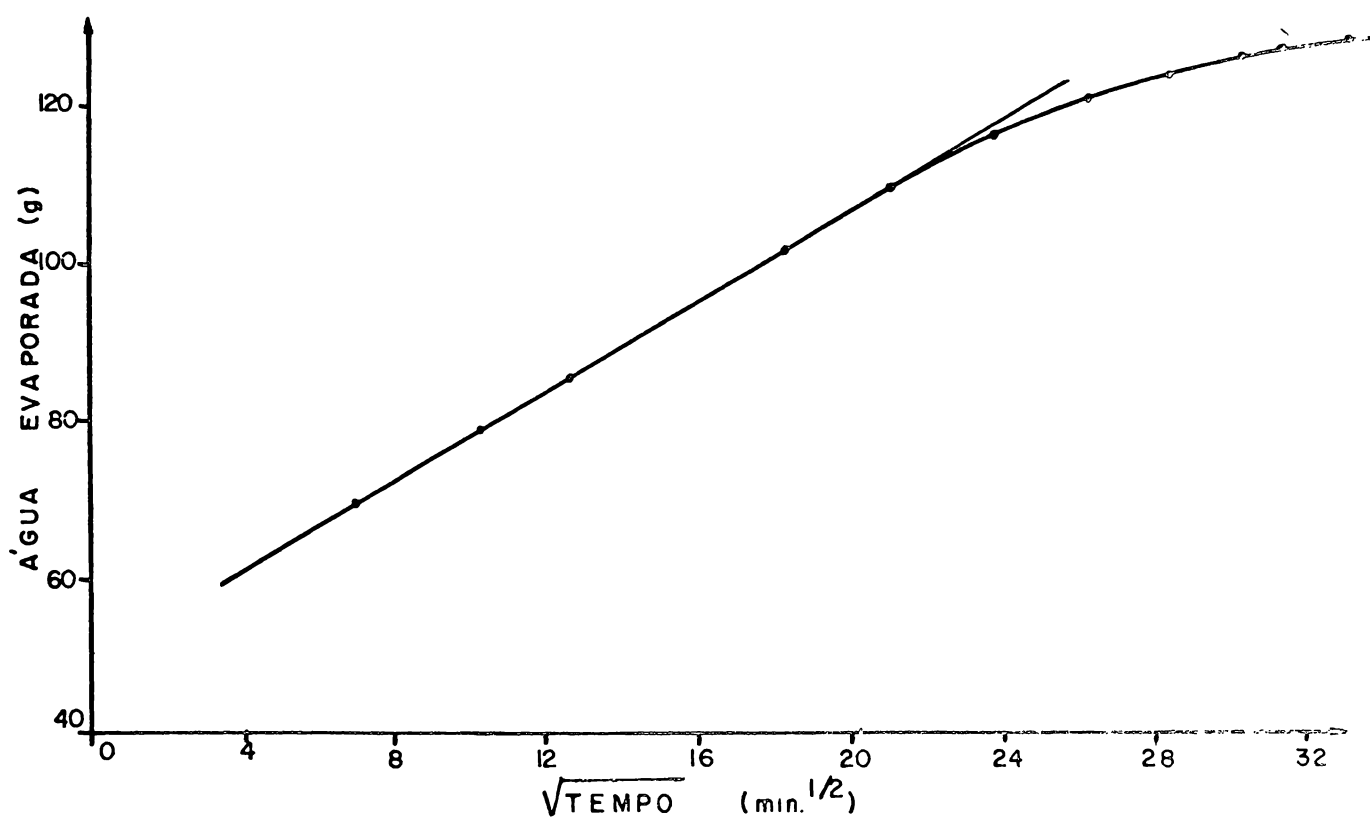


Figura 12 - Curva típica do segundo estágio de secagem para Pinus elliottii seco à 80°C em estufa de laboratório.

no quadro 1. Como pode ser observado, a taxa de secagem aumenta com o aumento da temperatura. Estes resultados são similares aos obtidos em estudos passados (Hann, 1965; Tomaselli e Grossman, 1980). Evidentemente, uma comparação direta não pode ser realizada, uma vez que as condições experimentais foram diferentes, mas os dados mostram a mesma tendência.

Uma síntese dos resultados obtidos é apresentada no quadro 2. Além das médias obtidas para cada um dos tratamentos é também apresentada a estimativa do desvio padrão. Além do aumento da taxa de secagem durante o primeiro estágio, pode também ser observada uma aparente tendência de aumento na variabilidade dos dados com a temperatura, principalmente considerando-se níveis acima de 100°C. Inicialmente esta tendência foi atribuída ao fato de que o teor de umidade inicial do corpo de prova poderia estar influenciando a taxa de secagem durante o primeiro estágio, principalmente, quando a temperatura atingisse níveis mais altos. Posteriormente, foi observado através do coeficiente de variação (CV), que é mais apropriado para a comparação de dados que se diferenciam significativamente em médias (Barnard e Dichburne, 1956), que a variabilidade de K_1 era praticamente a mesma para os vários tratamentos, e portanto a hipótese anterior foi rejeitada. Uma análise do efeito do teor de umidade na taxa de secagem durante o primeiro estágio é apresentada posteriormente.

QUADRO I - TAXA DE SECAGEM DURANTE O PRIMEIRO ESTÁGIO E TEOR DE UMIDADE INICIAL (U_i) PARA (CP) Pinus Elliottii (SECAGEM EM ESTUFA DE LABORATÓRIO)

TEMPERATURA (°C)	C.P. 1 *		C.P. 2 *		C.P. 3		C.P.4		C.P.5 *		C.P.6	
	U _i (%)	K ₁	U _i (%)	K ₁	U _i (%)	K ₁	U _i (%)	K ₁	U _i (%)	K ₁	U _i (%)	K ₁
80	105,7	0,76	182,9	1,03	168,4	0,91	180,0	0,84	215,7	0,98	170,2	0,91
90	134,4	1,06	188,9	1,16	192,5	1,27	193,5	1,12	213,5	1,11	205,1	1,11
100	134,1	1,18	197,8	1,26	182,2	1,32	164,0	1,17	201,5	1,29	194,6	1,35
110	107,1	1,28	164,4	1,36	180,1	1,81	186,3	1,81	203,2	1,45	197,9	1,75
120	121,8	1,69	173,2	1,45	176,8	1,85	186,2	1,93	199,1	1,78	185,9	1,84
150	139,4	2,36	197,5	2,84	200,0	2,70	187,8	2,84	209,1	2,56	192,2	2,90
180	116,7	3,30	165,6	3,19	188,6	3,69	174,4	3,71	222,4	3,62	185,7	4,01

K₁ - Taxa de secagem durante o primeiro estágio (g/min.cm² X 10⁻³)

* - corpos de prova com a largura de face radial ("back-sawn"). Para os demais a largura é de face tangencial ("flat-sawn").

QUADRO 2 - TAXA DE SECAGEM MÉDIA NO PRIMEIRO ESTÁGIO PARA Pinus
elliottii (SECAGEM EM ESTUFA DE LABORATÓRIO)

TEMPERATURA °C	n	K_1	s
80	6	0,905	0,096
90	6	1,138	0,072
100	6	1,262	0,074
110	6	1,577	0,241
120	6	1,757	0,170
150	6	2,700	0,207
180	6	3,587	0,299

n = número de corpos de prova testados

K_1 = taxa de secagem média para o primeiro estágio (g/min. cm²
x 10⁻³)

s = desvio padrão.

O efeito da temperatura na taxa de secagem no primeiro estágio é mostrado na figura 13. Além do aumento da taxa de secagem com a temperatura pode ser também observado que não existe diferença significativa no valor K_1 entre as amostras com diferente orientação (radial ou tangencial). Isto é esperado pois a taxa de secagem (K_1) como já definido anteriormente depende somente da quantidade de calor que é transferida à superfície.

Um dos aspectos importantes mostrados na figura 13 é que o aumento da taxa de secagem não é totalmente linear em função do aumento de temperatura como foi observado por Hann (1965). Este fato pode ser explicado em função da diferença de metodologias empregadas no estudo de Hann, além de outros aspectos, a transferência de calor era feita por condução e por radiação, mas principalmente por condução. Acredita-se que neste estudo a transferência de calor tenha sido feita no caso dos experimentos conduzidos na estufa de laboratório, primordialmente por radiação, embora a transferência de calor por convecção tenha também contribuído. A transferência de calor por radiação aumenta na quarta potência da temperatura (veja equação 8).

A taxa de secagem no primeiro estágio (K_1), para a madeira de Pinus elliottii dentro das limitações experimentais desta pesquisa pode ser estimada através da equação 16. O coeficiente de determinação ($r^2 = 0,96$) mostra que existe um excelente ajuste da curva aos pontos da figura 13.

$$K_1 = 0,00051 \cdot t^{1,707}$$

Equação 16

Onde:

$$K_1 = \text{taxa de secagem no primeiro estágio} \quad (\text{g/} \\ \text{min. cm}^2 \times 10^{-3})$$

$$t = \text{temperatura } (^\circ\text{C}).$$

A equação da reta também apresentou bom ajuste, com um coeficiente de determinação bastante próximo ao obtido para a equação 16. No entanto, é esperado que a equação aqui apresentada possui uma maior faixa de utilização, aproximando-se melhor da situação prática. A equação linear obtida apresentava o K_1

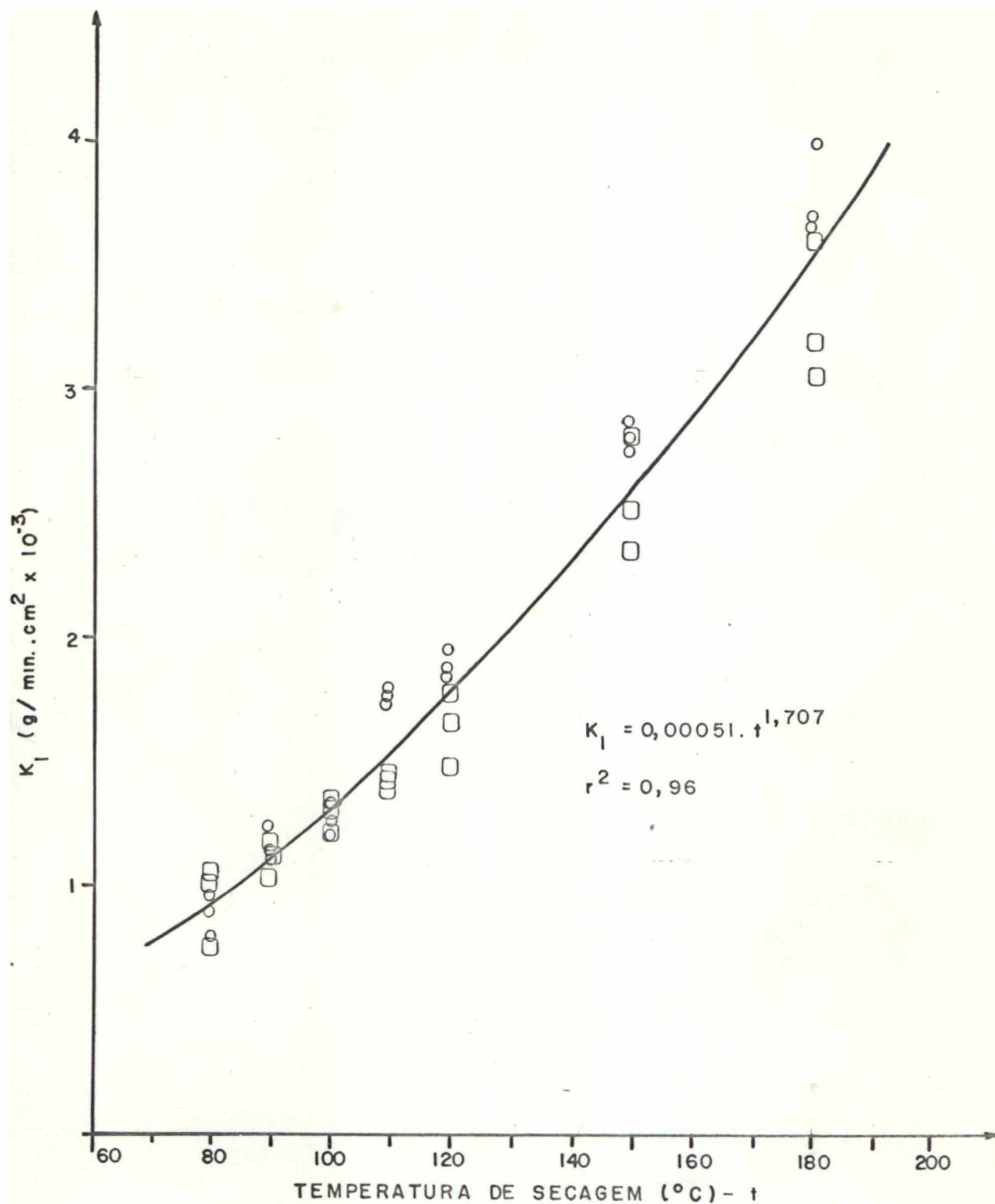


Figura 13 - Relação entre taxa de secagem durante o primeiro estágio (K_1) e a temperatura (t) para Pinus elliottii

- - Corpos de prova "tangenciais"
- - Corpos de prova "radiais"
- r^2 - Coeficiente de determinação

próximo à zero quando a temperatura era ainda 60°C, e abaixo desta temperatura os valores estimados em função da temperatura eram negativos, o que, evidentemente, não representa a situação prática.

Neste estudo não foi observada nenhuma correlação entre o teor de umidade inicial e a taxa de secagem no primeiro estágio, confirmando o resultados obtidos por Hann (1965). Os coeficiente de correlação obtidos para as várias temperaturas testadas, foram todos não significantes, não indicando nenhuma tendência. Este fato é esperado e plenamente justificável se a transferência de calor para a superfície é o fator limitante. Um maior teor de umidade inicial poderia levar a um primeiro estágio de secagem mais longo, mas não em uma taxa de secagem maior (Tommaselli, 1977).

É importante ser observado que os resultados desta pesquisa confirmam as suposições da teoria desenvolvida por Tommaselli (1977), e mais tarde reafirmada por Santini (1980), sobre a correlação encontrada entre teor de umidade e taxa de secagem, durante o primeiro estágio. Nestes estudos citados, foram observadas correlações entre a taxa de secagem e o teor de umidade, e a princípio, nenhuma explicação foi possível, tendo sido chegado até mesmo a questionar a teoria proposta por Fleischer (1953) e Hann (1964, 1965). No entanto, com o desenrolar da análise dos dados, observou-se que o teor de umidade inicial estava relacionado à porcentagem de madeira juvenil, ou seja, altos teores de umidade eram encontrados em madeira adulta e baixos teores de umidade em madeira juvenil. Baseando-se neste aspecto, as seguintes análises foram feitas:

- a) a superfície da madeira, como definido por Hann (1965), é constituída por "picos" e "vales" e a água livre na realidade, mesmo no início da secagem, se encontra acumulada nos vales. O calor é transferido à superfície da madeira, e a transferência dos "picos" para os "vales" onde se encontra a maioria ou quase totalidade da água livre, depende da densidade da madeira. A madeira adulta apresenta densidade bem mais al

ta, e portanto, uma maior quantidade de calor é transferida para a área de maior concentração de umidade;

- b) a madeira juvenil possui células com paredes delgadas, e é esperado que os seus "picos" sejam secos antes que os "picos" da madeira adulta. Com a diminuição do teor de umidade, ocorre um aumento da temperatura, e a transferência de calor por radiação à superfície, conforme equações apresentadas anteriormente, depende da diferença de temperatura existente na superfície do corpo emissor e do receptor;
- c) um outro ponto a ser também considerado é o fato da condutividade térmica da madeira diminuir com o teor de umidade (Equação 13 p. 20) e em consequência, este fato também estaria reduzindo a condução de calor dos "picos" para os "vales".

Para que sejam reforçadas as observações advindas da análise acima, são apresentados no quadro 3, os valores médios do peso específico aparente seco dos corpos de prova retirados de uma mesma amostra (corpos de prova combinados)

Observe-se que os dados apresentados representam pesos específicos típicos para madeira juvenil de Pinus elliotii (Tomaselli, 1980), com exceção dos dados obtidos para a amostra 1. Esta amostra apresentou além desta diferença, diferenças na taxa de secagem e na contração. Uma análise mais detalhada revelou que este corpo de prova, apesar de ser provavelmente madeira juvenil, apresentava madeira de compressão, cujas características são peculiares (Kollmann e Côté, 1968).

QUADRO 3 - PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO* MÉDIO (PE) DAS AMOSTRAS DE Pinus eliottii UTILIZADAS NOS ESTUDOS DE TAXA DE SECAGEM EM ESTUFAS DE LABORATÓRIO

AMOSTRA	n	PE (g/cm ³)	s
1	7	0,436	0,0094
2	7	0,357	0,0084
3	7	0,377	0,0096
4	7	0,364	0,0070
5	7	0,330	0,0054
6	7	0,373	0,0084

* seco em estufa à 105° ± 3 °C

n - número de corpos de prova, retirados de uma mesma amostra combinada, coincidindo com o número de tratamentos (temperatura) testados.

s - desvio padrão.

Como pode ser observado no quadro 3, a homogeneidade existente dentro de uma amostra é bastante grande, ou seja, os corpos de prova "combinados", retirados de uma mesma amostra apresentaram provavelmente características físicas muito semelhantes. A metodologia adotada, portanto, atingiu o seu objetivo, ou seja, se qualquer diferença for detectada quando os diferentes corpos de prova forem submetidos aos diversos tratamentos, a diferença deverá ser causada pelo tratamento, pois uma homogeneidade bastante alta foi obtida no material em teste.

Deve-se ainda levar em consideração que a variação entre os corpos de prova de uma determinada amostra apresentada no quadro 3, poderá na verdade ser ainda menor, uma vez que os corpos de prova foram submetidos à diferentes temperaturas. No entanto, julga-se ser este fato secundário, uma vez que estudos passados tem mostrado, em sua maioria, que o peso específico é pouco ou não afetado pela temperatura (Koch e Wellford, 1977; Leont'ev et al, 1938; Salamon, 1963).

A influência do tratamento aplicado no peso específico aparente a 12% será tratada posteriormente.

4.1.1.2 - Taxa de Secagem Durante o Segundo Estágio

O segundo estágio é caracterizado pela parte da curva de secagem que é linear quando colocados em gráfico a quantidade de água evaporada e a raiz quadrada do tempo, pois o fator limitante neste estágio é a transferência de calor da superfície até a linha de evaporação (Hann, 1965). a Taxa de secagem durante o segundo estágio é calculada através da equação 4

Como já foi observado em pesquisas anteriores, (Tomasselli, 1977), a definição exata do início do segundo estágio é difícil. Este fato repetiu-se neste experimento, e a causa provável é que nem todas as partes da superfície dos corpos de prova atingem o ponto de saturação das fibras ao mesmo tempo. No entanto, apesar desta dificuldade, foi possível estimar-se o início do segundo estágio com uma precisão aceitável.

Os valores obtidos para as taxas de secagem duran

te o segundo estágio são apresentados no quadro 4. Inclui-se neste quadro também o teor de umidade inicial, considerado como o teor de umidade com que a madeira se encontra quando termina o primeiro estágio.

O valor K_1 aumenta significativamente com a temperatura, e isto pode ser melhor observado no quadro 5, que traz a média para taxas de secagem obtidas nas várias temperaturas estudadas. Um outro aspecto bastante importante é que a taxa de secagem neste segundo estágio apresenta uma maior variabilidade, e aparentemente o aumento nesta variabilidade é maior quando considera-se temperaturas acima de 100°C. A provável razão desta alta variação deve estar relacionada com a correlação existente entre a taxa de secagem durante o segundo estágio e o teor de umidade no início do estágio. Este aspecto será discutido logo à seguir.

QUADRO 4 - TAXA DE SECAGEM DURANTE O SEGUNDO ESTÁGIO E TEOR DE UMIDADE (U_i) PARA (CP) DE Pinus elliottii
(SECAGEM EM ESTUFA DE LABORATÓRIO)

TEMPERATURA DE SECAGEM (°C)	C.P. ₁ *		C.P. ₂ *		C.P. ₃		C.P. ₄		C.P. ₅ *		C.P. ₆	
	U _i (%)	K ₂	U _i (%)	K ₂	U _i (%)	K ₂	U _i (%)	K ₂	U _i (%)	K ₂	U _i (%)	K ₂
80	70	0,88	102	1,04	99	1,37	100	1,13	119	1,12	95	1,36
90	82	1,08	113	1,30	105	1,55	101	1,55	109	1,45	113	1,62
100	74	1,20	108	1,39	92	1,51	73	1,28	109	1,50	99	1,46
110	50	1,05	91	1,39	82	1,84	93	1,65	107	1,65	103	2,00
120	55	1,26	73	1,25	81	2,02	86	1,65	98	1,44	102	2,19
150	75,4	2,20	112	2,30	108	2,89	101	2,37	122	2,90	90	2,79
180	46	2,22	61	2,21	77	3,31	74	2,45	70	2,97	77	2,89

K₂ - Taxa de secagem durante o segundo estágio (g/min^{1/2} . cm² x 10⁻²)

* - corpos de prova com largura de face radial ("back-sawn"). Para os demais a largura é de face tangencial ("flat - sawn").

OBS.: O teor de umidade inicial refere-se ao teor de umidade no final do primeiro estágio.

QUADRO 5 - TAXA DE SECAGEM MÉDIA NO SEGUNDO ESTÁGIO PARA Pinus
elliottii (SECAGEM EM ESTUFA DE LABORATÓRIO)

TEMPERATURA (°C)	n	K ₂	s
80	6	1,15	0,189
90	6	1,42	0,202
100	6	1,39	0,126
110	6	1,59	0,337
120	6	1,64	0,396
150	6	2,58	0,319
180	6	2,69	0,430

n - número de corpos de prova testados

k₂ - taxa de secagem média para o segundo estágio (g/min^{1/2} · cm² × 10⁻²)

s - desvio padrão.

A figura 14 mostra graficamente a relação existente entre a temperatura de secagem e K_2 . A equação que melhor se adaptou a este caso foi a de uma reta (Equação 17). O coeficiente de determinação apesar de não mostrar um excelente ajuste como no caso da relação existente entre a temperatura e a taxa de secagem no primeiro estágio, é significativa ($r^2 = 0,75$), e esta equação pode ser utilizada, dentro das limitações e metodologia desta pesquisa, para estimar K_2 na secagem de Pinus elliotii, baseando-se na temperatura.

$$K_2 = 0,1843 + 0,01657 t \quad (\text{Equação 17})$$

Onde:

$$K_2 = \text{taxa de secagem durante o segundo estágio} \\ (\text{g/min}^{1/2} \cdot \text{cm}^2 \times 10^{-2})$$

$$t = \text{temperatura } (^\circ\text{C})$$

A relação linear entre a temperatura de secagem e K_2 , comprova as conclusões tiradas em estudos passados de que o fator limitante é realmente a transferência de calor da superfície da madeira até a linha de evaporação (Fleischer, 1953; Hann, 1964, 1965). Esta linha, formada por água livre que no primeiro estágio se encontrava na superfície da madeira ou próxima dela, começa a retroceder em direção ao centro. Considerando-se secagem conduzida com corpos de prova à teores de umidades idênticas, à medida que a temperatura de secagem aumenta, aumenta também, durante o segundo estágio, a temperatura da superfície. A temperatura da linha de evaporação se mantém constante à 100°C , ou próxima deste valor. Portanto, como postulado pela lei de Fourier (Equação 12 pág 19), o aumento da temperatura e o conseqüente aumento no gradiente ($\frac{dt}{dx}$), resulta em um aumento proporcional na taxa de secagem. Deve também ser notado que a condutividade térmica da madeira aumenta linearmente com o aumento da temperatura (Kollmann e Côté, 1968). Estudos com madeira de Pinus radiata submetido à secagem em temperatura até 180°C mostram claras evidências, que durante o segundo estágio, a temperatura interna aumenta com a temperatura de secagem (Tomaselli e Grossman, 1980).

É esperado que a taxa de secagem durante o segundo

estágio aumente também com o teor de umidade inicial. Hann (1965) concluiu que esta fato era devido a que em corpos de prova com alto teor de umidade inicial, a linha de vaporização vai se encontrar mais próxima da superfície do que em corpos de prova que iniciaram o segundo estágio com um teor de umidade mais baixo. Conseqüentemente, a energia teria uma menor distância a percorrer (entre a superfície e a linha de vaporização), no caso de corpos de prova com alto teor de umidade.

A correlação entre K_2 e o teor de umidade inicial, mostrou para este estudo coeficientes de determinação baixos e não significantes. No entanto, como pode ser observado no quadro 4, a tendência aparentemente existe.

Acredita-se que, apesar dos coeficientes de determinação não serem significantes, o teor de umidade inicial está contribuindo na viabilidade dos valores encontrados para K_2 e apresentados graficamente na figura 14. A baixa correlação encontrada neste estudo deve-se provavelmente à grande homogeneidade do material estudado (veja quadro 3), pois em estudos conduzidos com *Pinus radiata* (Tomaselli, 1977) as correlações foram significantes, mas o material não era homogêneo e como então alertado, a condutividade térmica também depende do peso específico da madeira. Sugere-se aqui que a taxa de secagem no segundo estágio, além de ser influenciada pelo teor de umidade inicial, é também significativamente influenciada pela densidade da madeira, apesar de Hann (1965) citar ser este um efeito secundário. Novas pesquisas são necessárias nesta área para que estes fatores sejam melhor estudados.

O teor de umidade dos corpos de prova no final do segundo estágio foi na maioria dos casos, inferior à 10%, o que vem à confirmar que o terceiro estágio de secagem é de pouca implicação prática, como discutido anteriormente.

4.1.2 - Efeito no Teor de Umidade de Equilíbrio

A importância do teor de umidade de equilíbrio é plenamente conhecida (Kolmann e Côté, 1968; Stamm, 1964). No âmbito desta pesquisa, a influência da temperatura de secagem no

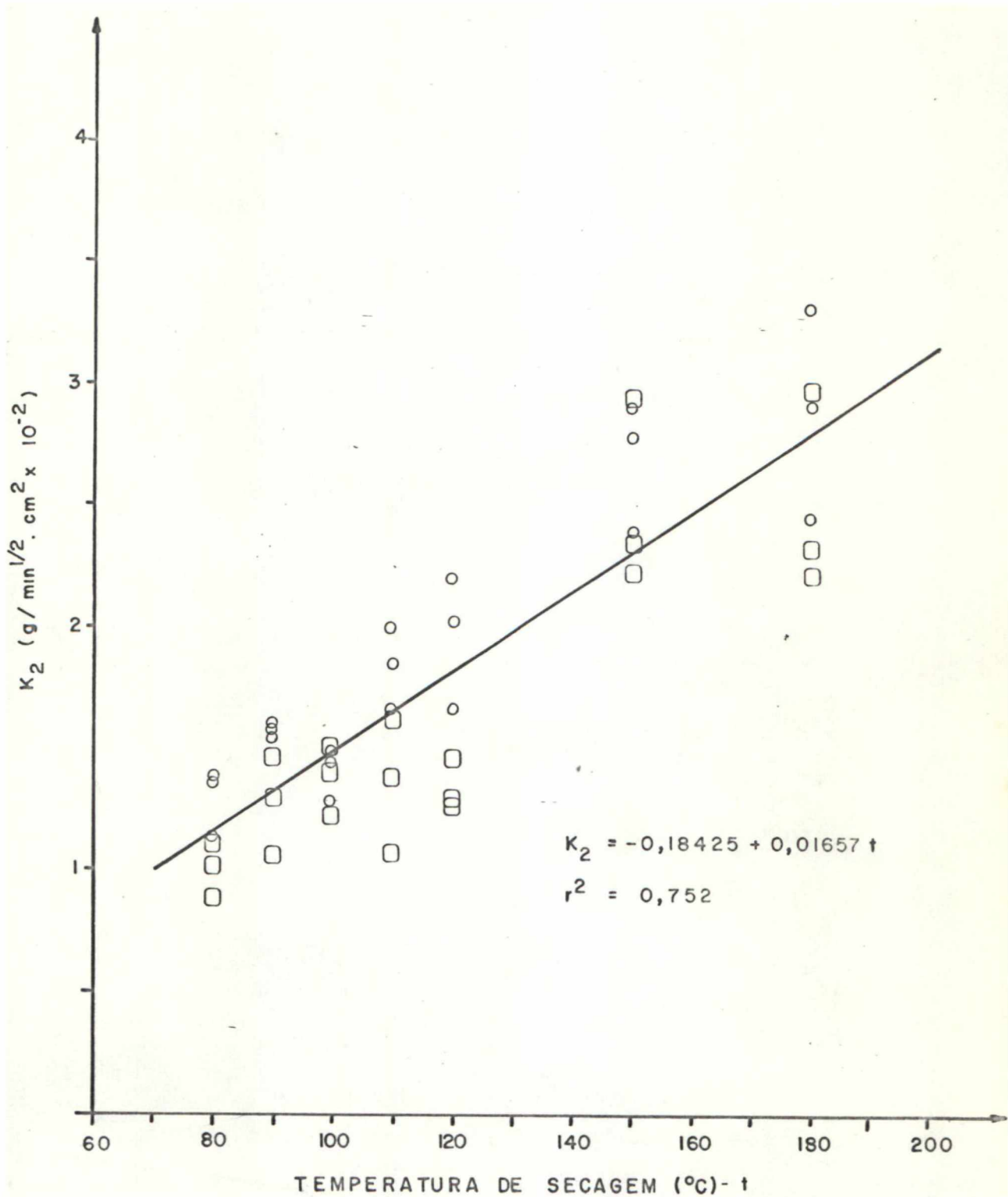


Figura 14 - Relação entre a taxa de secagem durante o segundo estágio (K_2) e a temperatura de secagem

(t) para Pinus eliottii

○ - Corpos de prova "tangenciais"

□ - Corpos de prova radiais

r^2 - Coeficiente de determinação

teor de umidade de equilíbrio é significativa em termos de avaliar a estabilidade dimensional do material submetido aos diversos tratamentos, bem como na análise de suas implicações na contração e no peso específico, pois basicamente pode ser procedida a análise de duas maneiras (Skaar, 1976):

- a) comparar as propriedades da madeira a um mesmo teor de umidade;
- b) comparar as propriedades da madeira que foi submetida a diferentes tratamentos após acondicionada à um mesmo ambiente.

Esta segunda opção, é sem sombra de dúvida mais prática, uma vez que a madeira quando em serviço não manterá um teor de umidade fixo, e sim estará em equilíbrio com o ambiente. O teor de umidade de equilíbrio dependerá, evidentemente, de uma série de fatores inerentes ao material (Jankowsky, 1979), mas o tratamento a que foi submetido é de grande importância (Stamm et al., 1955).

O teor de umidade obtido para a madeira de Pinus elliottii seco nas diferentes temperaturas em estufa de laboratório até um teor de umidade final aproximado de 8% e posteriormente acondicionado em ambiente com temperatura de 20° - 29°C e umidade relativa de 65% - 3%, é mostrado no quadro 6. Os dados apresentados representam médias de 12 corpos de prova para cada tratamento (6 utilizados na determinação da taxa de secagem e 6 utilizados na determinação da contração).)

QUADRO 6 - TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO (U_{equil}) PARA MADEIRA Pinus elliottii SECA EM ESTUFA DE LABORATÓRIO.

TEMPERATURA (°C)	n	U _{equil}	s
80	12	11,1	0,491
90	12	10,9	0,558
100	12	8,93	0,700
110	12	8,4	0,513
120	12	8,3	0,660
150	12	8,1	0,688
180	12	7,4	1,03

n - número de corpos de prova

s - desvio padrão.

Como pode ser observado, o teor de umidade de equilíbrio diminui com o aumento da temperatura de secagem.) Esta variação no teor de umidade de equilíbrio é altamente significativa como demonstra a análise de variância (vide Apêndice). O quadro 7 apresenta o resultado de um teste a posteriori (Tukey) para identificar quais os tratamentos que apresentaram diferença significativa entre si.

Comparando-se a umidade de equilíbrio da madeira seca a temperaturas abaixo de 100°C, nenhuma diferença significativa pode ser observada, no entanto, toda a madeira seca a temperaturas abaixo de 100°C apresentou um teor de umidade que difere ao nível de 99% da madeira seca acima de 100°C. Comparando-se somente os valores obtidos para madeira seca em temperaturas acima de 100°C, de uma maneira geral, pode ser afirmado que não existe diferenças significantes no teor de umidade de equilíbrio. A única exceção é para os corpos de prova secos a 180°C que apresentam diferença significativa, ao nível de 95%, no teor de umidade de equilíbrio, quando comparados com corpos de prova secos a 100°C.

QUADRO 7 - TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS ATRAVÉS DO TESTE DE TUKEY (SECAGEM EM ESTUFA PILOTO)

TEMPERATURA (°C)	80	90	100	110	120	150	180
80	-						
90	NS	-					
100	**	**	-				
110	**	**	NS	-			
120	**	**	NS	NS	-		
150	**	**	NS	NS	NS	-	
180	**	**	*	NS	NS	NS	-

* - significante ao nível de 95%

** - significante ao nível de 99%.

Deve-se levar em consideração que a variabilidade inerente ao material, pode de certa maneira estar mascarando os resultados. A metodologia adotada nesta pesquisa leva a vantagem de poder minimizar este efeito através da utilização de corpos de "prova combinados", descritos anteriormente (ver Material e Métodos). Este tipo de metodologia foi demonstrado ser a mais aconselhável quando se estuda o efeito da temperatura de secagem nas propriedades da madeira (Tomaselli, 1977; Oliveira e Tomaselli, 1980).

Para fins de comparação, pode-se levar em consideração que todos os corpos de prova provenientes de uma determinada amostra, portanto, com os mesmos anéis de crescimento e características idênticas, iriam se comportar da mesma maneira se a temperatura fosse a mesma. Como já foi apresentado de cada amostra foram retirados 7 corpos de prova submetidos, cada um deles, a uma temperatura de secagem. Caso exista uma variação no teor de umidade de equilíbrio isto só poderá ter sido causado pelo tratamento, pois o material é praticamente homogêneo. O quadro 8 apresenta valores de umidade de equilíbrio relativos, calculados pela relação entre a umidade de equilíbrio da madeira seca nas diversas temperaturas dividido pelo valor obtido para a madeira seca à 80°C.

A análise estatística, para fins de comparação com os valores obtidos para o tratamento de 80°C, pode ser agora feita por um teste "t", sendo testado se o desvio em relação a umidade é significativo ou não, pois o valor esperado seria igual à umidade, caso a temperatura não tivesse efeito.

QUADRO 8 - TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO- COMPARAÇÃO DOS VALORES
OBTIDOS PARA MADEIRA SECA À 80°C E OS OBTIDOS NAS OU
TRAS TEMPERATURAS TESTADAS (ESTUFA DE LABORATÓRIO)

TEMPERATURA °C	n	R _u	s
80	12	1,00	-
90	12	1,00	0,069
100	12	0,81 **	0,060
110	12	0,76 **	0,050
120	12	0,75 **	0,063
150	12	0,74 **	0,064
180	12	0,67 **	0,097

n = número de corpos de prova

R_u = razão entre o teor de umidade de equilíbrio com ambiente
à 20°C e 65% U.R. obtida para madeira seca nas diversas
temperaturas e a seca à 80°C

s = desvio padrão

** = desvio da umidade significativa ao nível de 99%.

Os valores do quadro 8 confirmam os resultados obtidos pela análise de variância, ou seja, o teor de umidade de equilíbrio é o mesmo para os corpos de prova secos à 80°C, 90°C, sendo que com a aplicação da alta temperatura existe uma redução significativa. Estes valores, denominados R_u , poderiam ser ainda submetidos a uma análise de variância. No entanto, é certo que isto não traria nenhuma contribuição adicional.

A redução no teor de umidade de equilíbrio observada neste trabalho é ainda maior que a observada em estudos anteriores (Tomaselli, 1977), e a razão principal deve ser relacionada à diferenças de metodologia adotada, como também a diferença entre espécies.

A redução do teor de umidade de equilíbrio é provavelmente devido a pequenas mudanças na estrutura química, em especial a degradação térmica parcial das hemiceluloses (Stamm, 1964), que depende em grande parte da temperatura (Skaar, 1976).

A grande vantagem da redução do teor de equilíbrio foi quantificada por Stamm et al. (1955), em termos de estabilidade dimensional da madeira. A quantidade de estabilização obtida pode ser expressa por um fator denominado pelos autores como "eficiência anti-contração", que é calculado utilizando a equação 18.

$$A_E = 100 (M_n - M_{ht}) / M_n \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

A_E = eficiência anti-contração(%)

M_n = teor de umidade de equilíbrio da madeira seca à temperatura normal (%)

M_{ht} = teor de umidade de equilíbrio da madeira seca em temperaturas elevadas (%).

Considerando-se o valor M_n igual ao obtido para a madeira seca à 80°C, consegue-se uma eficiência de anti-contração de até 33,1% (para a secagem é conduzida à 180°C). Isto significa que a contração e inchamento de Pinus elliotii seco à 180°C é esperado reduzir, em flutuações subsequentes de umidade,

33% quando comparado com madeira seca à 80°C, que é, sem sombra de dúvida, um alto ganho em estabilidade dimensional. Para temperaturas mais baixas, o valor A_E é menor, por exemplo, à 100°C o ganho em estabilidade dimensional em relação à madeira seca à 80°C é de 19,5%, o que é ainda bastante significativo. Observe-se que os valores de A_E obtidos pela equação 18, são exatamente os mesmos obtidos através do desvio de umidade do quadro 8.

4.1.3 - Estudos da Contração

4.1.3.1 - Efeito na Contração

O valores obtidos para a contração em largura e espessura da madeira Pinus Elliottii seca nas diversas temperaturas são apresentados no quadro 9. Estes valores não representam a contração máxima, mas sim, a contração observada do teor de umidade inicial até o teor de umidade de equilíbrio em ambiente à 20°C e 65% de umidade relativa. Acredita-se que estes valores representem melhor a condição prática, uma vez que a madeira raramente seria seca até um teor de umidade igual à 0%, antes de ser colocada em serviço.

QUADRO 9 - CONTRAÇÃO DA MADEIRA DE Pinus elliotii (SECAGEM EM ESTUFA DE LABORATÓRIO)

TEMPERATURA °C	n	ESPESSURA		LARGURA	
		C _{TR} (%)	s	C _{TR} (%)	s
80	12	2,83	1,04	2,38	0,65
90	12	2,55	1,06	2,17	0,67
100	12	3,14	1,65	2,43	0,62
110	12	3,17	1,42	2,23	0,85
120	12	3,49	1,49	2,42	0,78
150	12	3,10	1,13	2,38	0,54
180	12	3,28	1,19	2,39	0,54

n - número de corpos de prova

C_{TR} - contração média

s - desvio padrão.

Como pode ser observado, à medida que a temperatura aumenta, existe uma tendência, embora não muito acentuada, de aumento na contração em espessura. A contração em largura não varia com a aplicação da secagem à temperatura mais elevada. Pelos dados apresentados no quadro 9, a contração como um todo, foi sempre maior em espessura do que em largura. Este aspecto, bem como o aumento da contração com a temperatura de secagem foi observado em estudos anteriores (Tomaselli, 1977).

A afirmação de que a contração em espessura é maior que em largura, independentemente da orientação (radial ou tangencial) é somente válida para temperaturas elevadas (acima de 60°C) como observado por Hann (1965) e Santini (1980). A explicação deste fenômeno foi dada por Hann (1965), baseando-se em um modelo que sugeria que as células da superfície são restringidas a contraírem em largura pelas células do interior (que ainda se encontram acima do ponto de saturação das fibras), enquanto que podem contrair livremente em espessura.

Como pode ser observado no quadro 9, a variabilidade dos dados é bastante alta. Para minimizar esta variação, tentou-se utilizar da vantagem tida pela metodologia adotada. No quadro 10, são apresentados os resultados obtidos da razão entre a contração da madeira submetida às diversas temperaturas e a obtida à 80°C. Somente a diferença entre a contração em espessura à 80°C e à 120°C é significativa ao nível de 95%, sendo que as demais comparações não mostraram diferença significativa. Ao contrário do esperado, a variação apresentada pelos dados foi ainda alta e, embora tenha sido observado aumentos de até 21% na contração, em espessura, como no caso da madeira submetida à secagem em 180°C, este aumento não é estatisticamente significativo. A análise de variância realizada confirma estes resultados (vide Apêndice). Provavelmente um maior número de repetições seria necessário para uma melhor análise do efeito da temperatura na contração da madeira.

Uma melhor visualização do efeito da temperatura na contração da madeira é mostrada graficamente na figura 15. Observe-se que a contração na largura é praticamente coincidente com a "Razão" igual à umidade, em todas as temperaturas testa

QUADRO 10 - CONTRAÇÃO - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES OBTIDOS PARA MADEIRA DE Pinus elliotii SECA À 80°C E OS OBTIDOS NAS OUTRAS TEMPERATURAS TESTADAS (ESTUFA DE LABORATÓRIO)

TEMPERATURA °C	n	ESPESSURA		LARGURA	
		R _{CT}	s	R _{CT}	s
80	12	1,00	-	1,00	-
90	12	0,92	0,26	0,92	0,13
100	12	1,16	0,55	1,04	0,19
110	12	1,18	0,40	0,93	0,20
120	12	1,39*	0,45	1,03	0,21
150	12	1,16	1,15	1,04	0,22
180	12	1,21	0,46	1,01	0,11

n - número de corpos de prova

R_{CT} - razão entre a contração obtida com madeira seca nas diversas temperaturas e a seca à 80°C

s - desvio padrão

* - desvio da umidade significativa ao nível de 99%.

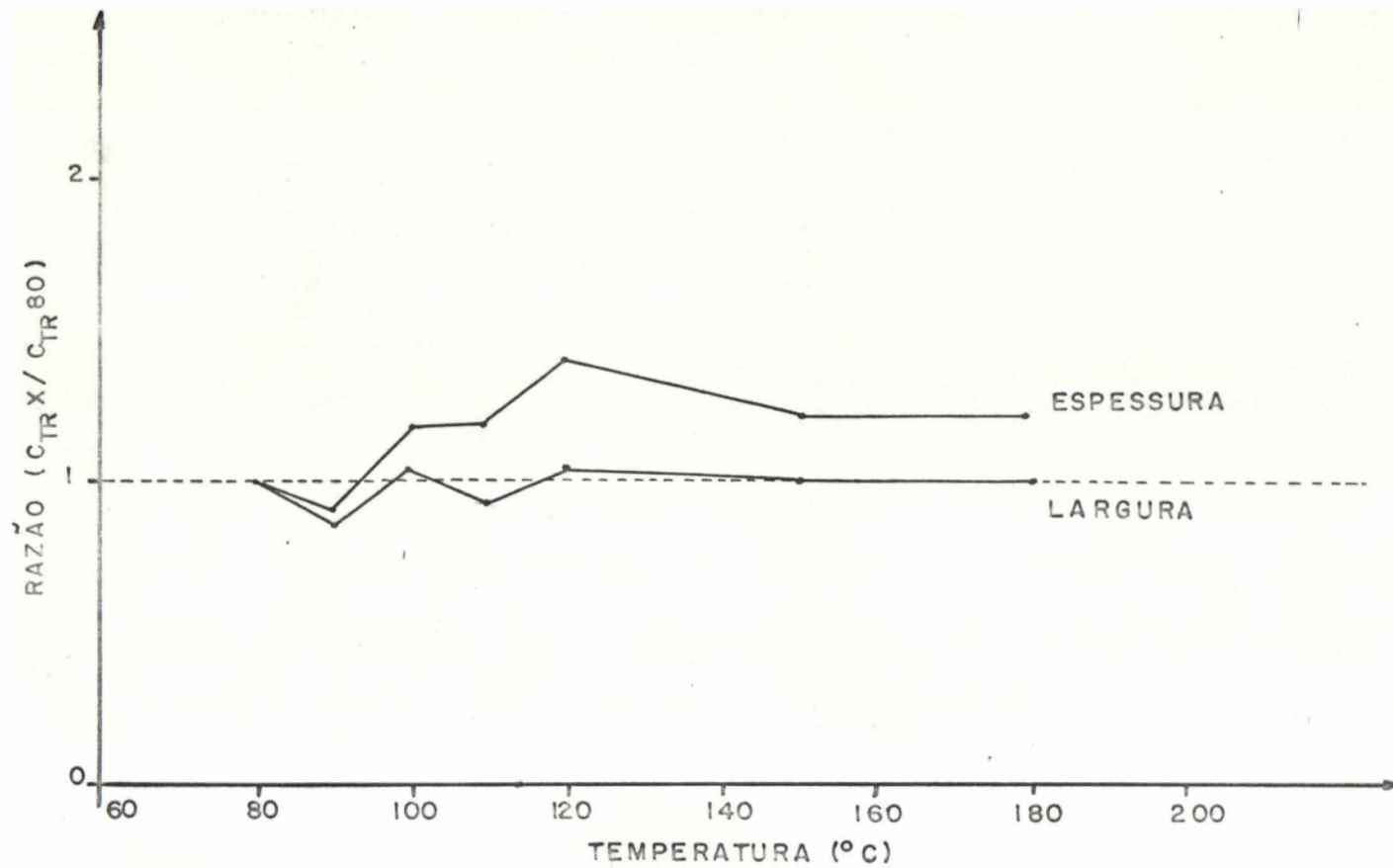


Figura 15 - Efeito da temperatura na contração da madeira de Pinus eliottii -razão entre a contração nas diversas temperaturas (CTR X) e a contração à 80°C (CTR 80) (Alinha tracejada indica a razão igual à unidade - efeito da temperatura é nulo).

das, ou seja, para a contração em largura não há nenhum indício de que a temperatura altere o comportamento da madeira. No entanto, esta observação não pode ser feita para o caso da contração em espessura.

4.1.3.2 -Desenvolvimento da contração

O acompanhamento do desenvolvimento da contração foi feito, como já descrito anteriormente, retirando-se um corpo de prova da estufa, e medindo-se a intervalos pré-determinados. Curvas típicas representando o desenvolvimento da contração com o tempo de secagem para os dois extremos de temperaturas utilizadas neste experimento, são mostrados na figura 16.

Os corpos de prova utilizados para esta observação não foram os mesmos utilizados na determinação da taxa de secagem. No entanto, quando eles eram retirados da estufa para serem medidos, eram, também pesados, possibilitando a determinação da perda de massa, e conseqüentemente da taxa de secagem.

Evidentemente, a taxa de secagem deste corpo de prova não pode ser determinada com a mesma precisão que para os corpos de prova sob pesagem contínua (dados apresentados anteriormente), e nem mesmo a finalidade era esta. O objetivo do acompanhamento da perda de massa foi o de dar indicações superficiais sobre o teor de umidade do corpo de prova e estimar em que estágio de secagem se encontrava o processo.

As análises dos dados mostraram que o objetivo foi atendido, e confirma-se aqui os resultados obtidos em estudos anteriores (Tomaselli, 1977), quais sejam:

- a) a contração durante o primeiro estágio de secagem está ausente ou é mínima. Isto é esperado, pois durante este estágio existe água livre em todas as partes do corpo de prova;
- b) quase a totalidade da contração ocorre durante o segundo estágio, sendo que grosseiramente o seu desenvolvimento é linear em função do tempo de secagem:

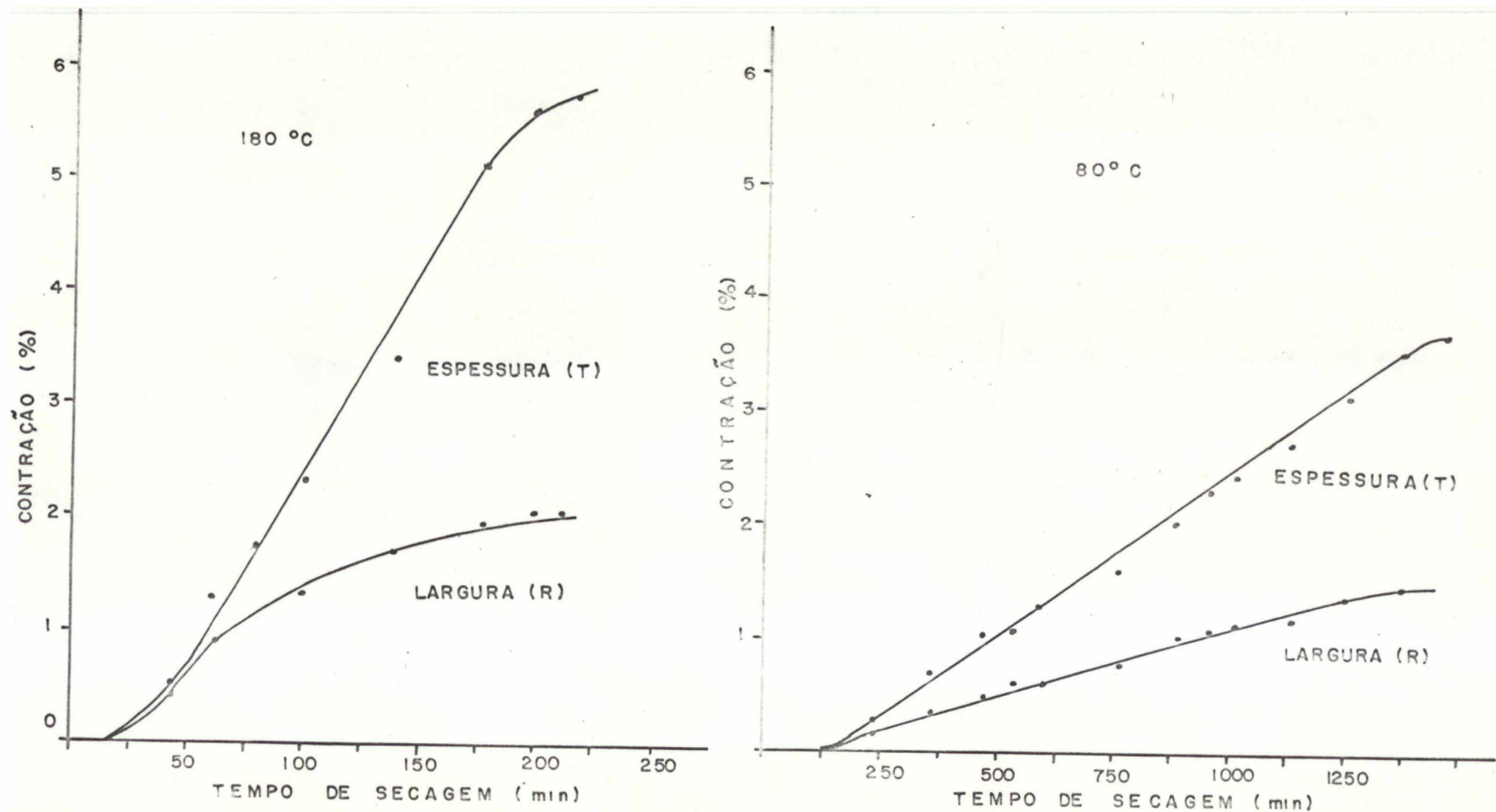


Figura 16 - Desenvolvimento de contração em corpos de prova combinados de Pinus eliottii submetidas a secagem em estufa de laboratório à 80° e 180°C.

c) ao iniciar o terceiro estágio a madeira praticamente já atingiu sua contração máxima.

Estas observações, que foram anteriormente feitas para o caso específico da secagem a alta temperatura, parece serem também aplicáveis para temperaturas abaixo de 100°C. Isto leva a crer que a melhor condição de secagem é aquela que apresenta condições de retirar a maior quantidade possível de água durante o primeiro estágio. Durante este estágio, água livre se encontra distribuída em todo corpo de prova a contração é praticamente inexistente, portanto, tensões internas que poderiam causar defeitos (Wright, 1961), estão teoricamente ausentes. Além disto, é durante o primeiro estágio que a maior taxa de secagem está presente. Baseando-se nestas observações é que foi concluído que a vaporização inicial, desde que criteriosamente aplicada e dependendo da espécie em secagem, pode ser benéfica (Tomasselli, 1977).

4.1.4 - Efeito no Peso Específico Aparente

Para ser observado o efeito da temperatura de secagem na madeira de Pinus elliottii, todos os corpos de prova foram acondicionados em temperatura de 20°C e umidade relativa de 65%. Trata-se, portanto, de uma comparação de material em equilíbrio com uma determinada condição, e não no mesmo teor de umidade.

Como os valores de peso específico aparente não são de interesse direto neste estudo, e tendo sido apresentado anteriormente os dados para o peso específico aparente à 60% (quadro 3), a comparação aqui apresentada é feita utilizando-se da razão entre os valores obtidos para corpos de prova secos nas diferentes temperaturas e os secos à 90°C. Como já salientado os corpos de prova eram "combinados" e pode ser portanto, minimizada a variabilidade inerente ao material.

O quadro 11 mostra que nenhuma diferença existe entre o peso específico aparente à 12% entre a madeira seca à 80°C e a seca nas temperaturas de 90 e 100°C. Por outro lado, quanto ao peso específico aparente dos corpos de prova secos à temperatura de 110°C e superiores a este nível, é comparado com

QUADRO 11 - PESO ESPECÍFICO APARENTE - COMPARAÇÃO NOS VALORES
OBTIDOS PARA MADEIRA DE Pinus elliottii SECA à 80°C
COM OS OBTIDOS NAS OUTRAS TEMPERATURAS TESTADAS (SE
CAGEM EM ESTUFA DE LABORATÓRIO)

TEMPERATURA (°C)	n	R _{PE}	s
80	12	1,000	-
90	12	1,008	0,023
100	12	1,013	0,025
110	12	1,030 *	0,035
120	12	1,017 *	0,020
150	12	1,03 **	0,027
180	12	1,038 **	0,033

n - número de corpos de prova

R_{PE} - razão entre o peso específico aparente em equilíbrio com ambiente (20°C e 65% UR) obtido para madeira seca nas diversas temperaturas e o obtido à 80°C

s - desvio padrão

* desvio da unidade significante ao nível de 95%

** desvio da unidade significante ao nível de 99%

o obtido à 80°C, estes primeiros são estatisticamente mais altos. Deve ser salientado que o aumento no peso específico com as temperaturas mais elevadas, apesar de ser estatisticamente significativo, é de pouca implicação prática uma vez que o aumento máximo (obtido para a temperatura de 180°C) foi em média 3,8%.

Para analisar as diferenças entre os diversos tratamentos em maior detalhe, foi realizada adicionalmente uma análise de variância utilizando-se os valores obtidos, cujas médias são apresentadas no quadro 11. A análise de variância demonstrou haver diferença significativa ao nível de 99% (veja Apêndice). Como se tratavam de valores relativos, tomou-se o cuidado de inicialmente testar-se a normalidade dos dados, o que foi confirmado. O quadro 12 mostra uma comparação realizada pelo teste de Tukey, entre as médias do peso específico aparente de madeiras secadas sob diferentes temperaturas. Como pode ser observado, as conclusões que podem ser tiradas são praticamente as mesmas do quadro 11, onde os valores relativos foram testados quanto ao seu desvio da unidade. Adicionalmente pode ser ainda afirmado que existe diferença significativa também entre o peso específico aparente da madeira seca à 90°C e à 180°C.

«O aumento no peso específico aparente da madeira de Pinus elliottii causado pelo aumento na temperatura de secagem deve provavelmente ter sido causado pelo aumento paralelo na contração do material, o que já foi anteriormente discutido. Estes resultados confirmam estudos conduzidos por Comben (1955), Ladell (1957) e Lantican (1959).

«Como é sabido, existe uma correlação direta entre o peso específico do material e a resistência mecânica. Portanto, é esperado que o aumento na temperatura de secagem possa em primeira análise, causar um aumento na resistência da madeira, como deduzido por Maclean (1945). No entanto, estudos recentes tem demonstrado que este pequeno aumento no peso específico não resulta em aumento na resistência, mas deve, pelo menos e em parte, contribuir para que, caso alguma degradação técnica ocorra, minimize ou compense o efeito da perda de resistência (Tomasel li, 1977). »

QUADRO 12 - PESO ESPECÍFICO APARENTE - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS ATRAVÉS DO TESTE DE TUKEY (SECAGEM CONDUZIDA EM ESTUFA DE LABORATÓRIO)

TEMPERATURA °C	80	90	100	110	120	150	180
80	-						
90	NS	-					
100	NS	NS	-				
110	*	NS	NS	-			
120	NS	NS	NS	NS	-		
150	*	NS	NS	NS	NS	-	
180	**	*	NS	NS	NS	NS	-

NS - não significante

* - significante ao nível de 95%

** - significante ao nível de 99%

4.1.5 - Outras Observações

Apesar de não ter sido o objetivo deste estudo avaliar o efeito dos vários tratamentos na qualidade da superfície e no nível de defeitos, algumas observações foram realizadas.

Em geral, a superfície da madeira apresentou um escurecimento com o aumento da temperatura de secagem. A intensidade deste escurecimento foi mais acentuada com o aumento da temperatura acima de 150°C.

Como citado anteriormente, o processo de secagem era considerado concluído quando o teor de umidade se aproximava de 8%. Este teor de umidade era estimado baseado em amostras de teor de umidade cuja metodologia já foi explicada. No entanto, esta estimativa é passível de erros, e com o término da secagem e a determinação do peso seco, observou-se que haviam diferenças no teor de umidade final. A mudança de cor foi também influenciada por este fator: corpos de prova com um teor de umidade final mais baixo apresentaram uma superfície mais escura.

A intensidade de mudança é correlacionada com a temperatura de secagem e com o teor de umidade final, uma vez que a temperatura próxima à superfície é afetada por estes dois fatores: maiores temperaturas na madeira, no estágio final de secagem, são obtidas à medida que se aumenta a temperatura e diminui-se o teor de umidade (Schneider, 1972, 1973; Tomaselli, 1977). É suposto que com o aumento da temperatura da madeira ocorra uma maior degradação térmica dos extrativos e material protoplasmático trazidos à superfície (Hann, 1965). Paralelamente poderia estar ocorrendo mudanças no grau de polimerização e cristalinidade da celulose (Hillis, 1975).

A exudação da resina foi insignificante, e tanto o escurecimento superficial como a resina exudada à superfície foram totalmente removidos quando a madeira era aplainada, confirmando as observações de Koch (1973, 1974).

Em nenhum caso observou-se a presença de rachaduras superficiais ou internas. Outros defeitos como emperreamentos, abaulamentos, etc, não puderam ser observados principalmen

te devido às pequenas dimensões dos corpos de prova. Uma melhor avaliação destes aspectos será feita para a madeira seca na estufa piloto.

4.2 Secagem em Estufa Piloto

O termo estufa piloto é empregado neste estudo para definir uma estufa de laboratório com características similares às estufas industriais, e que já foi descrita anteriormente. A finalidade principal da condução deste experimento complementar era avaliar a possibilidade de transferir os resultados obtidos em condições de laboratório para uma condição mais próxima da encontrada na prática. Devido as limitações de equipamento, a temperatura máxima testada foi de 120°C.

4.2.1 - Taxa de Secagem

Para a determinação da taxa de secagem nos estudos conduzidos com estufa piloto, três amostras previamente sorteadas, eram retiradas da estufa e pesadas. Manteve-se para as três temperaturas estudadas sempre as amostras provenientes de uma mesma tábua, caracterizando-se desta maneira o sistema de "amostras combinadas". Deve ser salientado que o sistema de "amostras combinadas" utilizadas para esta parte do estudo, não apresenta a mesma eficiência, devido ao comprimento das amostras (40 cm), e a conseqüente dificuldade de se obter os mesmos anéis e tipo de madeira nas três amostras submetidas, cada uma delas, à uma determinada temperatura. Mesmo considerando-se este aspecto, a metodologia empregada deve contribuir para detectar com mais eficiência diferenças entre os três tratamentos.

Devido ao tratamento das amostras serem relativamente grandes, foi difícil definir o final do primeiro estágio, e o segundo estágio de secagem não é analisado neste estudo. A linearidade entre a perda de água e o tempo de secagem pode ser observada nas três temperaturas estudadas: 80, 100 e 120°C, o que é compatível com os resultados obtidos em estufa de laboratório. As taxas de secagem durante o primeiro estágio para a madeira de Pinus elliottii seca em estufa piloto são apresentadas no quadro 13.

QUADRO 13 - TAXA DE SECAGEM DURANTE O PRIMEIRO ESTÁGIO E O TEOR DE UMIDADE INICIAL (U_i) PARA Pinus
elliottii (SECAGEM EM ESTUFA PILOTO)

TEMPERATURA (°C)	AMOSTRA 1		AMOSTRA 2		AMOSTRA 3		K_1	s
	U_i (%)	K_1	U_i (%)	K_1	U_i (%)	K_1		
80	111	0,81	158	1,13	187	1,11	1,02	0,179
100	162	0,96	161	1,15	198	1,13	1,08	0,104
120	190	1,49	160	1,43	192	1,33	1,42	0,081

K_1 - taxa de secagem durante o primeiro estágio ($\text{g}/\text{min cm}^2 \times 10^{-3}$)

s - desvio padrão.

A mesma tendência observada para os estudos na estufa de laboratório é observada: a taxa de secagem aumenta com a temperatura, e este aumento é bastante acentuado quando consideradas temperaturas acima de 100°C.

Comparando-se os valores obtidos na estufa piloto com os obtidos na estufa de laboratório, observa-se que a taxa de secagem obtida na estufa de laboratório, principalmente para as temperaturas de 100 e 120°C, é mais alta do que a obtida na secagem em estufa piloto. Este fato não é esperado, uma vez que na estufa piloto é introduzido um novo fator: a velocidade do ar, que teoricamente deveria aumentar a transferência de calor para a superfície (Lyman, 1963), e conseqüentemente a taxa de secagem, como tem sido mostrado por vários pesquisadores (Kollmann, 1961; Kollmann e Schneider, 1961). O aumento da taxa de secagem com a velocidade do ar é ainda maior quando se trata de madeira com alto teor de umidade inicial, como é o caso do material desta pesquisa.

Observações semelhantes foram feitas em estudos anteriores (Tomaselli, 1977), onde a menor taxa de secagem obtida em estufa piloto foi atribuída ao fato de que a taxa de secagem não seria a taxa à uma determinada temperatura, mas sim a taxa à uma temperatura em aumento. Recomendou-se na referida pesquisa que caso o objetivo fosse comparar os resultados obtidos nas duas diferentes condições, a estufa piloto deveria ser pré-aquecida antes da madeira ser colocada em secagem. Esta recomendação foi aceita e adotada no presente experimento, mas as diferenças existentes ainda são significantes.

As razões destas diferenças devem estar relacionadas a dois aspectos:

- a) mesmo a estufa piloto tendo sido pré-aquecida, a abertura da porta e a introdução do material (que se encontrava em temperatura próxima a do ambiente externo), causou uma redução na temperatura, e a recuperação da temperatura não foi imediata. Portanto, pelo menos em parte, o problema de estar sendo observada uma taxa de

secagem em uma temperatura crescente (em direção ao nível desejado), embora reduzido ainda existiu. Quanto mais alta a temperatura estudada, maior era a redução observada quando introduzia-se a carga para ser dado início à secagem, e maior o tempo para que a temperatura desejada fosse atingida. Portanto, à temperatura mais alta, maiores os erros obtidos;

- b) quando as amostras são retiradas da estufa para serem pesadas, a temperatura das mesmas reduz, mesmo que o tempo seja minimizado, um determinado espaço de tempo é necessário para que as mesmas recuperem a sua condição anterior. O tempo necessário para serem pesadas as amostras é o mesmo nas três diferentes temperaturas, no entanto, se for considerado proporcional ao tempo total de secagem, em temperaturas mais altas as amostras teriam ficado fora da estufa uma maior porcentagem do tempo total de secagem. Conseqüentemente, à medida que a temperatura de secagem aumenta, maior será o desvio entre os dados obtidos para a estufa piloto e de laboratório.

Para que possa ser realmente comparados dados obtidos nas duas condições estudadas, é necessário que a metodologia de pesquisa seja desenvolvida de maneira a minimizar os efeitos acima descritos.

(4.2.2 - Efeito no Teor de Umidade de Equilíbrio)

O teor de umidade de equilíbrio aqui apresentado é obtido, como no caso anterior, para madeira acondicionada à 20°C e 65% de umidade relativa. Os valores são apresentados no quadro 14.

Como pode ser observado no quadro 14, o teor de umidade de equilíbrio mostrou a mesma tendência observada na secagem em estufa de laboratório, ou seja, diminui com o aumento

QUADRO 14 - TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO PARA MADEIRA DE Pinus
elliottii (SFCAGEM EM ESTUFA PILOTO)

TEMPERATURA (°C)	n	UEQUIL	s
80	38	10,83	1,781
100	38	9,95	1,280
120	38	8,51	1,235

n - número de corpos de prova

s - desvio padrão

da temperatura de secagem; Além disto, é interessante ser observado que os valores médios obtidos para a madeira seca em estufa de laboratório, são relativamente próximos aos obtidos em estufa convencional a qual, por sua vez, representa uma situação próxima da prática (ver quadro 6). Isto leva a concluir que para a variável em análise é possível, até certo ponto, extrapolar-se os resultados de laboratório para uma situação industrial.

A análise de variância conduzida mostrou que existe diferença significativa ao nível de 99% de probabilidade (ver apêndice). Um teste à posteriori entre as médias é apresentado no quadro 15, e a diferença entre as médias é em todas as comparações altamente significativa. Esta observação confirma os resultados obtidos em condições de laboratório com pequenos corpos de prova.

Como quando da análise dos resultados obtidos em estufa de laboratório, é também adicionalmente feita uma comparação dos valores médios da razão entre a umidade de equilíbrio obtida nas diversas temperaturas e a obtida para madeira seca à 80°C (quadro 16). Este quadro, além de possibilitar uma comparação minimizando-se a variabilidade, dá condições de que se obtenha diretamente, como já discutido, os valores de "anti - contração" (A_E), calculados através da equação 18 (p. 74), sugerida por Stamm (1964). Os resultados mostram que a madeira de Pinus elliotii seca em estufa convencional a uma temperatura de 120°C, é cerca de 20% mais estável dimensionalmente do que a seca à 80°C, quando submetida à flutuações posteriores de umidade relativa. Isto é sem sombra de dúvida, um ganho importante em termos de utilização final, como já foi salientado. Acredita-se que as causas da redução da umidade de equilíbrio devido à temperatura já tenham sido suficientemente discutidos no item 4.1.2, e uma repetição dos aspectos levantados não trariam nenhuma contribuição nova a este estudo.

QUADRO 15 - TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS
ATRAVÉS DO TESTE DE TUKEY (SECAGEM EM ESTUFA PILOTO)

TEMPERATURA	80	100	120
80	-		
100	**	-	
120	**	**	-

** - significante ao nível de 99%

QUADRO 16 - TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO - COMPARAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS PARA MADEIRA Pinus elliottii SECA À 80°C COM OS OBTIDOS NAS OUTRAS TEMPERATURAS TESTADAS (ESTUFA PILOTO)

TEMPERATURA °C	n	R_u	s
80	38	1	-
100	38	0,932 **	0,129
120	38	0,797 **	0,107

n - número de corpos de prova

R_u - razão entre o teor de umidade de equilíbrio obtido para a madeira seca nas temperaturas testadas e a seca à 80°C

s - desvio padrão

** desvio da umidade significativa ao nível de 99%.

4.2.3 - Efeito na contração

No quadro 17 são apresentados os resultados obtidos para contração do estado verde até o estado de equilíbrio com um ambiente de 20°C e 65% após a secagem em estufa convencional, nos três níveis de temperatura estudados.

A contração em espessura aparentemente aumenta com a temperatura, enquanto que a largura da amostra se mantém praticamente constante. Estes dados estão de acordo com os observados para a estufa de laboratório. A variabilidade no entanto é ainda bastante grande, mesmo que o número de repetições tenha sido aumentado significativamente.

Para que seja minimizado esta possibilidade, a mesma metodologia anteriormente utilizada, foi adotada para análise. Observando-se o quadro 18, a contração à 120°C é altamente significativa quando comparada com a contração à 80°C. É importante lembrar que foi também a temperatura de 120°C, na secagem conduzida em estufa de laboratório, a que apresentou diferença significativa. Pode-se ainda notar que nesta temperatura ocorreu um aumento, embora não significativo, na contração em largura. Mesmo em coleta de novas informações em bibliografias, e análises mais detalhadas não foi possível encontrar uma explicação satisfatória para este fenômeno. Sugere-se que a causa esteja possivelmente relacionada à um "ponto crítico" da secagem onde uma grande compressão residual causa reduções nas dimensões da tábua. Esta possibilidade foi levantada por Cech (1964), e a compressão residual seria menor à temperaturas mais elevadas devido a um amolecimento da estrutura celular, em particular a lignina (Hillis, 1975).

Para que pudesse ser melhor avaliado o efeito da temperatura na contração da madeira de Pinus elliottii seca em estufa convencional, foi realizada uma análise de variância baseando-se nos dados cujas médias são apresentadas no quadro 18. Esta análise mostrou que existe uma diferença em contração, significativa ao nível de 99%, para a espessura. Isto já era esperado baseando-se nas análises realizadas para a madeira seca em estufa de laboratório, pois o número de repetições é agora bem maior.

QUADRO 17 - CONTRAÇÃO DA MADEIRA DE Pinus elliotii SECA EM ESTUFA CONVENCIONAL.

TEMPERATURA	n	ESPESSURA		LARGURA	
		C_{TR}	s	C_{TR}	s
80	38	3,10	1,06	2,62	0,82
100	38	3,25	1,08	2,57	0,78
120	38	3,74	0,93	2,91	0,99

n - número de corpos de prova

C_{TR} - contração média

s - desvio padrão

QUADRO 18 - CONTRAÇÃO - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES OBTIDOS PARA MADEIRA DE Pinus elliottii SECA À 80°C E OS OBTIDOS NAS OUTRAS TEMPERATURAS (ESTUFA CONVENCIONAL)

TEMPERATURA °C	n	ESPESSURA		LARGURA	
		R _{CT}	s	R _{CT}	s
80	38	1,00	-	1,00	-
90	38	1,02	0,41	0,99	0,22
100	38	1,30 ^{**}	0,55	1,09	0,29

n - número de corpos de prova

R_{CT} - razão entre a contração obtida com a madeira seca nas diversas temperaturas e a seca à 80°C

s - desvio padrão

** - desvio da unidade significante ao nível de 99%

4.2.4 - Efeito no Peso Específico Aparente

Como nos estudos em estufa de laboratório os resultados para peso específico aparente aqui apresentados são somente a razão entre os valores obtidos para a madeira seca nas diversas temperatura e as obtidas para a seca à 80°C. É esperado que apesar dos sistema de amostras "combinadas" não ser da mesma eficiência que no caso da secagem em estufa de laboratório, algum ganho possa ser obtido na diminuição da variabilidade e com isto poder-se-ia detectar com mais facilidade, possíveis diferenças entre as temperatura testadas. O peso específico aparente aqui considerado é para a madeira com um teor de umidade em equilíbrio com a temperatura de 20°C e 65% de umidade relativa.

Os resultados obtidos são apontados no quadro 19. Como poder ser observado, existe um aumento no peso específico aparente à 12%, para a madeira seca à 100 e 120°C, quando compondo-se com a seca à 80°C. Este aumento é significativo ao nível de 95% e os valores obtidos são aproximadamente os mesmos que os obtidos na secagem em estufa de laboratório.

Para uma melhor comparação dos resultados, realizou-se uma análise de variância (ver apêndice). A comparação à posteriori das médias através do teste de Tukey demonstrou não haver diferenças entre as temperaturas de 100 e 120°C (quadro 20), o que está de acordo com os resultados obtidos na estufa de laboratório. As razões do aumento do peso específico aparente devem estar relacionadas com o aumento da contração da madeira como já foi discutido.

QUADRO 19 - PESO ESPECÍFICO APARENTE - COMPARAÇÃO DOS VALORES
OBTIDOS PARA MADEIRA DE Pinus elliotii SECA À
80°C COM OS OBTIDOS NAS OUTRAS TEMPERATURAS TESTA
DAS (SECAGEM EM ESTUFA PILOTO)

TEMPERATURA °C	n	R _{PE}	s
80	38	1	-
100	38	1,018 *	0,048
120	38	1,023 *	0,061

n - número de corpos de prova

R_{PE} - razão entre o peso específico aparente em equilíbrio co
mo..... ambiente (20°C e 65% UR) obtido para a madeira seca
nas diversas temperaturas e o obtido à 80°C

s - desvio padrão

* - desvio de umidade significativa ao nível de 95%.

QUADRO 20 - PESO ESPECÍFICO APARENTE - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS ATRAVÉS DO TESTE DE TUKEY (SECAGEM EM ESTUFA PILOTO)

TEMPERATURA	80	100	120
80	-		
100	*	-	
120	*	NS	-

NS - não significante

* - significante ao nível de 95%

4.2.5 - Outras Observações

A influência da temperatura de secagem na aparência da madeira e nos níveis de defeitos foi também observada para a secagem conduzida em estufa piloto, apesar de não ter sido o objetivo principal deste estudo.

A madeira seca à 120°C apresentou um leve escurecimento superficial, sendo que este problema é praticamente inexistente na secagem em temperaturas de 80°C e 100°C. O escurecimento superficial foi intensificado à medida que o teor de umidade final diminuía. No caso da estufa piloto, devido à dificuldades de um controle apurado do teor de umidade final de cada amostra individualmente, a variação deste valor foi bastante acentuada (entre um máximo de 28% e um mínimo de 1,5%). Isto fez com que as diferenças na intensidade do escurecimento foram bastante acentuada.

Estes resultados diferem dos obtidos para a estufa de laboratório, onde o escurecimento superficial foi somente acentuado na temperatura de 150°C e acima. Esta diferença é provavelmente causada pelo fator velocidade do ar que foi introduzido na secagem em estufa convencional. Com o aumento da velocidade do ar existe uma maior transferência de calor à superfície, e como já detectado experimentalmente o aumento da temperatura da madeira próxima à superfície é diretamente correlacionado, para uma determinada condição de secagem, com a velocidade do ar (Tomasselli e Grossman, 1980). As razões do escurecimento da superfície já foram discutidas anteriormente (item 4.1.5).

A exudação de resina esteve praticamente ausente como o observado nos corpos de prova secos em estufa de laboratório. No entanto, em amostras que apresentavam nós ou pequenas bolsas de resina, esta exudação foi bastante acentuada com o aumento da temperatura. Este problema não foi observado no caso dos corpos de prova pequenos, uma vez que estes eram livres de defeitos. Os nós, além de causarem a exudação acentuada de resina nas temperaturas mais elevadas, fizeram com que em áreas próximas à sua localização fossem observadas distorções do material e irregularidades na "topografia" da superfície. Estes defeitos

estiveram presentes em praticamente todas as amostras que tinham nó, independente da temperatura utilizada. Isto pode ser explicado pelo desvio da grã e outras irregularidades da estrutura existente na área próxima aos nós (Kollman e Côté, 1968).

Como no caso dos pequenos corpos de prova secos em estufa de laboratório, os problemas de escurecimento superficial e da exudação da resina não afetaram a qualidade final do material em termos de aparência, uma vez que foram totalmente removidos quando as amostras foram aplainadas. Observações semelhantes foram feitas por Koch (1973, 1974).

Como pode ser observado na figura 10 (material e métodos), a pilha em secagem foi submetida a restrição durante o processo. A restrição da madeira durante a secagem é mencionada como sendo um fator de alta importância para a secagem à alta temperatura minimizando o aparecimento de defeitos como empenamentos e abaulamentos (Mackay, 1973). Um menor nível de defeitos pode ser obtido quando, além do uso da restrição da pilha, a madeira é pré e pós-vaporizada. Segundo alguns autores, a combinação destes tratamentos induz à uma "plasticização" da madeira (Mackay e Rumball, 1971, 1972; Radiata Pine Association of Australia, 1975). Neste estudo a vaporização inicial e final não foi empregada, pois o objetivo principal não foi o de observar o nível de defeitos, como já salientado anteriormente. Desta maneira, os resultados aqui relatados com respeito a este parâmetro, poderão não estar refletindo, em sua totalidade, a situação prática.

Comparando-se os três tratamentos, o maior nível de defeitos foi observado na temperatura de 80°C, representado principalmente por encanoamentos. O empenamento, citado como um dos principais problemas na secagem de madeira juvenil de Pinus de rápido crescimento (Christensen, 1969), esteve praticamente ausente. No entanto, é bom salientar que este defeito é somente significativo, ou pode ser melhor observado, quando o material submetido a secagem tem maiores comprimentos. Neste estudo as amostras utilizadas tinham um comprimento de somente 40 cm. O número de rachaduras superficiais e fendas internas não foi significativo em nenhuma das temperaturas testadas, o que confirma resultados obtidos por outros autores (Koch, 1972).

4.3 - Consumo de Energia

O consumo de energia apresentado nesta tese tem a finalidade única e exclusiva de comparar o consumo entre temperaturas, uma vez que nem a estufa de laboratório nem a estufa piloto apresentam a situação prática. A estufa piloto poderia estar mais perto da situação prática, no entanto, a metodologia utilizada não foi dirigida a esta finalidade, mas sim realizar um estudo comparativo e verificar, pelo menos em parte a aplicabilidade industrial dos resultados obtidos em laboratório com pequenos corpos de prova.

O consumo de energia em estufa de laboratório, para as diversas temperaturas é mostrado no quadro 21. O consumo total reapresenta a soma da energia dispendida no aquecimento até a temperatura indicada, e para a secagem do teor de umidade inicial até 8%. Os valores de umidade inicial são apresentados no quadro 1.

Como esperado, nem todos os corpos de prova foram secos até o mesmo teor de umidade final desejado (8%). Em alguns casos, o valor foi menor e em outros casos a secagem foi conduzida até teores de umidade acima de 8%. A priori, isto apresentaria um problema na comparação entre os tratamentos, no entanto, após ter sido observado que o consumo de energia era linear em função do tempo, este problema pode ser solucionado. A solução gráfica foi adotada, sendo que os valores puderam ser obtidos diretamente no caso dos corpos de prova que apresentavam um teor de umidade abaixo de 8%, e no caso dos corpos de prova que necessitavam de mais tempo para atingir este valor, o tempo foi estimado em função da taxa de secagem. Acredita-se que esta solução não induz a erros significantes e de maneira nenhuma tornam os resultados menos confiáveis.

Analisando-se os dados apresentados no quadro 21, observa-se que com o aumento da temperatura, ocorre uma diminuição no consumo de energia total. Como é esperado, o consumo de energia para o aquecimento aumenta com a temperatura, no entanto este aumento é muito menos significante que a redução do consumo durante o processo de secagem. A diminuição do consumo total é significante, chegando a ser de até 37% quando comparando-se a

QUADRO 21 - CONSUMO DE ENERGIA EM Kwh PARA CORPOS DE PROVA DE Pinus elliottii SUBMETIDO À SECAGEM EM ESTUFA DE LABORATÓRIO NAS DIFERENTES TEMPERATURAS

TEMPERATURA (°C)	CORPO DE PROVA									- CT
	7			6			5			
	Caq	Cs	CT	Caq	Cs	CT	Caq	Cs	CT	
80	0,34	5,25	5,59	0,37	5,90	6,27	0,38	4,1	4,48	5,45
90	0,41	5,30	5,71	0,42	5,75	6,17	0,45	3,85	4,30	5,39
100	0,43	4,60	5,03	0,48	5,90	6,38	0,50	3,75	4,25	5,22
110	0,52	3,40	3,93	0,56	4,50	5,06	0,54	3,15	3,69	4,23
120	0,58	2,85	3,43	0,61	3,70	4,31	0,63	3,00	3,63	3,79
150	0,91	2,70	3,61	0,95	3,05	4,00	0,87	2,80	3,67	3,76
180	1,30	2,00	3,30	1,31	2,35	3,66	1,23	2,20	3,43	3,46

Caq - Consumo durante o aquecimento (estufa vazia)

C_s - consumo durante a secagem

CT consumo total

CT - média do consumo para os três corpos de prova testados

temperatura de 80°C. e 180°C.

É interessante observar que a redução mais significativa ocorre entre a temperatura de 100 e 110°C, o que pode ser melhor observado na figura 17. Esta diminuição repentina entre a temperatura igual a do ponto de ebulição da água, e a temperatura testada no primeiro nível acima, leva a concluir que realmente existe uma vantagem em secar madeira em alta temperatura, sob o ponto de vista do consumo de energia.

A razão deste fato poderia ser devido à presença do fluxo hidrodinâmico na secagem à alta temperatura como amplamente discutido por Hann (1964, 1965). No entanto, acredita o autor que este não seja o único fator. Os resultados desta pesquisa, anteriormente apresentados e discutidos, mostram evidências de que não existe uma fase definida onde o fluxo passa a ser hidrodinâmico, mas sim que o fluxo hidrodinâmico aumenta gradativamente a sua participação no total do movimento de massa de água com o aumento da temperatura.

O outro fator que possivelmente deve estar contribuindo é a maior eficiência obtida na transferência de calor à superfície da madeira quando a secagem é conduzida acima de 100°C. Como já mostrado por vários autores (Fleischer, 1953; Hann, 1965; Tomaselli, 1977), qualquer que seja a temperatura de secagem (quando consideradas temperatura acima do ponto de ebulição da água e pressões normais), a madeira permanecerá à 100°C, ou próximo deste valor, desde que a água livre esteja presente. Com isto, a diferença entre a temperatura de secagem e a temperatura da madeira tende ser maior, e é esta diferença que determina a quantidade de calor transferida à superfície, tanto no caso de irradiação como convecção, conforme as equações apresentadas.

O consumo de energia na estufa convencional, para as três temperaturas testadas é apresentada no quadro 22. Estes valores representam o consumo para secar madeira de Pinus elliottii do estado verde (teor de umidade inicial médio de 170%) até um teor de 8%. Como pode ser observado, a tendência principal, ou seja, a diminuição no consumo de energia com o aumento da temperatura de secagem acima de 100°C, também se encontra presente

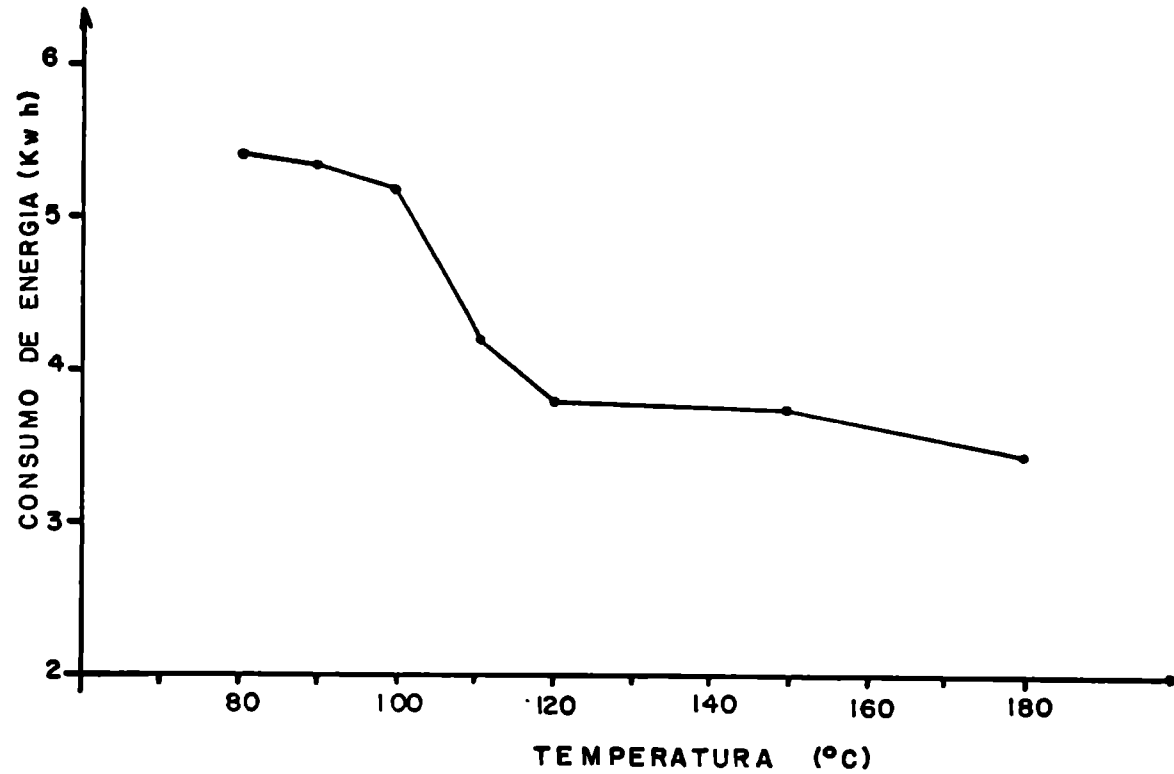


Figura 17 - Consumo total de energia para secagem de Pinus elliottii em estufa de laboratório nas diversas temperaturas.

QUADRO 22 - CONSUMO DE ENERGIA EM Kwh PARA A SECAGEM DE MADEIRA
DE Pinus elliotii EM ESTUFA CONVENCIONAL NAS DI
FERENTES TEMPERATURAS

TEMPERATURA °C	Câq	CS	CT
80	7	83	90
100	8	85	93
120	9	65	74

Câq - consumo durante o aquecimento (estufa vazia)

C_s - consumo durante a secagem

CT - consumo total.

A linearidade total entre o tempo de secagem e o consumo de energia não foi observada nos experimentos conduzidos na estufa convencional. Observou-se que existiu um período inicial de ajustamento, após o qual a linearidade esteve presente. Atribui-se este fato ao aquecimento da carga (que foi colocada na estufa quando esta já se encontrava na temperatura desejada), que neste caso já representou um volume significativo, e consequentemente uma quantidade expressiva de energia é gasta para que a carga seja aquecida (Fricke, 1976). Embora não seja da mesma magnitude, uma determinada quantidade de energia é também gasta para aquecer o ar que entrou na câmara com a abertura da porta, para que pudesse ser introduzida a carga.

Estas análises levam a crer que o consumo de energia durante o aquecimento deve provavelmente ser maior do que o apresentado no quadro 22 (o qual não inclui o aquecimento da pilha), no entanto, nenhuma alteração significativa é esperada no consumo total.

Devido à metodologia adotada na obtenção dos corpos de prova ("combinados"), a diferença no teor de umidade inicial é relativamente pequena, e os resultados aqui apresentados não devem ter sido alterados por este fator, tanto para os estudos conduzidos em estufa de laboratório como para os conduzidos em estufa piloto.

Os resultados aqui obtidos são semelhantes aos obtidos por Koch (1972), em condições experimentais diferentes. Acredita-se que, dentro de determinados padrões (equipamento adequado, controle preciso do processo, etc), poder-se-ia conseguir resultados semelhantes na aplicação prática, o que representa sem sombra de dúvida, uma economia substancial de energia.

5. CONCLUSÕES

A metodologia adotada em uma pesquisa é de extrema importância e depende principalmente dos objetivos a serem alcançados. A sistemática de corpos de prova "combinados" adotada neste experimento mostrou ser uma boa opção dentro do estudo, minimizando a variabilidade e possibilitando desta maneira detectar diferenças com um número de amostras relativamente reduzido.

As teorias desenvolvidas para a secagem à alta temperatura, considerando-se três fases distintas, é também aplicável a temperaturas abaixo de 100°C. Observou-se que a linearidade entre o tempo de secagem e a quantidade de água removida, o que define a taxa de secagem no primeiro estágio, esteve presente mesmo em temperaturas de 80°C, tanto para a secagem em estufa de laboratório (sem circulação de ar forçada) como para a estufa piloto (com circulação forçada). A mesma observação é válida considerando-se o segundo estágio de secagem, quando a perda de água é linear, em função da raiz quadrada do tempo.

Confirmou-se neste estudo que o teor de umidade inicial não afeta a taxa de secagem durante o primeiro estágio, e que as correlações obtidas em estudos anteriores com Pinus radiata são uma consequência da porcentagem de lenho juvenil presente no corpo de prova, como então suposto. Acredita-se que a taxa de secagem durante o segundo estágio, além de ser influenciada pelo teor de umidade inicial (correlação positiva), é também afetada pelo peso específico da madeira.

A equação desenvolvida neste estudo correlacionando a temperatura e a taxa de secagem para Pinus elliottii, durante o primeiro estágio, apresentou um excelente ajuste ($r^2 = 0,96$). Esta equação é não linear, fato este que era esperado, uma vez que a equação foi desenvolvida baseando-se em dados obtidos na estufa de laboratório e a maior parte do calor transferido ao corpo de prova foi por radiação, cuja emissividade varia na quarta potência da temperatura. Para o segundo estágio, a equação da reta foi a melhor opção, no entanto o ajuste foi afetado pelas variações na taxa dentro de uma determinada temperatura,

causadas por diferenças no teor de umidade inicial e no peso específico do material.

Para a madeira de Pinus elliotii a taxa de secagem à 180°C, durante o primeiro estágio é cerca de 5 vezes mais alta do que a 80°C. Uma observação importante é que não existe uma mudança abrupta neste valor comparando-se temperaturas imediatamente abaixo e acima do ponto de ebulição da água. Isto leva a concluir que o fluxo hidrodinâmico, citado como o principal responsável pelo movimento da água acima de 100°C, provavelmente está também presente abaixo deste nível. Sugere-se que não existe um ponto crítico de transição, mas sim à medida que a temperatura aumenta, o fluxo hidrodinâmico tem uma maior participação no total de massa removida. Há necessidade de condução de novos experimentos nesta área, em condições de laboratório sob controle rigoroso da temperatura, considerando-se intervalos menores.

Aparentemente a maior vantagem da secagem à alta temperatura é ligada ao fato da temperatura da superfície da madeira manter-se a uma temperatura constante durante o primeiro estágio (máximo de 100°C). Desta maneira, há possibilidade de que a diferença entre a temperatura do ambiente e a da superfície seja acentuada. Como a taxa de secagem depende da quantidade de calor transferido à superfície, e esta quantidade, por sua vez, depende da diferença existente entre as temperaturas da superfície e a do ar, uma maior eficiência pode ser alcançada no processo de secagem à alta temperatura.

↳ O teor de umidade de equilíbrio diminui com o aumento da temperatura, principalmente quando considerado temperaturas acima de 100°C. Utilizando-se de equações propostas por outros pesquisadores, é esperado que o material seco à 180°C seja cerca de 33% mais estável dimensionalmente do que o seco à 80°C. Este valor representa um ganho considerável em estabilidade dimensional. Novas pesquisas deverão ser conduzidas para verificar experimentalmente a estimativa apresentada. ↳

A contração em espessura aparentemente foi mais afetada pelo aumento da temperatura do que a em largura. Confirmou-se também que a contração da madeira ocorre quase que em sua

totalidade durante o segundo estágio de secagem, estando praticamente ausente no primeiro estágio. Portanto qualquer técnica que venha a ser empregada para que o primeiro estágio seja mais longo, e o responsável pela retirada da maior quantidade de água possível, é sempre desejável. É durante o primeiro estágio que a maior taxa é observada, e a inexistência de contração estaria associada com a ausência de tensões internas, fator este indesejável em qualquer processo de secagem.

O peso específico aparente da madeira de Pinus elliottii foi pouco afetado pelo aumento da temperatura. Mesmo que tenham sido observadas diferenças estatisticamente significantes, os valores obtidos não são de implicação prática. O aumento do peso específico com a temperatura é provavelmente causado pelo aumento da contração.

A não ser pelo escurecimento superficial, praticamente nenhuma diferença pode ser observada na qualidade da madeira seca nas diversas temperaturas. Este escurecimento desaparece completamente quando a madeira é aplainada.

Baseando-se nos resultados desta pesquisa, o consumo de energia para a secagem da madeira de Pinus elliottii diminui sensivelmente com o aumento da temperatura. É bastante interessante observar que a diminuição no consumo é somente significativa com o aumento da temperatura acima de 100°C, especialmente entre 100 e 110°C. A razão principal deve estar relacionada à maior eficiência do processo, com mais evidência no primeiro estágio de secagem, devido a maiores diferenças obtidas entre a temperatura do ar e a da superfície da madeira. O consumo de energia para a secagem da madeira de Pinus elliottii em estufa de laboratório é reduzido em aproximadamente 40% quando a temperatura é aumentada de 80° à 180°C. Este aspecto é de extrema importância na atualidade, onde é buscado a redução do consumo de energia em todos os setores.

Uma alta compatibilidade foi observada entre os dados obtidos na estufa de laboratório e os obtidos em estufa piloto, em todos os aspectos deste estudo: taxa de secagem, influência nas propriedades da madeira e consumo de energia. A estufa piloto possui características semi-industriais, e acredita-se

que os resultados aqui apresentados e discutidos possam ser, em sua maioria, transferidos para a utilização prática. No entanto, sugere-se que previamente sejam conduzidas novas pesquisas utilizando-se material de maiores dimensões, para ser melhor avaliado o efeito das temperaturas de secagem utilizadas neste estudo no nível de defeitos da madeira.

--

RESUMO

Pequenos corpos de prova de *Pinus elliottii* com dimensões de 25 mm X 70mm X 130 mm foram submetidos a secagem em estufa de laboratório, sem circulação de ar forçada, à temperaturas variando entre 80 e 180°C. Um estudo paralelo foi conduzido em estufa convencional com tábuas com 25 mm de espessura, 400 mm de comprimento e larguras variáveis, com temperaturas variando de 80°, 100° e 120°C, para ser avaliada a aplicação prática dos resultados obtidos no laboratório.

Uma avaliação da taxa de secagem durante o primeiro e segundo estágio de secagem, demonstrou que não existe uma mudança abrupta com a utilização de temperaturas acima de 100°C. Isto leva a concluir que os princípios físicos envolvidos são basicamente os mesmos. O fluxo hidrodinâmico deve também estar presente em temperaturas abaixo de 100°C. As análises permitiram ainda confirmar suposições de estudos passados sobre a influência de parâmetros como teor de umidade inicial e peso específico, na taxa de secagem.

O teor de umidade de equilíbrio da madeira diminui com o aumento da temperatura, principalmente acima de 100°C, e ganhos considerados em estabilidade dimensional são esperados. A contração em espessura foi afetada pela temperatura de secagem. (aumento da contração com a temperatura) enquanto que a largura permaneceu inalterada. Este aumento na contração acompanhado por um aumento no peso específico aparente do material.

Em termos de aparência do material e nível de defeitos, a única diferença observada foi um leve escurecimento superficial, o que desaparece completamente com o aplainamento. Outros defeitos, como rachaduras superficiais e internas, empenamentos, etc, estiveram praticamente ausentes.

O consumo de energia diminui significativamente com o aumento da temperatura, e isto é evidente principalmente na faixa compreendida entre 100 e 120° C. Acredita-se que na secagem à alta temperatura exista uma maior eficiência na transferência de calor à superfície do material, devido às leis físicas

que regem o processo de transferência de calor e devido às condições da superfície principalmente durante o primeiro estágio. A redução no consumo de energia é de cerca de 40% quando comparando temperaturas de 80° e 180°C.

Os resultados obtidos na estufa piloto demonstram que a maioria das informações coletadas utilizando-se pequenos corpos de prova podem ser transferidos para a aplicação prática.

SUMMARY

Small Pinus elliotii matched wood samples measuring 25 mm X 70 mm X 130 mm were dried in an oven at temperatures varying from 80 to 180°C. A parallel investigation was carried out in a laboratory conventional kiln type, drying small boards at 80, 100 and 120°C. The objective of the parallel experiment was mainly to investigate the applicability of the oven results in a practical situation.

An evaluation of the rate of drying during the first and second stages did not show any abrupt change with temperature when increasing above 100°C. This may be due to the fact that the physical principles involved when drying below and above 100°C are essentially the same. Apparently the hydrodynamic flow is present in all drying temperature levels tested. Most of the results obtained in this experiment are in general agreement with past investigations.

The equilibrium moisture content of wood decreases as the drying temperature increases, and this represents a significant advantage in terms of wood dimensional stability. The thicknesses shrinkage increases with temperature, but width shrinkage does not change. The higher shrinkage for wood dried at a higher temperature results in an increase in the wood density,

Wood surface gets darker as the temperature increases above certain levels, but the darker surface was totally removed by dressing the samples. Defects as surface and internal checks, twist, etc, were not observed even at the highest temperature level tested.

The energy consumption decreases as the drying temperature increases, specially at the temperatures between 100° and 120°C. It is believed that heat transfer efficiency to the surface increases when drying at high temperature, mainly during the first stage. Around 40% reduction on energy consumption was obtained when comparing the temperatures of 80° and 180°C.

The analysis of the results have shown that most observations collected in a small oven are also valid in a practical situation.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BATESON, R.G. (1952). Timber drying: the Behaviour of seasoned Timber in use. London, Crosby Lockwood, 143 p.
- BARNARD, M. & DITCHBURNE, N. (1956). Elementary Statistics for use in timber research. CSIRO. Bulletin, 32 p.
- BROWN, N.C. & BETHEL, J.S. (1965). La Industria Maderera, Mexico, Wiley, 1965. 397 p.
- CECH, M.Y. (1964). Development of drying stresses drying high temperature kiln drying. For. Prod. J., 14: 69-76.
- _____ & HUFFMANN, D.R. (1971). High - temperature kiln drying of spruce joists. For. Prod. J., 21 (10): 55-60.
- CECH, M.Y. & PFAFF, F. (1978). De humidification drying of maple. Can. For. Ind., 98 (8): 23-3.
- CHEN, P. (1979). Solar Predrying of 4/4 Yellow poplar. In: Anual meeting F.P.R.S., 33. São Francisco. Proceedings.
- _____. (1980). Press conditions affect drying rate and shrinkage of hardwood boards. For. Prod. J., 30 (7): 43-47.
- CHRISTENSEN, F.J. (1969). Drying of young plantation pine for building purposes. For. Prod. Newsletter, nº 377: 3-4.
- COMBEN, A.J. (1955). The effect of high temperature kiln drying on the strength properties of timber. Wood, 20 (8): 311-313.
- COMSTOCK, G.L. (1963). Moisture diffusion coefficients in wood as calculated from adsorption, desorption and steady state data. For. Prod. J., 13 (3): 97-103.
- _____. (1976). Comparison of mechanical properties of douglas fir and southern pine lumber dried by CRT, high temperature, conventional schedules. In: Res. Conf. on High temperature drying effects on Mechanical Properties of softwood lumber, USDA, F.P.L., Madison Wisc. Proceedings.
- DAVIS, W.H. & THOMPSON, W.S. (1964). Influence of thermal treatments of short duration on the toughness and chemical composition of wood. For. Prod. J. 14: 350-456.

- EASTOP, T.D. & McCONKEY (1963). Applied thermodynamics for engineering technologists. London, Longmans. 738 p.
- ECKERD, E.R.G. & DRAKEYR, R.M. (1950). Introduction to transfer of heat and mass. New York, McGraw Hill. 163 p.
- ESPENAS, L.O. (1971). Shrinkage of Douglas Fir, Western Hemlock and Red Alder as effected by drying conditions. For. Prod. J., 21 (6): 44-46.
- FLEISCHER, H.O. (1953). Drying rates of thin sections of wood at high temperatures. Yale University. School of Forestry. Bulletin n° 59.
- FRICKE, K.W. (1975) CSIRO continuous kiln (informações não publicadas).
- _____. (1976). Elements of timber kiln design (informações não publicadas).
- HANN, R.A. (1964). Drying yellow - poplar at temperatures above 100°C. For. Prod. J., 14: 215-220.
- _____. (1965). An investigation of drying wood at temperatures above 100 degree centigrade. The University of North Carolina. Tese. Doutorado (Ph.D.). 203 p.
- HART, C.A. (1964). Principles of moisture movement in wood. For. Prod. J., 14 (5): 207-214.
- _____. (1965). The drying of wood. N.C. State Univ. Sch. For. Tech. Rep., 27. 24 p.
- HARTLEY, J. (1975). Aspects of high temperature drying twist - prone softwood. (Informações não publicadas).
- HEDERNSON, A.L. (1936) The air Seasoning and kiln Drying of wood. New York, J.B.Lyon. 332 p.
- HILIIS, W.E. (1975). The role of wood characteristics in high temperature. J. Inst. Wood Science, 7 (6): 60-67.
- HUBER, D.W. (1976). Some thoughts on high temperature drying on wood strength relationships - the need for additional research. In: Res. Conf. on High - Temperature Drying Effect on Mechanical Properties of Softwood Lumber, USDA. F.P.L. Madison Wisc. Proceedings.

- JANKOWSKY, I.P. (1979). Influência da densidade básica e do teor de extrativos na umidade de equilíbrio da madeira. Univ. São Paulo. Dissertação, Mestrado. 94 p.
- KOLLMANN, W.G. (1961). Effect of thermal degradation on shrinkage and collapse of wood from 3 Australian species. For. Prod. J., 11 (9): 445 - 452.
- KEYLWERT, R. (1952). (High Temperature drying installations). Holz als Roh-und Werskstoff, 10 (14): 134-138.
- KEYLWERT, R. & KUEBLER, H. (1954). (Maximum operating and interior temperatures in thin softwood lumber drying). Deutsche Holzwirtschaft, 8 (6): 1-12.
- KININMONTH, J.A. (1976). Effects of timber drying temperature on subsequeute moisture and dimensional changs. N.Z.J. for. Sci, 6 (1): 101-107.
- KOCH, P. (1971). Process for straightening and drying southern pine 2 by 4's in 24 hours. For. Prod. J., 21 (5): 17-24.
- _____. (1972). Utilization of the southern pines. Dep. of Agric. Forest Service. Agric. Handbook n^o 420, 2v, 1663 p.
- _____. (1973). High temperature Kilning of southern pine poles, timber, lumber and thick veneer. AWPA, 69: 123-140.
- _____. (1974). Serrated kiln sticks and top load substantially reduce warp in southern pine studs dried at 240^o F. For. Prod. J., 24 (11): 30-34.
- _____. & WELLFORD Jr. (1977) Mechanical properties of small specimens cut from 1.79. inch thick southern pine dried for 6 hours, at 300^oC or for 5 days at 180^oF. - a comparison. Wood and Fiber, 8 (1) 13:21.
- KOLLMANN, F.F.P. (1961). High temperature drying - research, application and experience, in Germany. For. Prod. J., (11): 508-515.
- KOLLMANN, F.F.P. & CÔTÉ Jr., W.A. (1968). Principles of Wood Science and Technology. Berlím, Springer Verlag. v. 1, 529 p.
- KOLLMANN, F.F.P. & SCHNEIDER, A. (1961). Der einflub der stromungsgeschwindigkeit auf die heibdompftrocknunf von schnittholz. Holz als Roh-und Werskstoff, 19: 461-478.

- KOZLIK, C.J. (1973). Effect of kiln conditions on the dimensional stability of Douglas - Fir and Western Hemlock. For. Prod. J., 23 (9): 85-92.
- LADELL, J.L. (1957). High temperature kiln drying of eastern canadian soft woods-drying guide and tentative schedules. For. Prod. Lab. of. Can Techn. Note, n^o 2.18 p.
- LANTICAN, O.M. (1959). The effect of high-temperature kiln properties of hard maple. M.Sc. Thesis. College of Forestry Syracuse University, 69 p.
- LEONT'EV, N.L.; KRECHETOV, I.V.; TSAREV, B.S. & SUCHOVA, A.V. (1958). Influence of high temperature drying schedules on physical and mechanical properties of wood. Wood-working Industry, (Russia) 5 (10): 3-5 (CSIRO transl. n^o 3800).
- LOWERY, D.P. (1972). Vapour pressures generated in wood during drying. Wood Science, 5 (1): 73-80.
- _____.; KRIER, J.P. & HANN, R.A. (1968). High temperature of lumber a review U.S.D.A. For. Serv. Res. Paper. INT - 38, 10 p.
- LYMAN, L.C. (1965). Effect of air flow on heat transfer and water evaporation in jet-drying systems. For. Prod. J., 15 (10): 453-558.
- LUMBAY, T.G. & CHOONG, E.T. (1979). Technical and Economic characteristics of two solar kiln designs. For. Prod. J., 29 (7): 49-56.
- MACKAY, J.F.G. (1973). The influence of drying conditions and other factors on twist and torque in Pinus radiata studs. Wood and Fiber, 4 (4): 264-271.
- MACKAY, J.F.G. (1976). Effect of high temperature kiln drying on lumber. In: Res. conf. on High - Temperature Drying Effects on Mechanical Properties of Softwood Lumber. USDA, F.P.L. Madison, Wisc. Proceeding.
- MACKAY, J.F.G. & RUMBALL, N.L. (1971). Drying of distortion prone juvenile core pine for house studs. Austr. Timber J., 37 (6): 43-57.
- _____. & _____. (1972). Plasticizing distortion - prone soft - wood studs prior high temperature seasoning. For. Prod. J., 22 (6): 27-28.

- MACLEAN, J.D. (1945). Effect of heat on the properties and serviceability of wood - experiment on thin wood specimens. U.S. For. Prod. Lab. Rep., nº R 1471.
- _____. (1953). Effect of steaming on the strength properties of wood. AWPA, 49: 882-112.
- OLIVEIRA, S.V. & TOMASELLI, I. (1980). Efeito da secagem à altas temperaturas em algumas propriedades físicas e mecânicas da madeira jovem de Araucaria angustifolia Bert.O. Ktze. FUPEF - Série Técnica (em publicação).
- PFALZNER, P.M. (1950). On the flow of gases and water vapour through wood. Can. Jour. Res., 28: 389-410.
- ROBERTS, J.K. (1940). Heat and thermodynamics. London, Blackie, 388 p.
- ROSEN, H.N. (1979). Potential for energy recovery from humid air streams. USDA Forest Service Res. Paper, NC-170.
- _____. (1980). High - Temperature Initial Drying of wood: potential for energy recovery. For. Prod. J., 30 (1): 29-34.
- RADIATA PINE ASSOCIATION OF AUSTRALIA (1975). A timber industry code of practice for the high-temperature seasoning under restraint of heart-in radiata pine studs (não publicado).
- SALAMON, M. (1963). Quality and strength properties of Douglas-Fir, dried at high temperatures. For. Prod. J., 13 (8): 339-344.
- _____. (1969). High - temperature drying and its effects on wood properties. For. Prod. J., 19 (3): 27-34.
- SANTINI, E.J. (1980). Influência da temperatura na taxa de secagem e contração da madeira de Pinus elliottii proveniente de plantios de rápido crescimento. FUPEF. Série Técnica, (em publicação)
- SANTINI, E.J. & TOMASELLI, I. (1980). Colapso na madeira e algumas experiências brasileiras. FUPEF - Série Técnica nº 3, 20 p.
- SCHNEIDER, A. (1972). Investigations on the convection drying of lumber at extremely high temperatures. Part. I: course of drying and board temperature at drying temperature from 110°C to 190°C. Holz als Roh-und Werkstoff, 30: 382-394.

- _____. (1973). Investigations on the convection drying of lumber at extremely high temperatures. Part.II: drying degrade, changes in sorption, colour and strength of pine sapwood. Holz als Roh-und Wersktoff, 31: 198-206.
- SHARMA, S.N.; NATH, P. & Bali, B.I. (1972) A solar timber seasoning kiln. J. of Timb. Assoc. of India. vol. 17, n^o 2
- SIAU, S.F. (1971). Flow in wood. Syracuse, N.Y. Syracuse University, 131 p.
- SKAAR, C. (1972). Water in wood. Syracuse, N.Y. Syracuse University. 218 p.
- _____. (1976). Effect of high temperature on the rate of degradation and reduction of hygroscopicity of wood. In: Res. conf. on High Temperature Drying Effects on Mechanical Properties of Softwood Lumber. USDA.F.P.L. Madison, Wisc. Proceedings.
- STAMM, A.J. (1956). Thermal degradation of wood and cellulose. Ind. Eng. Chem., 48 (3): 413-415.
- _____. (1962). Wood and cellulose liquid relationships North Caroline Agric. Esep. Sta. Tech Bulletin, n^o 150.
- _____. (1964). Wood and Cellulose Science. New York, Ronald Press. 549 p.
- _____. & NELSON Jr., R.M. (1961). Comparison between measured and theoretical drying diffusion coefficients for southern pine. For. Prod. J. 11: 536-543.
- STAMM, A.J.; BUN, H.K. & KLINE, A.A. (1955) Heat stabilized wood USDA For Serv., F PL Report n^o 1621, 8 p.
- SETTERHOLM, V.C. (1979) An overview of Press drying. TAPPI, 62 (3): 45-46.
- SUCHSLAND, O. & STEVENS, R.R. (1968). Gluability of southern pine dried at high temperatures. For. Prod. J., 18 (1): 38-42.
- TIEMANN, H.D. (1971) The kiln drying lumber-a practical e theoretical treatise. Philadelphia, J.B.L.L. 316 p.

- TOMASELLI, I. (1979). Condições de secagem artificial de madeiras serradas no Paraná e Santa Catarina. Universidade Federal do Paraná. Tese. Mestrado, 111 p.
- _____. (1977). The influence of high - temperature drying on some physical and mechanical properties of Pinus radiata. D. Don. University of Melbourne. Tese. Doutorado. (P.H.D.). 264 p.
- _____. & GROSSMAN, P.U.A. (1980). High Temperature Drying of Pinus radiata wood. Part I - Physical Aspects: drying rates and internal temperature of wood (em publicação).
- TSCHERNITZ, J.L. & SIMPSON, W.T. (1979). Solar-heated, forced-air lumber dryer for tropical latitudes. Solar Energy, 22: 563-566.
- VERMAAS, H.F. (1978]. The combination of high frequency and high temperature convective drying of wood. Holzforschung, 32: 55-60.
- WANG, J.H. & BEALL, F.C. (1975). Laboratory Press Drying of Red Oak. Wood Science, 8 (2): 131-140.
- WILLY, A.T. & CHOONG, E.T. (1975). An analysis of free water flow during drying softwoods. Wood Science, 7 (4): 310-318.
- WILLINGTON, P.J. (1975). A direct fired compartment type high temperature kiln for P. radiata (relatório não publicado).
- WISE, L.E. & JAHN, E.C. (1952]. Wood chemistry. New York, Reinhold. 1343 p. V 1,2.
- WRIGHT, G.W. (1961]. Brief notes on moisture gradient, drying stresses and movement on re-cutting. CSIRO. For. Prod. Lab. (relatório não publicado),

A N E X O

ANÁLISES DE VARIÂNCIA

A₁ - TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO

COMPARAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS - SECAGEM EM ESTUFA DE LABORATÓRIO

FONTE DE VARIAÇÃO	G.L.	SQ	QM	F'
Tratamento	6	146,67	24,44	**
Erro	77	37,22	0,48	50,6
Total	83	183,89		

A₂ - TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO

COMPARAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS - SECAGEM EM ESTUFA CONVEN
CIONAL

FONTE DE VARIAÇÃO	G.L.	SQ	QM	F'
Tratamento	2	0,8106	0,4053	**
Erro	111	1,0387	0,0094	43,3
Total	113	1,8493		

** Significante ao nível de 99%.

A₃ - CONTRAÇÃO

COMPARAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS PARA A CONTRAÇÃO NA ESPESURA - SECAGEM EM ESTUFA DE LABORATÓRIO

FONTE DE VARIAÇÃO	G.L.	SQ	QM	F'
Tratamento	6	1,663	0,2771	NS 1,71
Erro	77	12,522	0,1626	
Total	83	14,184		

A₄ - CONTRAÇÃO

COMPARAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS PARA CONTRAÇÃO EM LARGURA-SECAGEM EM ESTUFA DE LABORATÓRIO

FONTE DE VARIAÇÃO	G.L.	SQ	QM	F'
Tratamento	6	0,1846	0,0301	NS 1,11
Erro	77	2,1391	0,0278	
Total	83	2.3237		

NS - não significante

A₅ - CONTRAÇÃO

COMPARAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS PARA A CONTRAÇÃO NA ESPESSURA - SECAGEM EM ESTUFA CONVENCIONAL

FONTE DE VARIAÇÃO	G.L.	SQ	QM	F'
Tratamento	2	1,382	0,6910	*
Erro	111	18,137	0,1639	4,23
Total	113	19,519		

A₆ - CONTRAÇÃO

COMPARAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS PARA A CONTRAÇÃO EM LARGURA - SECAGEM EM ESTUFA CONVENCIONAL

FONTE DE VARIAÇÃO	G.L.	SQ	QM	F'
Tratamento	2	1,131	0,565	NS
Erro	111	22,311	0,201	2,81
Total	113	23,442		

NS - não significante

* - significante ao nível de 95%.

A₇ - PESO ESPECÍFICO APARENTE

COMPARAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS - SECAGEM EM ESTUFA DE LABORATÓRIO

FONTE DE VARIAÇÃO	G.L.	SQ	QM	F'
Tratamento	6	0,0508	0,00846	**
Erro	77	0,0134	0,00017	4,86
Total	83	0,0642		

A₈ PESO ESPECÍFICO APARENTE

COMPARAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS - SECAGEM EM ESTUFA CONVEN
CIONAL

FONTE DE VARIAÇÃO	G.L.	SQ	QM	F'
Tratamento	2	0,0987	0,00494	*
Erro	111	0,1824	0,00164	3,01
Total	113	0,2923		

* - significante ao nível de 95%

** - significante ao nível de 99%.