

DETERMINAÇÃO DE METODOLOGIA PARA A INDICAÇÃO DE
PROGRAMAS DE SECAGEM DE MADEIRAS

ALCIR TADEU DE OLIVEIRA BRANDAO
Engenheiro Florestal

Orientador: Prof. Dr. Ivaldo Pontes Jankowsky

Dissertação apresentada à Escola Superior
de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Uni-
versidade de São Paulo, para obtenção
do Título de Mestre em Ciências
Florestais

PIRACICABA

Estado de São Paulo - Brasil

Abril - 1989

DETERMINAÇÃO DE METODOLOGIA PARA A INDICAÇÃO

DE PROGRAMAS DE SECAGEM DE MADEIRAS

ALCIR TADEU DE OLIVEIRA BRANDAO

Aprovada em : 19/05/1989

Comissão julgadora :

Prof. Dr. Ivaldo Pontes Jankowsky ESALQ/USP

Prof. Dr. José Otávio Brito ESALQ/USP

Prof. Dr. João Peres Chimelo IPT / USP


Prof. Dr. Ivaldo Pontes Jankowsky

Orientador

Aos meus pais

JOSE e JACIRA,

pelo amor e dedicação com que me acolheram
em suas vidas e pela determinação com que
conduziram minha formação profissional,

Aos meus irmãos,
pela união familiar

A minha esposa " ROSARIO ",
pelo companheirismo e compreensão e,

às minhas filhas
DANIELLE CRISTINA,
THAIS DE OLIVEIRA e
THAIS DE CASSIA,
pelo futuro que as aguarda

AGRADECIMENTOS

À todos aqueles que participaram direta ou indiretamente na realização deste trabalho, expresso meus sinceros agradecimentos, e em especial :

- Ao Prof. Dr. Ivaldo Jankowsky, pela orientação e amizade;
A Faculdade de Ciências Agrárias do Pará, pela oportunidade da realização do curso;
A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior - CAPES, pela concessão de bolsa de estudo;

- Aos docentes do Departamento de Ciências Florestais pelo incentivo, em especial ao Prof. Mario Tomazello Filho e o Engo. Florestal Osmar José Romeiro do Aguiar, pelas orientações e sugestões;

- Aos funcionários do Instituto de Pesquisas Florestais pelo apoio e em especial à Marialice Metzger Poggiani e Sueli Dressano pela orientação bibliográfica;

- Aos funcionários e estagiários do Departamento de Ciências Florestais em especial, aos senhores Ailton José de Melo e Benedito Moysés S. Leite, pelo apoio na execução do trabalho;

- Ao "irmão" Augusto Silva e aos amigos Piracicabanos "Renato e Midy " pelo apoio e especialmente a Paulo Patreze pela amizade fraterna;

- A GIACOMET MARODIN Indústria de Madeiras S/A, pela cessão de grande parte do material utilizado no desenvolvimento do trabalho;

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

CONTEUDO

| | Página |
|---|--------|
| RESUMO..... | .viii. |
| SUMMARY | .ix. |
| 1. INTRODUÇÃO | 1. |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA | 3 |
| 2.1. Movimentação da água na madeira | 3 |
| 2.1.1. Movimento de água capilar | 5 |
| 2.1.2. Movimento de água higroscópica | 7 |
| 2.2. Fatores que influenciam a velocidade de secagem... 8 | |
| 2.2.1. Fatores inerentes à madeira | 9 |
| 2.2.2. Fatores externos à madeira | 12 |
| 2.3. Defeitos ocasionados pela secagem | 14 |
| 2.4. Programas de secagem | 21 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS..... | 26 |
| 3.1. Fase Exploratória | 26 |
| 3.1.1. Preparo do material | 27 |
| 3.1.2. Condução do ensaio a 100°C | 31 |
| 3.1.3. Determinação das variáveis | 37 |
| 3.2. Fase de avaliação da metodologia | 40 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 42 |
| 4.1. Fase exploratória | 42 |
| 4.1.1. Avaliação da secagem a 100°C | 42 |
| 4.1.1.1. Massa de água na madeira | 43 |

| | |
|---|----|
| 4.1.1.2. Taxa de secagem | 47 |
| 4.1.1.3. Rachadura de topo | 55 |
| 4.2. Fase de aplicação da metodologia | 63 |
| 4.2.1. Elaboração dos programas de secagem..... | 63 |
| 4.2.1.1. Definição das equações | 63 |
| 4.2.1.2. Aplicação da metodologia | 70 |
| 4.2.2. Avaliação da secagem convencional | 73 |
| 4.2.2.1. Velocidade de secagem | 73 |
| 4.2.2.2. Distribuição da umidade final... | 80 |
| 4.2.2.3. Qualidade da madeira | 81 |
| 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 84 |
| 6. LITERATURA CITADA | 86 |
| 7. APÊNDICE | 90 |

DETERMINAÇÃO DE METODOLOGIA PARA A INDICAÇÃO DE
PROGRAMAS DE SECAGEM DE MADEIRAS

Autor: Alcir Tadeu de O. Brandão

Orientador: Ivaldo Pontes Jankowsky

RESUMO

Neste trabalho desenvolveu-se um estudo visando a definição de uma metodologia que permitirá mediante um teste rápido de laboratório, a previsão do comportamento de uma determinada espécie de madeira quando submetida á um processo de secagem convencional e, a indicação do programa de secagem melhor adequado.

Este trabalho foi desenvolvido basicamente em duas etapas: fase exploratória e fase de avaliação da metodologia.

a) fase exploratória:

Nesta fase utilizou-se 25(vinte e cinco) amostras / espécie, com dimensões de 2cm x 10cm x 20cm de madeiras conhecidas quanto ao comportamento num processo de secagem convencional. As madeiras testadas foram: Pinus (*Pinus caribaeae*), Cedro (*Cedrela fissilis*), Pinheiro do Paraná (*Araucária angustifolia*), Grápia (*Apuleia leiocarpa*), Jatobá (*Hymenaeae courbaril*) e Eucalipto (*Eucalyptus*

saligna).

Inicialmente as amostras de madeira foram submetidas á um teste de secagem á 100°C em uma estufa de laboratório, onde avaliou-se o comportamento das mesmas quanto a taxa de secagem [variação da massa de água(g) em função do tempo(h)], rachaduras de topo e massa de água(g), em diferentes intervalos de umidade.

Em seguida avaliou-se a correlação existente entre as variáveis acima medidas e os principais parâmetros de elaboração dos programas de secagem [temperatura inicial (TI), temperatura final (TF) e potencial de secagem inicial (PSI)] indicados pela literatura, definindo-se equações que possibilitaram caracterizar a TI, TF e o PSI para as madeiras estudadas.

b) Fase de avaliação da metodologia

Nesta fase foram elaborados programas de secagem para outras espécies de madeiras, pouco conhecidas quanto ao seu comportamento durante o processo de secagem convencional. As madeiras testadas foram: Guarubarana (*Erisma uncinatum*), Maçaranduba (*Manilkara huberi*), Angico Vermelho (*Parapiptadenia rigida*), Canela pinho (*Ocoteae cf. arechavaletae*), Pessegueiro bravo (*Prunus selowii*), Guajuvira (*Patagonula americana*), Açoita cavalo (*Luehea divaricata*), Timburi (*Enterobobium contorsiliquum*) e Marmeleiro do mato (*Rupraechtia laxiflora*).

Inicialmente, as madeiras foram submetidas ao ensaio de secagem á 100°C definido na fase exploratória, elaborando-se os respectivos programas de secagem.

Posteriormente, as espécies Quarubarana (*Erisma uncinatum*), Maçaranduba (*Manilkara huberi*) e Angico vermelho (*Parapiptadenia rígida*) foram submetidas á secagem convencional em um secador Hildebrand HD4004, seguindo-se os programas anteriormente elaborados. Os resultados obtidos revelaram que os programas indicados pela metodologia proposta foram adequados para as espécies em questão.

DETERMINATION OF METODOLOGY FOR INDICATION OF
WOOD DRYING SCHEDULE

Author : Alcir Tadeu de Oliveira Brandão

Advisor: Ivaldo Pontes Jankowsky

S U M M A R Y

The aim of this work was to define a methodology that would indicate the performance of a determined wood species when submitted to a conventional drying process and the most adequate drying program through a rapid laboratory test.

This work was divided into two phases: one exploratory and the other of methodology evaluation.

Twenty five 2x10x20 cm samples/species of woods known in relation to their performance in a conventional drying process were utilized in the exploratory phase. The woods tested were: pine (*Pinus caribaea*), "Cedro" (*Cedrela fissilis*), Paraná pine (*Araucária angustifolia*), "Grapia" (*Apuleia leiocarpa*), "Jatobá" (*Hymenaea courbaril*) and Eucalypt (*Eucalyptus saligna*).

Initially, the samples were submitted to a drying teste at 100°C in a laboratory kiln. Whereupon, their performances were evaluated in relation to drying rate [Variation on the water mass (g) in funtion of the time (h)], top splitting and water mass (g) at different moisture intervals. Evaluations of the exising correlations among the

above measured variables and the main parameters for the development of drying kiln schedules [initial temperature (IT), final temperature (FT) and initial drying potencial (IDP)] indicated in the literature were carried out defining equations that allowed to characterized the IT, FT and IDP for the utilized woods.

In the phase of methodology evaluation, drying programmes were developed for other wood species little known in relation to their performances during the conventional drying process. The woods tested were: "quarubarana" (*Erisma uncinatum*), "Maçaranduba" (*Manilkara huberi*), "Angico vermelho" (*Parapiptadenia rigida*), "Canela pinho" (*Ocoteae cf. arechavaletae*), "Pessegueiro bravo" (*Prunus selowii*), "Guajuvira" (*Patagonula americana*), "Açoite cavalo" (*Luehea divaricata*), "Timburi" (*Enterolobium contorsiliquum*) and "Marmeleiro do mato" (*Rupraechtia laxiflora*). These woods were submitted to a drying test at 100°C, defined at the exploratory phase, and had their drying programme developed. Then, the species "Quarubarana" (*Erisma uncinatum*), "Maçaranduba" (*Manilkara huberi*) and "Angico vermelho" (*Parapiptadenia rigida*) were submitted to conventional drying in a HILDERBRAND HD4004 kiln following the programmes previously developed. The results obtained revealed that the programmes indicated by the proposed methodology were adequate to the species in consideration.

1. INTRODUÇÃO

A madeira como matéria prima vem sendo utilizada através dos séculos sob as mais diversas formas.

A pesquisa tem mostrado que o reprocessamento da madeira serrada após sofrer um processo de secagem é favorecido principalmente pela redução na movimentação dimensional a limites aceitáveis. Como consequência as peças de madeira podem ser produzidas com maior precisão de dimensões.

A secagem da madeira pode ser realizada em condições naturais, onde não existe um controle efetivo das condições de processo, ou em secadores com controle de temperatura e umidade relativa. Devido a esse controle a secagem é chamada artificial.

A secagem artificial proporciona benefícios que vão desde a diminuição do período de tempo dispendido na secagem até a minimização dos defeitos ocasionados nesse processo, tais como rachaduras, empenamentos e encanoamento, quando utilizado um programa apropriado.

Um programa de secagem pode ser escolhido

diretamente da literatura, pode ser adaptado às condições de cada espécie, e pode ser também elaborado, baseando-se nas recomendações existentes na própria literatura.

Contudo, não existem programas específicos para a grande maioria das madeiras disponíveis no mercado brasileiro sendo que sua elaboração nas condições atuais é lenta, pois em geral utiliza-se o método das tentativas. Nesse método, as madeiras são submetidas a diferentes condições de secagem até que se encontre o programa que melhor se adapte as mesmas.

Além disso, diferentes tipos de madeira se comportam de modo diferente aos programas de secagem encontrados em literatura.

Diante desse quadro, deve-se ainda considerar que na utilização racional da madeira o processo de secagem precisa cada vez mais ser aperfeiçoado, tendo em vista o crescente aumento da demanda dos produtos da madeira. É nesse enfoque que desenvolveu-se este estudo, visando estabelecer uma metodologia que possibilitasse mediante um teste rápido de laboratório a previsão do comportamento de uma determinada espécie de madeira em relação a secagem convencional, bem como a indicação de um programa adequado à mesma.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A secagem das madeiras, basicamente se desenvolve em duas fases simultâneas. Na primeira, ocorre a remoção da água superficial, e na segunda, a movimentação da água do interior das peças para superfície (GALVÃO & JANKOWSKY, 1985).

O processo pode ser influenciado pela própria madeira (fatores intrínsecos), onde a estrutura anatômica se constitui no fator limitante à saída da água e, pelo ambiente no qual a madeira está sendo secada (fatores extrínsecos), tendo a temperatura e a umidade relativa do ar como os principais fatores de influência na condução do processo.

Para melhor entendimento do processo de secagem da madeira é importante o perfeito conhecimento desses fatores e suas interrelações durante a secagem.

2.1. Movimentação da água na madeira

A árvore ao ser derrubada apresenta um alto teor de umidade, função da presença de água em seus tecidos.

A madeira de *Pinus spp.*, oriunda de árvore recém derrubada, pode apresentar teores de umidade variando de 120 a 200 %, isto significa que a massa de água em uma peça pode representar até duas vezes a massa da própria madeira, JANKOWSKY (1983).

Essa umidade tende a diminuir à medida que a madeira é exposta ao ambiente, com maior ou menor facilidade conforme sua estrutura anatômica e condições ambientais.

FERREIRA et alii (1982), avaliando a secagem de madeira roliça de *Eucalyptus saligna Smith*, com casca e comprimento de 2,20 cm, encontraram que as maiores taxas de secagem são verificadas na primeira semana após o abate, e que a umidade tende a valores constantes a partir da 21ª. semana após o abate.

Do ponto de vista da importância no processo de secagem, duas formas de água podem ser encontradas na madeira.

Água livre ou capilar

Água higroscópica ou de adesão

A primeira é encontrada nos lumes dos vasos, traqueídes, parênquima radial e axial, canais epiteliais e intercelulares e fibras. Este tipo de água movimenta-se na madeira através das aberturas naturais das células, por fenômenos de capilaridade, deslocando-se do local mais úmido para o menos úmido (BROW et alii, (1952); STAMM, (1964); KOLLMANN & CÔTÉ, (1968); SIAU, (1971) e SKAAR, (1972).

A segunda forma de água é encontrada na madeira aderida as paredes celulares, sendo removida através de fenômenos de difusão ou fenômenos análogos.

Alguns autores citam ainda a existência do vapor d'água, o qual move-se pelo interior das cavidades das células e das aberturas que as ligam, também através do fenômeno da difusão que ocorre em consequência do gradiente de pressão do vapor. Sua contribuição para a quantidade de água movimentada, pode ser também desprezada nas condições normais de secagem, pois a difusão do vapor d'água a temperatura abaixo da ebulição (secagem convencional) é menos eficiente em virtude do pequeno número de aberturas que ligam as células entre si (RASMUSSEN, 1961).

No entanto, para um melhor entendimento dos fenômenos que atuam no processo de secagem de madeiras é conveniente considerar separadamente a movimentação dos dois tipos de água na madeira.

2.1.1. Movimentação da água capilar

De modo geral, pode-se dizer que o primeiro tipo de água a ser removida da madeira durante um processo de secagem é a água livre ou capilar.

Inúmeros autores (BROW et alii, 1952; STAMM, 1964; KOLLMANN & CÔTÉ, 1968; SIAU, 1971; SKAAR, 1972, dentre outros), tem definido a água livre como sendo aquela

existente na madeira quando o seu teor de umidade está acima do ponto de saturação das fibras (PSF).

Diversos estudos demonstraram que o PSF varia numa faixa de umidade de 25 a 35%, em função da espécie.

O movimento capilar pode ser definido como sendo aquele controlado por forças de tração determinadas pela tensão superficial do líquido e pelos raios dos capilares.

Uma vez que a movimentação da água capilar se realiza através das aberturas naturais, o fator limitante à sua retirada é a permeabilidade da madeira, que é caracterizada pela maior ou menor facilidade com que a água escoar através da madeira em uma determinada direção.

Inúmeros autores, demonstram que a permeabilidade da madeira é maior no sentido longitudinal ou paralelo às fibras, em comparação com o sentido transversal, sendo maior no sentido radial do que tangencial (ERICKSON et alii, 1932; SEBASTIAN et alii, 1965; SIAU, 1971; SKAAR, 1972 e GALVÃO et alii, 1974).

SIAU (1971), estabelece que o fluxo dos fluidos (água) através das coníferas é feito essencialmente pelos traqueídes, as quais são interconectadas através dos pares de pontuações areoladas. As aberturas dessas pontuações, muito pequenas em diâmetro quando comparadas com as traqueídes, são responsáveis pela maior resistência ao fluxo. Assim, o número e as condições dos pares de

pontuações é que essencialmente determinam a permeabilidade da madeira de coníferas.

O mesmo autor cita que, para folhosas, o fluxo de água no sentido longitudinal é mais acentuado do que o fluxo transversal devido o maior diâmetro dos vasos comparados ao tamanho das pontuações das fibras e raios.

2.1.2. Movimentação da água higroscópica.

O movimento da água higroscópica através das paredes celulares também pode ser entendido como um processo de difusão. Durante a realização desse processo, as moléculas de água se deslocam de um local de sorção para outro.

A água higroscópica movimenta-se através da parede celular por causa de um gradiente de umidade que ali se estabelece, KOLLMANN & CÔTE, (1968); SIAU, (1971) e SKAAR, (1972).

De acordo com SKAAR (1971), as moléculas de água adsorvidas juntos aos grupos hidroxilas requerem menor quantidade de energia para se moverem para locais de menor teor de umidade do que a requerida para caminharem para regiões de maior teor de umidade.

O fluxo de água higroscópica na madeira não é constante nas três direções consideradas, recebendo valores diferentes no coeficiente de difusão (RESCH, 1971 e PRAK,

1970).

SIAU (1971), demonstrou que os valores radiais são 17% à 25% maiores que os valores tangenciais, isto pode ser explicado pela quantidade e arranjo das paredes celulares a serem atravessadas pela água em cada uma das direções fundamentais da madeira.

A difusão da água higroscópica ocorre em combinação com a difusão do vapor d'água. Durante o seu percurso para a superfície da madeira, a água no estado de vapor é novamente adsorvida na parede de outra célula, para então ocorrer o mecanismo de difusão da água higroscópica. Esta combinação de mecanismos será repetida até que a molécula de água atinja a superfície da madeira.

De acordo com SKAAR (1972), a energia potencial do vapor d'água é elevada quando comparada com a água livre ou com a água higroscópica. Porém, em condições normais de secagem a quantidade de água que é removida da madeira na forma de vapor, é desprezível.

2.2 Fatores que influenciam a velocidade de secagem.

A secagem artificial da madeira consiste, basicamente, em promover a remoção da água do interior das peças até que ela tenha alcançado um nível de equilíbrio com o ambiente.

Hart em 1966, citado por GALVÃO (1976), sumariza

de maneira objetiva os fatores envolvidos na remoção da umidade da madeira.

a) Quando a remoção da água superficial é o fator limitante:

1. o tempo é diretamente proporcional à espessura da peças da madeira.
2. o tempo é diretamente proporcional a densidade da madeira.
3. o tempo é inversamente proporcional à depressão do termômetro úmido.
4. o tempo é inversamente proporcional a velocidade de circulação de ar.

b) Quando a difusão da umidade para a superfície é o fator limitante:

1. o tempo é diretamente proporcional ao quadrado da espessura da madeira.
2. o tempo é diretamente proporcional ao quadrado da densidade da peça.
3. o tempo é inversamente proporcional a pressão de saturação do vapor d'água.

2.2.1 Fatores inerente a madeira.

É sabido que diferentes espécies apresentam los tipos de estrutura anatômica, as quais são mais ou menos favoráveis a secagem da madeira.

A velocidade de secagem em madeiras macias é maior

do que em madeiras duras, em razão das primeiras serem dotadas de estrutura anatômica mais favorável à eliminação da umidade (YAMAMOTO, 1974).

De modo geral, uma madeira cuja estrutura anatômica represente um grande volume de vazios poderá ter uma permeabilidade acentuada, embora não se conheça ainda uma relação direta entre permeabilidade e porosidade.

A permeabilidade longitudinal nas madeiras de *Gymnospermas* está diretamente relacionada com o número, tamanho, distribuição e condições das pontuações areoladas, já que é via essas estruturas que se dá o fluxo (SEBASTIAN et alii, (1965); BAYLEY & PRESTON, (1960) e SMITH, (1972).

SIAU (1971), demonstrou que a permeabilidade das coníferas é diretamente proporcional ao raio da pontuação elevado à quarta potência.

Nas madeiras de folhosas, a permeabilidade longitudinal está diretamente relacionada com os vasos, seu diâmetro, distribuição e conteúdo.

Numa árvore geralmente são encontrados dois tipos de madeira, o cerne, mais interno, e o alburno, mais externo.

Apesar do alburno apresentar maior velocidade de secagem que o cerne, em determinadas condições de umidade inicial este seca com maior velocidade.

YAMAMOTO (1974), cita que madeiras de coníferas, cujo alburno apresenta elevados teores de umidade em relação

ao cerne, custa mais a secar, o que não ocorre com as folhosas, onde as diferenças entre os teores de umidade entre o cerne e o alburno, geralmente, são pequenas, de tal modo que o alburno, apresentando maior velocidade de secagem, seca num menor período de tempo.

KININMONTH (1971), avaliando a permeabilidade e a estrutura de *Nothofagus fusca* e *Eucalyptus regnans* e seu efeito sobre a secagem, encontrou que nas duas espécies estudadas o alburno foi mais permeável na direções radial e tangencial em diferentes pressões acima de 60 cm de Hg, o que não ocorre com o cerne. A parte externa do alburno foi significativamente mais permeável que a parte mais interna no estado verde, mas as diferenças entre fluxos na direção radial e tangencial não foram constantes.

Para coníferas, há uma maior movimentação de água no lenho tardio do que no inicial, devido a grande habilidade das pontuações do lenho tardio em resistir a aspiração durante a secagem. Isto poderia ser explicado por causa das membranas ds pontuações do lenho tardio serem mais grossas e rígidas (ZAPATA, 1981).

A madeira seca mais rapidamente na direção longitudinal que na transversal em consequência da estrutura anatômica da madeira ser mais favorável a **circulação** da umidade no sentido longitudinal.

A região da tora onde as peças de madeiras são retiradas parecem exercer alguma influência na velocidade de

secagem. De acôrdo com BRASIL (1981), as peças retiradas segundo o direcionamento radial na tora perdem água mais lentamente que aquelas retiradas num corte tangencial. A razão dessa diferença nas velocidades de secagem se deve ao fato de que as peças extraídas de acordo com o corte tangencial apresentam um maior número de raios ao longo da largura, os quais favorecem a movimentação da água para o ambiente externo.

2.2.2. Fatores externos a madeira

Em uma secagem de madeiras a remoção da água livre ou capilar representa para alguns autores um fator limitante na velocidade de secagem.

SKAAR (1971), comenta que a chave para futuros ganhos na velocidade de secagem, provavelmente está em se desenvolver novos métodos para a remoção desta água mais eficientemente do que é possível com os métodos convencionais hoje empregados.

Dentro desses métodos HILDEBRAND (1970), cita que na prática a questão mais econômica é a velocidade do ar e cita que a velocidade de 3 m/s, somente é vantajosa economicamente em certos casos para madeira verde ou secagem a alta temperatura de madeira serrada. Para o autor, a velocidade de circulação do ar mais eficiente se situa em torno de 2 m/s.

Dentro desse aspecto, KOLLMANN & SCHNEIDER (1961), concluíram que no primeiro estágio de secagem (com uma constante taxa de secagem e evaporação da água sobre a superfície), a influência da velocidade do ar sobre a taxa de secagem, tanto em secagem convencional como na secagem a alta temperatura é significativa. No segundo estágio de secagem (com a evaporação da água capilar dentro da madeira e um decréscimo da taxa de secagem), a influência da velocidade do ar é menor. A importância da velocidade do ar decresce com a diminuição do conteúdo de umidade.

Nesse aspecto, JANKOWSKY (1979b), sugere que a aceleração da secagem de coníferas, acima do PSF, poderia ser obtida pelo aumento na velocidade de circulação do ar na estufa, isso com a finalidade de melhorar a retirada da água capilar.

Geralmente, em relação à temperatura, tem-se que quanto mais alto for o seu valor, mais rápida será a velocidade de secagem.

Para alguns autores, a temperatura exerce influência apenas na remoção da água higroscópica.

Segundo JANKOWSKY (1979b, 1980); a remoção da água higroscópica durante a secagem de madeiras é lenta e sumamente demorada, não mais dependendo da velocidade de circulação do ar, e sim da temperatura e do potencial de secagem.

YAMAMOTO (1974), pondera que o aumento da

temperatura reflete num acréscimo da velocidade de secagem. Porém, salienta que se a temperatura for muito elevada, haverá uma evaporação da umidade superficial muito mais rápida que a translocação da umidade interna, com isso o processo de secagem poderá ser ineficaz.

HILDEBRAND (1964), assevera que a quantidade de água difundida por unidade de tempo, a temperatura constante, é proporcional ao gradiente de umidade. Entendendo-se por gradiente de umidade a diferença de umidade que se estabelece entre o interior e a superfície de evaporação, em relação à direção considerada.

Segundo JANKOWSKY (1983), o gradiente de umidade tem uma influência decisiva na remoção da água abaixo do PSF, enquanto que acima, o fator limitante para a retirada de água é a permeabilidade da madeira.

GALVÃO (1976), comenta que a elevação da temperatura em um ambiente, com uma determinada umidade relativa ou seja, uma certa massa de vapor d'água por unidade de volume, é uma das maneiras de se aumentar a capacidade do ar de absorver umidade de madeira na secagem artificial controlada.

2.3. Defeitos ocasionados pela secagem da madeira.

Entende-se por defeitos de secagem toda e qualquer alteração que venha ocorrer na estrutura da madeira

que dificulte o reprocessamento da mesma numa fase posterior.

De uma maneira geral, a diferença entre a velocidade de evaporação da umidade superficial e a velocidade de translocação da umidade interna para as zonas superficiais é que resulta no aparecimento de grande maioria dos defeitos da madeira durante um processo de secagem.

Segundo YAMAMOTO (1974), para contornar esse problema é necessário limitar a velocidade de evaporação da umidade superficial, quando se faz a secagem convencional, de modo a torná-la compatível com a velocidade de movimentação da umidade interna para a superfície.

De uma maneira geral, os defeitos da madeira verificados em um processo de secagem podem ser agrupados em quatro categorias:

- colapso
- rachaduras
- empenamentos
- encruamento

O colapso é definido como sendo um achatamento ou deformação das células durante a secagem, evidenciando uma contração excessiva e/ou desigual, (BRITISH COMMONWEALTH FOREST TERMINOLOGY, 1959).

O fenômeno do colapso ocorre na madeira acima do PSF.

O colapso inicia-se a um teor de umidade de

100 a 120% e se completa quando a madeira atinge o máximo de 50% a 70% de umidade (SANTINI & TOMASELLI, 1980).

De uma maneira geral, as causas para o aparecimento do colapso podem ser relacionados com a própria madeira e ao processo de secagem.

Com relação a influência da madeira tem-se que a estrutura relativamente porosa da membrana da pontuação das *Gymnospermas* poderia explicar a ausência quase que geral do colapso nessa classe de madeira. Porém, não existe no momento evidências suficientes de diferenças na estrutura das membranas de pontuações das *Angiospermas* para esclarecer a grande ocorrência do colapso nas diferentes espécies de folhosas.

Segundo KAUMANN (1964), a intensidade em diferentes espécies do mesmo gênero é muito variável. Em *Eucalyptus marginata*, o colapso é insignificante porém, em *Eucalyptus globulus* é severo.

Richther et alii, citados por SANTINI & TOMASELLI (1980), dizem que a espécie *Schizolobium parahybum* (guapuruvu) apresenta problemas durante a secagem com uma alta propensão ao colapso, sobretudo na região próxima da medula.

NOCK (1974), cita que a espécie *Ocotea porosa* (imbuia) parece ser uma das espécies que apresenta maior suscetibilidade para o colapso durante a secagem.

Com relação ao tipo de lenho SANTINI &

TOMASELLI (1980), dizem que as paredes celulares finas do lenho inicial tem uma resistência á compressão inferior e, de modo geral, o colapso ocorre mais facilmente nêsse lenho do que no lenho tardio, onde as resistências são maiores. Em casos isolados, o lenho tardio pode sofrer uma maior intensidade de colapso do que o lenho inicial, provavelmente devido as diferenças de tamanhos de poros.

Com respeito aos elementos extrativos BRAMHALL & WELLWOOD (1974), argumentam que o colapso está relacionado com a quantidade de extrativos da madeira, visto que êsses elementos obstruem o movimento de ar nas células.

Erickson em 1966, citado por SAUER et alii (1974), verificou para a madeira de Redwood (*Sequoia sempervirens*) que a quantidade percentual de extrativos solúveis em água quente foi muito mais alta em zonas colapsadas do que em tecidos não colapsados.

Dentre os fatores extrínsecos á madeira que mais influenciam o aparecimento de colapso, a temperatura, umidade relativa e a duração da secagem parecem ser mais importantes.

Greenhil citado por VILLIERE (1966), desenvolveu na Austrália um estudo sobre a secagem da madeira e concluiu que quanto mais elevada for a temperatura de secagem maior a tendência ao colapso.

Ellwood et alii, citados por SANTINI & TOMASELLI (1980), mostraram que a temperatura real da

madeira é a variável mais importante e não a temperatura do ambiente de secagem.

Com relação á umidade relativa e a duração da secagem, de acordo com SANTINI & TOMASELLI (1980), a influência da umidade relativa é indireta ou seja, baixa umidade causa tensão residual; e VILLIERI (1966), constatou que o colapso aumenta com a duração da secagem, qualquer que seja a temperatura, porém é muito mais sensível para 60°C do que para 100°C.

Outro tipo de defeito que comumente pode ocorrer durante o processo de secagem são as rachaduras. Sua localização é basicamente, no topo e na superfície das peças, durante as primeiras fases e posteriormente podem surgir as denominadas favos de mel ou internas. Essas últimas só podem ser vistas no interior das peças, mediante o seccionamento transversal das mesmas.

Alguns autores tem estudado o aparecimento de rachaduras em madeiras durante a secagem. MCMILLEN (1955), por exemplo, cita que as rachaduras aparecem devido a formação de uma tensão de tração superior a resistência perpendicular as fibras.

De acordo com JANKOWSKY (1985), as rachaduras aparecem como consequência da diferença de retração nas direções radial e tangencial da madeira, e de diferenças de umidade entre regiões contíguas da mesma peça, durante o processo de secagem. Essas diferenças levam ao aparecimento

de tensões que tornando-se superiores a resistência dos tecidos lenhosos, provocam a ruptura da madeira.

O aparecimento de rachaduras no estágio inicial da secagem é muito associada com a umidade relativa.

Para TERAZAWA (1965), as rachaduras de topo ocorrem quando a temperatura e a umidade relativa, no estágio inicial de secagem são severas para a madeira.

Para RASMUSSEN (1961), as rachaduras superficiais são falhas que usualmente ocorrem nos raios da madeira, por toda a face lateral da peça, podendo também ocorrer nos dutos resiníferos. Essas falhas geralmente ocorrem nos estágios iniciais da secagem, mas o perigo persiste além dele.

De modo geral, as rachaduras de topo aparecem nas células de natureza parenquimatosa (raios) de reduzida resistência mecânica.

As rachaduras internas ou favos de mel, aparecem principalmente em madeiras duras, que foram secas a temperatura excessivamente elevada, e cuja resistência a tração transversal seja inferior às tensões de secagem (KOLLMANN, 1951), podendo também estar associadas com o colapso e o encruamento (GALVÃO & JANKOWSKY, 1985).

O controle dos defeitos de secagem, em madeiras duras, depende sobremaneira do controle na temperatura e na umidade relativa durante esse processo. No início da secagem uma temperatura baixa e umidade relativa

alta é requerida para prevenir o colapso e rachaduras de topo.

Os defeitos denominados empenamentos estão mais relacionados com as características anatômicas da própria madeira como a grã espiralada, relação entre a variação dimensional nos sentidos radial e tangencial, relação madeira juvenil/adulta e relação lenho inicial e tardio.

De acordo com a discussão apresentada por GALVÃO & JANKOWSKY (1985), o empenamento é qualquer distorção da peça de madeira em relação aos planos originais da sua superfície.

Existe ainda o defeito denominado encruamento o qual se caracteriza por uma deformação permanente na madeira.

Assim como as rachaduras superficiais e de topo, o encruamento também é decorrente das tensões internas que se desenvolvem durante o processo de secagem.

De acordo com MCMILLEN (1955), a origem do encruamento é devido aos esforços de tração e compressão que ocorrem na madeira durante um processo de secagem.

Nos primeiros estágios de secagem, as camadas superficiais secam mais rapidamente atingindo níveis de umidade abaixo do PSF, enquanto que as camadas internas secam mais lentamente. Como consequência, as camadas superficiais tendem a se retrair. Esta retração está

limitada pela parte interna que se mantém acima do PSF. Nesse momento, as células da superfície estão sujeitas a tensão de tração, enquanto que no interior das peças está ocorrendo a tensão de compressão.

Nos estágios posteriores da secagem, quando o centro vai secando abaixo do PSF, ocorre a reversão das tensões, a qual é caracterizada por uma tensão de tração no centro e de uma tensão de compressão nas camadas mais externas.

2.4. Programas de secagem.

O programa de secagem é uma sequência de interferências ou ações que são realizadas durante a secagem através dos controles de temperatura e da umidade relativa, cujos objetivos são a secagem rápida e a garantia da qualidade da madeira (BRASIL, 1981).

De acordo com RASMUSSEN (1961), os programas são classificados em geral e especial. O primeiro é empregado quando o objetivo final é a economicidade do processo. O segundo é desenvolvido para atender determinados fins como por exemplo: um máximo de resistência mecânica da madeira ou obter madeira com elevado padrão de qualidade.

Em todo programa de secagem podem ser reconhecidas três fases distintas:

a) aquecimento do ar e da madeira dentro da estufa até a

- temperatura desejada para o início do processo;
- b) secagem propriamente dita, utilizando os parâmetros (temperatura e umidade relativa) previstos no programa com o objetivo de retirar a água da madeira num mínimo de tempo e de defeitos;
 - c) uniformização e condicionamento, visando homogeneizar o máximo possível o teor de umidade em todas as peças da pilha e eliminar as tensões internas nas mesmas mediante o reumidecimento das camadas superficiais.

Um programa de secagem na maioria das vezes não atende as necessidades de todas as espécies de madeira.

JANKOWSKY (1979b), testando um programa sugerido por PRATT (1974) nas espécies *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e *Pinus strobus*, utilizando uma estufa do tipo convencional e velocidade de circulação do ar de 4,0 m/s concluiu que o programa utilizado foi adequado apenas para a espécie *Pinus caribaea* e o que não correu para a espécie *Pinus strobus*, no qual apareceram manchas nas peças oriundas do cerne.

RIETZ (1970), mostra que as possibilidades de acelerar-se a secagem por meio de programas devem basear-se nas tensões desenvolvidas na madeira durante a remoção da água. Sugere que a umidade relativa pode ser abaixada depois que a madeira sofra a reversão das tensões (tração e compressão). Isso demonstra que as fendas superficiais, se

não aparecerem até esse momento e considerando-se que o abaixamento da umidade relativa não aumenta as tensões de tração, seria aconselhável elevar-se o gradiente de umidade para aumentar a rapidez de secagem.

Um programa de secagem pode ser escolhido diretamente da literatura ou pode ser elaborado baseando-se nas recomendações e diretrizes existentes na própria literatura.

Existem diversas fontes de consulta sobre programas de secagem, tais como RASMUSSEN (1968), BROTERO (1941), BRITISH PRODUCTS LABORATORY (1950), PRATT (1974), e outros.

Devido a maioria dos programas de secagem de madeiras terem se mantido estacionários durante décadas, utilizando padrões conservadores do tipo temperatura/umidade (como os desenvolvidos pelo Forest Products Laboratory em Madison - Winsconsin/USA) inúmeros autores tem-se dedicado ao estudo de outros parâmetros, com vistas a aprimorar os programas já existentes.

Dentre os métodos preconizados para acelerar a secagem de madeiras existem aqueles que visam a otimização da temperatura e umidade relativa, e outros que preconizam uma melhor utilização da velocidade de circulação do ar dentro da estufa.

RIETZ (1970), sugere que os programas para secagem de folhosas podem ser acelerados de acordo com os

seguintes princípios:

- usar as temperaturas normalmente preconizadas pelo programa até que toda a água livre da madeira tenha sido evaporada. Quando a umidade no centro da peça estiver abaixo do PSF, a temperatura do bulbo seco pode ser elevada bruscamente até 81 a 92°C. O autor sugere que para peças de 25 mm de espessura a temperatura poderá ser elevada quando a amostra mais úmida estiver com um teor de umidade em torno de 20%;
- a umidade relativa inicial a ser utilizada na secagem da madeira dependerá da suscetibilidade que a espécie tem de apresentar fendas na superfície e no topo, sendo que durante o processo de secagem podem ser abaixadas quando as camadas superficiais apresentarem-se sob tração.

A dificuldade da elaboração de programas de secagem para madeiras tem forçado muitos autores a buscar definir uma metodologia para atender esse fim.

TERAZAWA (1965), buscando definir uma metodologia de fácil operacionalidade para a elaboração de programas de secagem de madeiras desenvolveu um estudo relacionando a ocorrência de alguns defeitos (rachaduras e colapso), em diferentes graus (1 a 8), decorrentes de uma secagem a 100°C; com a temperatura inicial e final e a diferença entre a temperatura de bulbo seco e úmido para diferentes tipos de madeiras.

BRASIL (1981), caracterizando diferentes tipos

de madeira quanto ao comportamento numa secagem convencional, utilizando dois diferentes programas, classificou-as em níveis de secagem que vão desde muito rápido (menos de 5 dias) até muito lenta (mais de 20 dias).

Com esse mesmo objetivo MENDES (1984), avaliou o comportamento de diferentes espécies de madeira em 3 (três) níveis de temperatura, 100°C, 70°C e 40°C e, baseando-se nos defeitos observados nas amostras e na taxa de secagem (massa de água/unidade de tempo) classificou as espécies em 3 (três) diferentes grupos: fácil secagem; secagem moderada e difícil secagem.

Mais recentemente DURAND (1985), avaliando algumas características da madeira (densidade, retratibilidade volumétrica e relação entre contração tangencial e radial) com relação ao comportamento numa secagem convencional, verificou haver relações entre essas características e os programas utilizados, o que lhe permitiu elaborar equações, através de uma análise canônica, que possibilitou caracterizar uma dada madeira em 7 (sete) diferentes graus de secagem, que variam de muito lento até muito rápido.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do trabalho tomou-se como base a linha de pesquisa proposta por TERAZAWA (1965). A hipótese fundamental do experimento é de que pequenas amostras de madeira quando submetidas a uma secagem drástica irão apresentar defeitos em níveis proporcionais aos que ocorreriam durante a operação industrial de secagem. Assim, a quantificação desses defeitos permitiria avaliar, de forma rápida, o grau de dificuldade para a secagem de uma determinada espécie de amostra e, conseqüentemente, sugerir um programa de secagem adequado.

Basicamente, este trabalho foi desenvolvido em duas etapas:

3.1. Fase exploratoria.

Nessa fase testaram-se 6 (seis) espécies (conforme tabela 1), com a finalidade de adequar a metodologia sugerida por TERAZAWA (1965) aos objetivos propostos para este trabalho. Tal adequação se daria através da definição dos parâmetros a serem avaliados (tipos e classificação dos defeitos, taxa de secagem, etc...), associadas as informações de literatura (temperatura inicial

(TI), temperatura final (TF) e potencial de secagem inicial (PSI) sobre as madeiras estudadas, permitindo o desenvolvimento de equações de regressão múltipla que levassem a indicação de programas de secagem para uma dada madeira.

As espécies foram selecionadas em função do conhecimento prévio sobre o comportamento em secagem, na existência de programas recomendados em literatura (RASMUSSEN, 1968; BROTERO, 1941; PRATT, 1974; entre outros), na facilidade de aquisição da madeira e no fato de serem representativas do universo de comportamento em secagem ou seja, espécies de madeira cujos programas de secagem classificassem-nas no intervalo de fácil a difícil secagem (tabela 1).

As espécies Cedro (*Cedrela fissilis*), Pinus (*Pinus caribaea*), Grápia (*Apuleia leiocarpa*) e Pinheiro do Paraná (*Araucaria angustifolia*), foram fornecidas pela Giocomet Marodin Industrias de Madeiras S/A, localizada em Quedas do Iguaçu/Pr, sendo que as espécies Eucalipto (*Eucalyptus saligna*) e Jatobá (*Hymenaea courbaril*) foram cedidas pelo Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP.

Tabela 1. Espécies selecionadas para a fase exploratória do trabalho, de acordo com o comportamento num processo de secagem convencional.

| ESPECIE | NOME | SECAGEM | NUMERO DO |
|-------------------------------|-----------|---------|-----------------|
| | VULGAR | | PROGRAMA (1) |
| <i>Pinus caribaea</i> | Pinus | Fácil | 10 |
| <i>Cedrela fissilis</i> | Cedro | Fácil | 8 |
| <i>Araucaria angustifolia</i> | Pinho | Média | 6 |
| <i>Apuleia leiocarpa</i> | Grapia | Média | 4 |
| <i>Hymenaea courbaril</i> | Jatobá | Difícil | 3 |
| <i>Eucalyptus saligna</i> | Eucalipto | Difícil | 2 |

1. JANKOWSKY, I.P. (ESALQ. Departamento de Ciências Florestais, Piracicaba) Comunicação pessoal (anexo 1).

3.1.1. Preparo do material.

Para o desenvolvimento dessa fase da pesquisa foram utilizadas trinta tábuas/tábuas/espécie/árvore, sendo 5 (cinco tábuas/espécie, de 2,5cm x 15cm x 200cm, selecionadas nas árvores de acordo com a figura 1.

Com base em informações de literatura (BRASIL, 1981) trabalhou-se com tábuas cortadas tangencialmente

devido a esse tipo de corte apresentar maiores valores de taxa de secagem (perda de massa de água por unidade de tempo) e, desse modo, maximizar o aparecimento dos defeitos que eventualmente viriam ocorrer durante o processo de secagem.

De cada tábua foram retiradas 5 (cinco) amostras destinadas ao ensaio de secagem e determinação da umidade inicial e densidade básica.

Considerou-se a umidade inicial a correspondente ao teor de água(%) no início do ensaio.

A densidade básica das amostras foi determinada pelo método da Balança Hidrostática (Norma ABCP M - 1470).

Todas as madeiras foram identificadas no Laboratório de Anatomia de Madeiras do Dpto. de Ciências Florestais, através do uso de chave dicotômica de identificação, elaborada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT (Manual de identificação das Principais Madeiras Brasileiras).

Para se evitar a perda de umidade até o início do ensaio, as amostras permaneceram submersas em água até o momento de sua utilização.

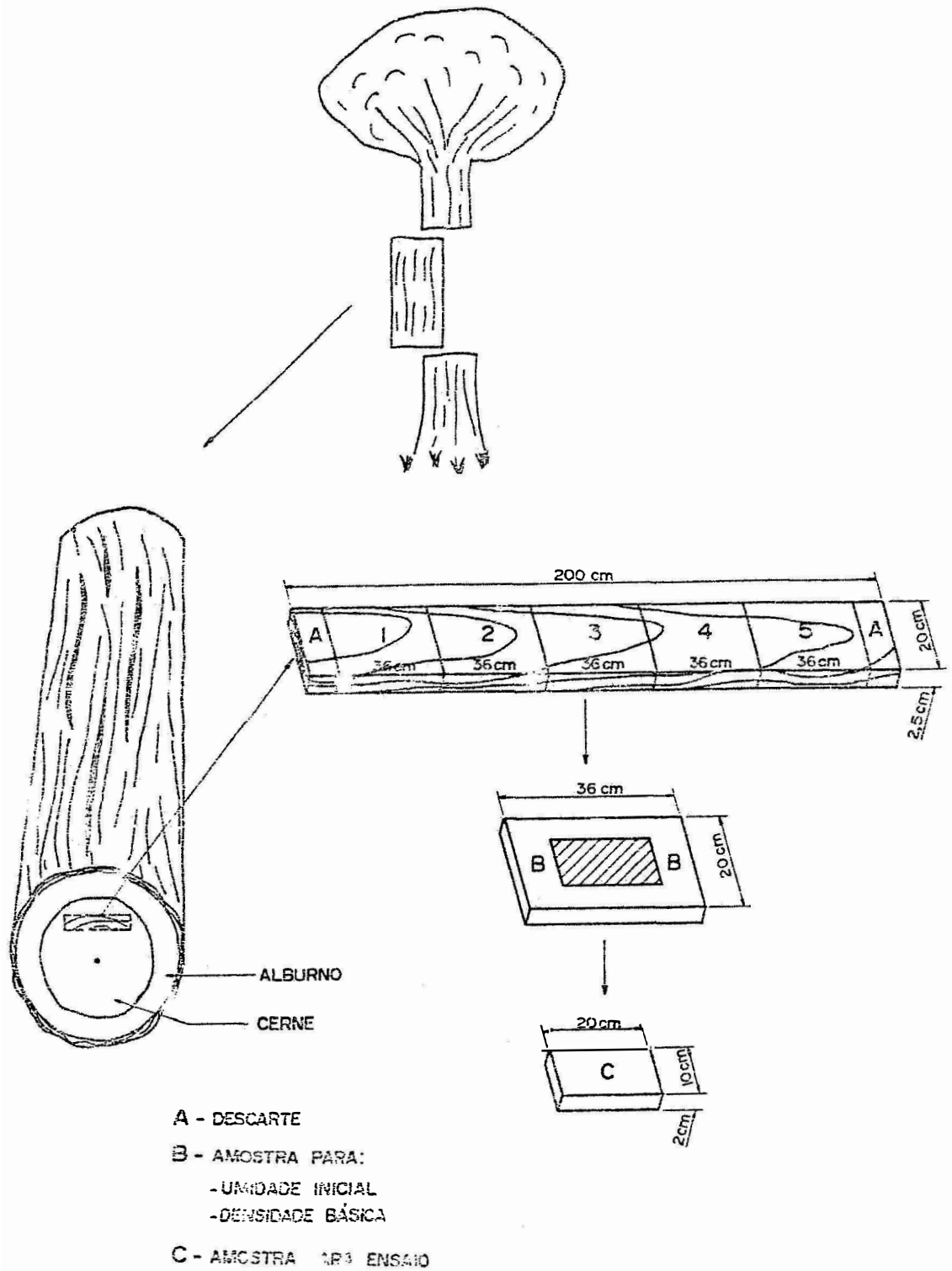


Figura 1: Esquema demonstrativo da retirada das amostras nas tábuas.

3.1.2. Condução do ensaio a 100°C

As 25 amostras de cada espécie de madeira foram divididas em 5 grupos de 5 amostras. Cada grupo foi submetido a um teste de secagem a 100°C em uma estufa de laboratório com circulação forçada de ar.

Durante o ensaio acompanhou-se a perda de massa das amostras através da pesagem em balança analítica, com precisão de 0,01 g, assim como foi feita uma avaliação quanto a ocorrência de rachaduras de topo e de superfície utilizando-se lâminas calibradoras graduadas de 0,05 mm a 1,00 mm (figura 2). O colapso foi avaliado de acordo com a figura 3.

A avaliação com lâminas calibradoras graduadas foi realizada a cada 2 (duas) horas para folhosas e a cada 1 (uma) hora para coníferas, durante as 12 (doze) primeiras horas de ensaio. Após essas primeiras doze horas a avaliação se deu a cada 3 (três) horas e 2 (duas) horas para folhosas e coníferas, respectivamente, até que as amostras acusassem uma massa correspondente a 5% de umidade.

Os empenamentos por torção longitudinal e lateral não foram avaliados nesse trabalho de modo não constituírem um problema insuperável no processo de secagem de madeiras, pois podem ser eliminados com o uso de técnicas adequadas, como por exemplo amarração de pilhas.

As informações sobre a perda de massa e as

rachaduras foram devidamente anotadas em formulário apropriado (anexo 2).

O acompanhamento da perda de umidade das amostras durante o ensaio foi feita com base na equação 1

$$TU_a = \frac{P_a (TU_i + 100)}{P_i} - 100 \quad (1)$$

onde : TU_a : Teor de umidade da amostra-teste em instante qualquer, (%)

P_a : Peso da amostra-teste nesse mesmo instante, (g)

* TU_i : Teor de umidade inicial da amostra-teste, (%)

P_i : Peso inicial da amostra-teste, (g)

* O teor de umidade inicial foi determinado através do método gravimétrico, conforme descrito por GALVÃO & JANKOWSKY (1985), dentre outros.

Após o término do ensaio foi feita uma avaliação final dos defeitos decorrentes da secagem. Nessa fase foram avaliadas as rachaduras internas através de um corte nas amostras na sua seção transversal média.

As magnitudes dos defeitos foram avaliados com base na classificação proposta nas tabelas de 2 a 5.

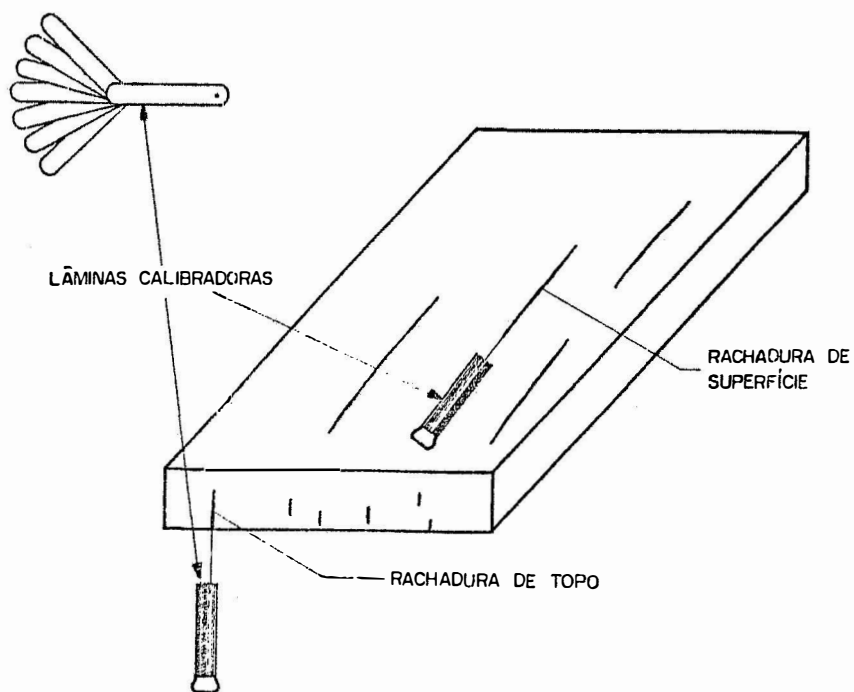


Figura 2. Esquema demonstrativo da medição das rachaduras de topo e de superfície nas amostras submetidas ao teste a 100°C.

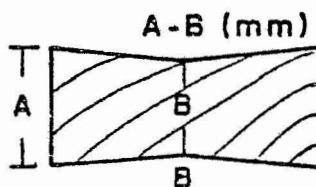


Figura 3. Esquema demonstrativo de medição do colapso para as madeiras submetidas ao teste de secagem a 100°C.

Tabela 2. Critério utilizado na classificação das rachaduras de topo para as madeiras submetidas ao teste a 100°C.*

| GRAU | DESCRIÇÃO DO DEFEITO |
|------|--|
| 1 | Ausência de rachaduras de topo : seção transversal com aspecto normal. |
| 2 | Presença de rachadura de topo : seção transversal com rachaduras muito pequenas; com altura até a metade da espessura da peça e até 0,8 mm de largura. |
| 3 | Presença de rachadura de topo : seção transversal com rachaduras muito pequenas e/ou pequenas; com altura da espessura atingindo mais da metade da espessura da peça e largura de até 0,8 mm. |
| 4 | Presença de rachadura de topo : seção transversal com rachaduras muito pequenas e/ou pequenas e/ou médias; com altura atingindo menos da metade da espessura da peça e largura de 0,8 a 1,5 mm. |
| 5 | Presença de rachadura de topo : seção transversal com rachaduras muito pequenas e/ou pequenas e/ou médias e/ou grandes; com altura atingindo mais da metade da altura da peça e largura de 0,8 a 1,5 mm. |
| 6 | Presença de rachadura de topo : seção transversal com rachaduras pequenas a muito grandes; com 1,5 mm a 3,0 mm de largura e atingindo mais da metade da espessura da peça. |

* Foram consideradas no grau máximo em que ocorreram.

Tabela 3. Critério utilizado na classificação das rachaduras de superfície para as madeiras submetidas ao teste de secagem a 100°C*.

| GRAU | DESCRIÇÃO DO DEFEITO |
|------|---|
| 1 | Ausência de rachaduras de superfície: seção longitudinal com aspecto normal. |
| 2 | Presença de rachadura de superfície : seção longitudinal com rachaduras pequenas; com até 25% do comprimento e até 0,5mm de largura. |
| 3 | Presença de rachadura de superfície : seção longitudinal com rachaduras pequenas e/ou médias; com até 50% do comprimento da peça e até 1,0mm de largura. |
| 4 | Presença de rachadura de superfície : seção longitudinal com rachaduras pequenas, médias e/ou grandes; com até 1,5mm de largura e comprimento até 75% do comprimento total da peça. |
| 5 | Presença de rachadura de superfície : seção longitudinal com rachaduras pequenas a muito grandes; com até 2,0mm de largura e comprimento acima de 75% do comprimento da peça. |

* Foram consideradas no grau máximo em que ocorreram.

Tabela 4. Critério utilizado na classificação das rachaduras internas das madeiras submetidas ao teste de secagem a 100°C. *

| GRAU | DESCRIÇÃO DOS DEFEITOS DE SECAGEM |
|------|--|
| 1 | Ausência de rachadura interna : seção transversal interna com aspecto normal. |
| 2 | Presença de rachaduras internas : seção transversal interna com pequenas rachaduras; com até 5,0 mm de altura e até 1,0mm de altura. |
| 3 | Presença de rachaduras internas : seção transversal interna com rachaduras pequenas e/ou médias; com mais de 5,0mm de altura e até 3,0mm de largura. |

* Foram consideradas no grau máximo em que ocorreram.

Tabela 5 . Critério utilizado na quantificação do colapso, para as madeiras submetidas a secagem á 100°C.

| Grau de Deformação | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|
| A - B (mm) * | até 0,5 | 0,5-1,0 | 1,0-1,5 | 1,5-2,0 |

* de acordo com esquema da figura 3.

Após a avaliação ao final do teste, as amostras foram recolocadas na estufa a 103°C para obtenção da massa de madeira no estado seco.

Para o cálculo da massa seca das amostras foi utilizada a equação 2, considerando-se que as peças de madeira, ao final do ensaio (5% de umidade), perderam a massa correspondente ao corte efetuado no seu ponto médio.

$$MSAI = \frac{MSAP \times MFAI}{MFAP} \quad (g) \quad (2)$$

onde: MSAI : massa de madeira no estado seco correspondente a amostra interna (a 0% de umidade), (g)

MSAP : massa de madeira no estado seco correspondente a amostra partida (a 0% de umidade), (g).

MFAI : massa da amostra interna (g) a 5% de umidade.

MFAP : massa da amostra partida (g) a 5% de umidade.

O teor de umidade das amostra foi calculado com base na equação 3:

$$TU = \frac{mu - mo}{mo} \times 100 \quad (3)$$

onde : TU : teor de umidade, (%)

mu : massa úmida, (g)

mo : massa seca, (g)

3.1.3. Determinação das variáveis.

Visando definir as equações que possibilitariam a determinação da temperatura inicial, temperatura final e o potencial de secagem inicial, basicamente os parâmetros mais importantes na elaboração de uma programa de secagem, foram avaliados as seguintes variáveis :

- UI - Umidade inicial, (%)
- Db - Densidade básica, (g/cm^3)
- Mi - Massa inicial de água, (g)
- M30 - Massa de água a 30 (%) de umidade, (g)
- M5 - Massa de água a 5 (%) de umidade, (g)
- T1 - Tempo de secagem (UI a 5% de umidade), (h)
- T2 - Tempo de secagem (UI a 30% de umidade), (h)
- T3 - Tempo de secagem (30% a 5% de umidade), (h)
- Tx1 - Taxa de secagem (UI a 30% de umidade), (g/h)
- Tx2 - Taxa de secagem (30 a 5% de umidade), (g/h)
- Tx3 - Taxa de secagem (UI a 5% de umidade), (g/h)
- RT1 - Rachadura de topo (UI a 30% de umidade), (magnitude)
- RT2 - Rachadura de topo (30 a 5% de umidade), (magnitude)
- RT3 - Rachadura de topo máxima, (magnitude)
- RS1 - Rachadura de superfície (UI a 30% de umidade),
(magnitude)
- RS2 - Rachadura de superfície (30 a 5% de umidade),

(magnitude)

RS3 - Rachadura de superfície máxima, (magnitude)

Ri - Rachadura interna, (magnitude)

C - Colapso

A temperatura inicial (TI), e a temperatura final (TF) são aquelas em que as madeiras são submetidas num processo de secagem convencional. O potencial de secagem inicial (PSI) representa a relação entre a umidade inicial da madeira e a umidade de equilíbrio do ambiente na qual está sendo seca.

A taxa de secagem foi assumida como sendo a massa de água retirada por unidade de tempo (g/h). As rachaduras de topo e de superfície foram consideradas no grau máximo em que ocorreram nos intervalos da condição de umidade inicial a 30% de umidade e de 30% até 5% de umidade.

Definidos essas variáveis, analisou-se a correlação existente entre cada parâmetro (TI, TF e PSI) e todas as variáveis selecionadas (anteriormente citadas), conjuntamente e separadamente, de modo a caracterizar o interrelacionamento entre as variáveis e cada parâmetro e definir as equações mais significativas para a estimativa dos parâmetros representativos dos programas de secagem. Nessa avaliação foi utilizado o método de análise STEPWISE (passo a passo), modelo de análise forward.

3.2. Fase de avaliação da metodologia.

Para o desenvolvimento dessa fase da pesquisa foram utilizadas 9 (nove) espécies de madeira ainda pouco conhecidas quanto a secagem (tabela 6). A seleção foi feita com base nas características físico-anatômicas (porosidade e densidade básica). De uma maneira geral essas características permitem fazer uma projeção do comportamento das madeiras num processo de secagem convencional ou seja, quanto mais porosa e menos densa for a madeira, teoricamente mais rápida será a secagem.

Tabela 6. Espécies selecionadas para a fase 2.

| NOME BOTANICO | NOME VULGAR |
|---|----------------------|
| <i>Erisma uncinatum</i> | Cedrinho/Quarubarana |
| <i>Manilkara huberi</i> | Maçaranduba |
| <i>Parapiptadenia rigida</i> | Angico vermelho |
| <i>Ocoteae cf. arechavaletae</i> | Canela pinho |
| <i>Prunus selowii</i> | Pessegueiro-bravo |
| <i>Patagonula americana Luehea divaricata</i> | Guajuvira |
| | Açoita cavalo |
| <i>Enterolobium contorsiliquum</i> | Timburí/Tamboril |
| <i>Ruprechtia laxiflora</i> | Marmeleiro-do-mato |

Inicialmente, todas as espécies foram submetidas a um ensaio de secagem a 100°C, utilizando-se a mesma metodologia definida na fase exploratória.

Em seguida, com base nos valores encontrados para Tx1, Tx2, M30, M5, RT1, RT2 e RT3 e as equações definidas para a estimativa do TI, TF, e PSI, selecionou-se os programas de secagem para essas espécies, comparando os parâmetros estimados (TI, TF e PSI) com os correspondentes encontrados nos programas padrões (anexo 1).

Finalmente, e com base na disponibilidade de material lenhoso, foram selecionadas as espécies Maçaranduba (*Manilkara huberi*), Quarubarana (*Erisma uncinatum*) e Angico vermelho (*Parapiptadenia rigida*) e submetidas a um ensaio de secagem, utilizando-se um secador Hildebrand Modelo HD 4004, com capacidade para 0,1 m³ (figura 4), com a finalidade de verificar se os programas propostos poderiam ser utilizados nas espécies selecionadas.

Nessa fase foram utilizadas 20 amostras/espécie cujas dimensões foram 2,5cm x 10cm x 50cm.

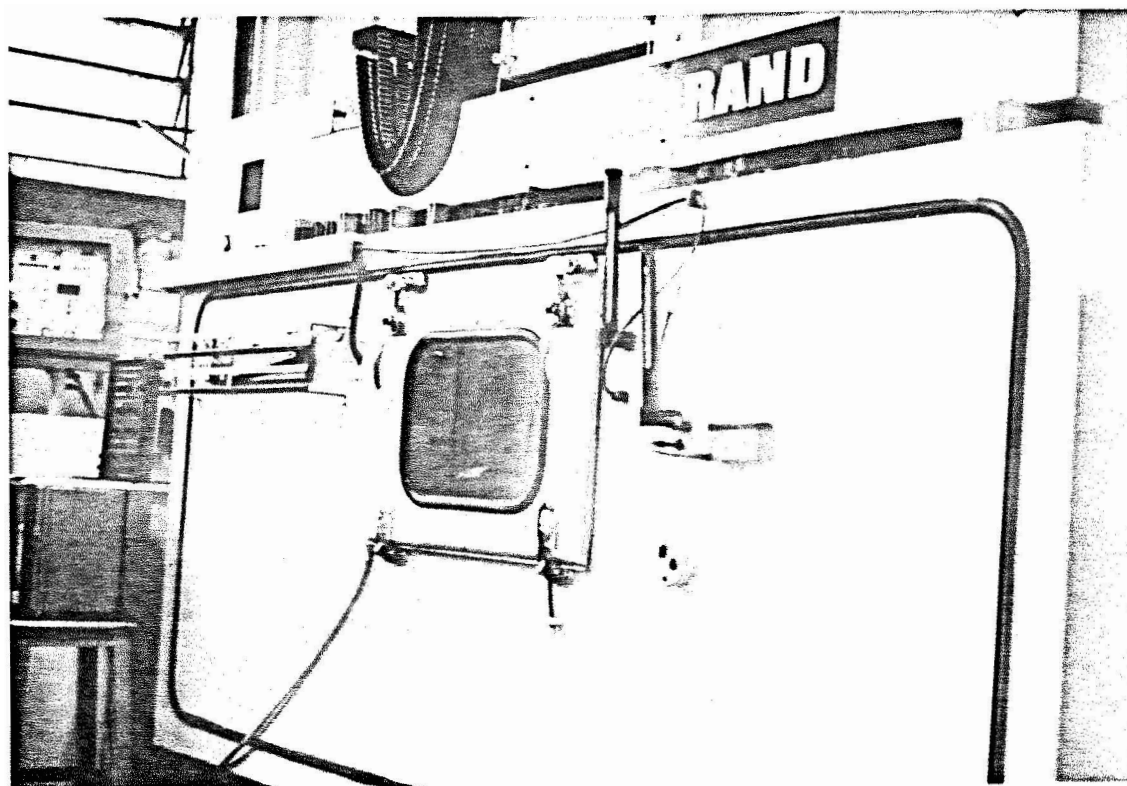


Figura 4. Secador de laboratório modelo HD 4004, onde foram realizados os ensaios de secagem.

O acompanhamento da secagem foi feita com base nas recomendações de RASMUSSEN (1961).

A determinação da umidade das peças, antes e durante os ensaios, foi feita pelo método gravimétrico e por medidores elétricos. Todas as peças foram impermeabilizadas os topos com Mobilcer-M, tendo em vista minimizar a secagem excessiva pelos topos (figura 5).

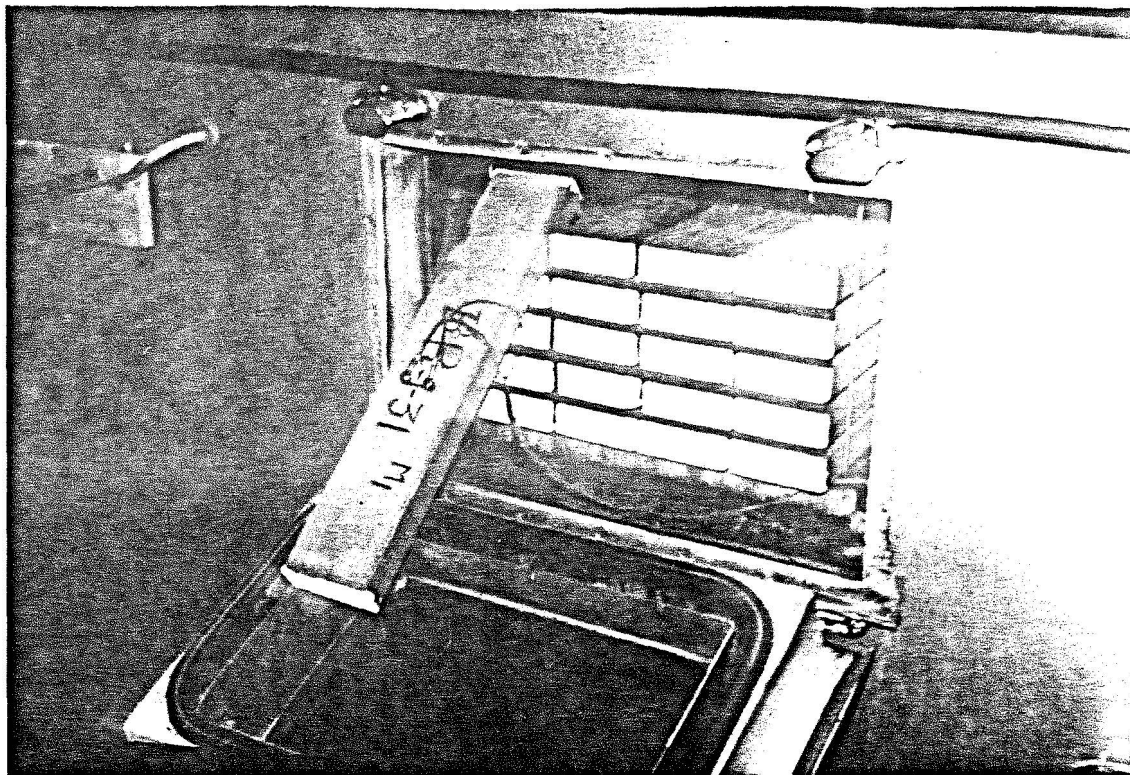


Figura 5. Secagem convencional - colocação das amostras no secador.

Ao final da secagem foi feita uma avaliação onde foram observados e quantificados os defeitos decorrentes da secagem, distribuição da umidade entre as peças e do tempo de secagem, de acordo com os critérios descritos nas tabelas 7 e 8.

Tabela 7 Critério utilizado para a classificação da tendência do aparecimento do defeito de secagem (rachaduras, empenamentos, colapso e encruamento). (MARTINS, 1984).

| AMOSTRAS - TESTE QUE APRESENTARAM DEFEITOS (%) | TENDÊNCIA |
|--|-----------|
| 0 - 10 | Ausente |
| 11 - 30 | Pequena |
| 31 - 50 | Moderada |
| 51 - 100 | Grande |

Tabela 8. Critério utilizado para a classificação do tempo de secagem num processo convencional, para tábuas de 25mm de espessura. (De acôrdo com BRASIL, 1981).

| TEMPO DE SECAGEM (dias) | CLASSIFICAÇÃO |
|----------------------------|----------------------|
| Menos de 4,0 | Muito rápida |
| 4,0 - 8,0 | Rápida |
| 8,1 - 12,0 | Moderadamente rápida |
| 12,1 - 16,0 | Moderadamente lenta |
| 16,1 - 20,0 | Lenta |
| Mais de 20,0 | Muito lenta |

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Fase exploratória

4.1.1. Avaliação da secagem a 100°C.

Com base nos resultados encontrados na fase exploratória do trabalho, referente a análise estatística dos dados, pelo Método STEPWISE (passo a passo) (com o qual buscou-se avaliar a correlação entre os principais parâmetros envolvidos na elaboração de um programa de secagem e as variáveis obtidas com a secagem das madeiras a uma temperatura de 100°C), decidiu-se discutir apenas aquelas que melhor se relacionaram, as quais são apresentadas na tabela 9.

Para melhor compreensão, optou-se por discutir as variáveis selecionadas sempre buscando caracterizar sua relação com o comportamento das espécies num processo de secagem convencional, através de uma análise comparativa com o programa de secagem encontrado em literatura (anexo 1).

Tabela 9- Interrelacionamento entre os parâmetros que melhor caracterizam um programa de secagem e as variáveis encontradas para as madeiras submetidas a um teste de secagem a 100°C.

| VARIÁVEIS | PARAMETROS | | |
|----------------------|--------------------------------|---------------|------------------------------------|
| | TEMPERATURA INICIAL (°C) | FINAL (°C) | POTENCIAL DE SECAGEM INICIAL |
| 1. Massa de água | | | |
| - A 30 % de umidade | | - | x |
| - A 5% de umidade | - | x | - |
| 2. Taxa de secagem | | | |
| - UI a 30% | x | - | x |
| - 30% a 5% | x | x | x |
| 3. Rachadura do topo | | | |
| - UI a 30% | x | x | - |
| - 30% a 5% | x | - | - |
| - Máxima | - | - | x |

(-) ... Não está relacionado

(x) ... Está relacionado

UI : umidade inicial

4.1.1.1. Massa de água na madeira.

Na tabela 10 são apresentadas as variações da massa de água em função do tempo de secagem a 100°C, para as diversas madeiras estudadas.

Conforme pode ser observado nessa tabela, os valores iniciais da massa de água não refletem nenhuma tendência de correlação com as espécies analisadas. Isto pode ser explicado pelo fato de que os valores de massa de água no início do teste de secagem a 100°C representa um valor absoluto, ou seja, não está relacionado a um mesmo nível referencial, o que ocorre quando se expressa a umidade em percentagem. Cada espécie apresenta valores de umidades iniciais diferentes, independente de sua classificação quanto a secagem, como pode ser visto na tabela 11, onde se observa o *Eucalyptus saligna* e a *Cedrela fissilis* apresentando valores de umidade inicial de 91,8% e 104,6%, respectivamente.

Por outro lado, os valores de massa de água (g), encontrados nos níveis de 30% e 5%, refletem a expectativa de facilidade de secagem das madeiras num processo convencional ou seja, quanto maior a facilidade de secagem da madeira, menor massa de água nos níveis acima considerados.

Esse relacionamento pode ser melhor visualizado na figura 6, onde se observa a diferença de

massa de água nos níveis de 30% e 5% de umidade caracterizando a posição de cada espécie.

Tabela 10 . Variação da massa de água em função do tempo de secagem a 100°C.

| TEMPO (h) | ESPÉCIES / PROGRAMAS DE SECAGEM | | | | | |
|--------------|---------------------------------|--------|----------------|----------------|------------------|----------------|
| | Pinus | Cedro | Pinho | Grapia | Jatobá | Eucalipto |
| | 10 | 8 | 6 | 4 | 3 | 2 |
| 0 | 277,5 | 180,0 | 255,9 | 203,9 | 179,5 | 213,7 |
| 2 | 214,1 | 123,9 | 188,3 | 147,6 | 129,9 | 173,0 |
| 4 | 148,0 | 95,2 | 138,5 | 102,0 | a)105,4 100,9 | 140,7 |
| 6 | 84,3 a)54,8 | 71,4 | 96,5 | a)84,3 75,9 | 82,8 | 118,2 |
| 8 | 39,8 | a)54,6 | 63,5 | 59,3 | 69,3 | 101,3 |
| 10 | 19,1 | 40,5 | a)58,3 40,8 | 47,2 | 57,9 | 87,5 |
| 12 | b)9,1 | 29,5 | 26,6 | 38,0 | 49,5 | 76,6 |
| 15 | - | 17,4 | 12,6 | 28,2 | 37,5 | a)73,5 62,9 |
| 16 | - | - | b)9,43 | - | - | - |
| 18 | - | 10,4 | - | 20,7 | 31,5 | 51,4 |
| 21 | - | b)8,9 | - | b)15,7 | 26,5 | 42,6 |
| 24 | - | - | - | - | 21,8 | 35,5 |
| 27 | - | - | - | - | b)16,6 | 29,7 |
| 30 | - | - | - | - | - | 20,1 |
| 38 | - | - | - | - | - | b)12,4 |

a) massa de água correspondente a 30% de umidade

b) massa de água correspondente a 5% de umidade

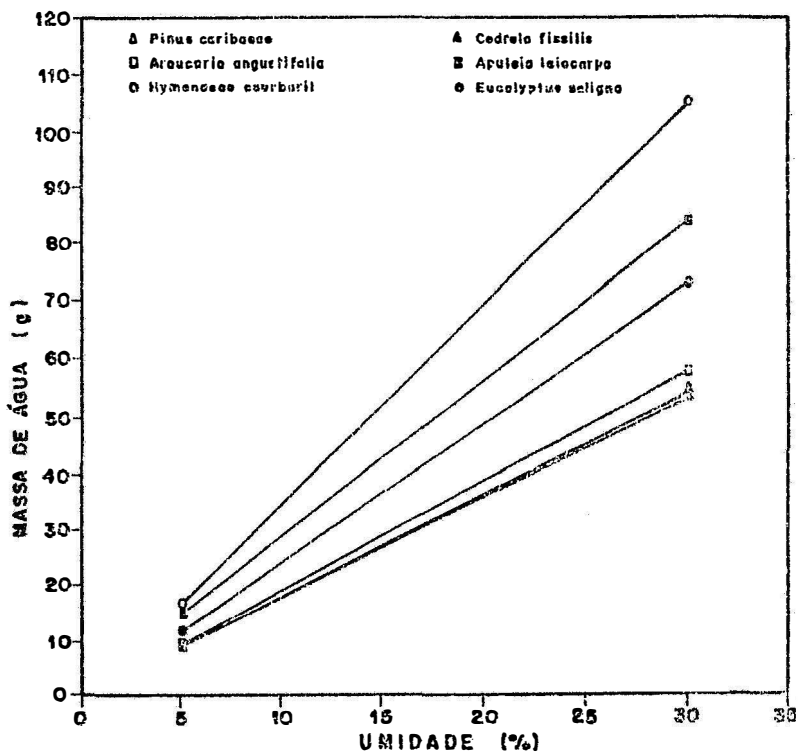


Figura 6 - Relacionamento entre a massa de água e a umidade presente na madeira nos níveis de 30% e 5% de umidade.

Tabela 11 . Valores médios do teor de umidade inicial para as madeiras da fase exploratória. Os valores dentro dos parênteses representam o erro padrão (sm) do valor médio (m).

| ESPÉCIE | UMIDADE INICIAL (%) |
|-------------------------------|---------------------------|
| <i>Pinus caribaea</i> | 143,9 (16,9) |
| <i>Cedrela fissilis</i> | 104,1 (14,9) |
| <i>Araucaria angustifolia</i> | 130,6 (14,5) |
| <i>Apuleia leiocarpa</i> | 72,2 (3,7) |
| <i>Hymenaea courbaril</i> | 51,2 (3,6) |
| <i>Eucalyptus saligna</i> | 91,8 (14,6) |

4.1.1.2. Taxa de secagem

Na tabela 12 são apresentados os valores da variação da taxa de secagem determinados nos dois estágios (acima e abaixo do PSF) para as madeiras submetidas ao teste de secagem a 100°C.

De acôrdo com os resultados encontrados a mesma tendência do comportamento da massa de água (g) pode ser observado, onde as espécies caracterizadas através do programa de secagem como sendo de fácil secagem num processo

convencional se comportam de modo semelhante numa secagem a 100°C.

Tabela 12. Valores da taxa de secagem (g/h) [Tx1] e [Tx2] para as diferentes madeiras ensaiadas na fase exploratória.

| ESPÉCIES | PROGRAMA DE SECAGEM | TAXA DE SECAGEM | |
|-------------------------------|---------------------|-----------------|-------|
| | | [Tx1] | [Tx2] |
| <i>Pinus caribaea</i> | 10 | 28,97 | 10,75 |
| <i>Cadrela fissilis</i> | 8 | 15,36 | 4,00 |
| <i>Araucaria angustifolia</i> | 6 | 23,02 | 6,63 |
| <i>Apuleia leiocarpa</i> | 4 | 22,40 | 4,28 |
| <i>Hymenaea courbaril</i> | 3 | 20,51 | 3,73 |
| <i>Eucalyptus saligna</i> | 2 | 10,94 | 2,50 |

Nas tabelas de 13 a 18 são apresentados as variações individuais da taxa de secagem (g/h) e da umidade em função do tempo.

Conforme pode ser observado, todos os valores encontrados nas primeiras 2 horas de ensaio apresentarem-se bastante altos. Os maiores valores foram encontrados nas madeiras que tinham os maiores teores de umidade no início do ensaio, como *Pinus caribaea* e *Araucaria angustifolia*, 147% e 134%, respectivamente.

De uma maneira geral, os valores da taxa de secagem se mantiveram altos até próximos a 30% de umidade para todas as espécies. Isto deve estar relacionado com a predominância da retirada da água capilar.

Esse comportamento tende a se modificar a medida em que a madeira vai perdendo água higroscópica, pois é necessário fornecer mais energia a madeira para que haja o rompimento das pontes de hidrogênio que mantem esse tipo de água aderida as paredes celulares.

Tabela 13. Variação da taxa de secagem (g/h) e da umidade da madeira (%) em função do tempo de secagem para a espécie *Pinus caribaea*, durante a secagem a 100°C. Os valores entre parênteses representam o erro padrão (sm) do valor medio (m).

| TEMPO (h) | UMIDADE (%) | TAXA DE SECAGEM (g/h) |
|--------------|----------------|--------------------------|
| 0 | 143,9 (17,67) | - |
| 2 | 113,5 (13,51) | 31,67 (4,70) |
| 4 | 78,5 (11,76) | 33,07 (3,74) |
| 6 | 44,7 (9,51) | 31,86 (1,18) |
| 8 | 21,1 (5,83) | 22,24 (2,32) |
| 10 | 9,9 (1,33) | 10,34 (4,02) |
| 12 | 4,8 (0,70) | 5,00 (1,24) |

Tabela 14. Variação da taxa de secagem (g/h) e da umidade da madeira (%) em função do tempo de secagem para a madeira de *Cedrela fissilis*, quando submetida a uma secagem a 100°C. Os valores entre parênteses representam o desvio padrão (sm) do valor médio (m).

| TEMPO (h) | UMIDADE (%) | TAXA DE SECAGEM (g/h) |
|--------------|----------------|--------------------------|
| 0 | 104,10 (17,01) | - |
| 2 | 73,62 (11,75) | 28,06 (6,71) |
| 4 | 54,27 (7,92) | 14,30 (4,26) |
| 6 | 40,65 (5,43) | 11,93 (0,81) |
| 10 | 22,97 (2,83) | 7,72 (0,39) |
| 12 | 16,72 (2,08) | 5,46 (0,37) |
| 15 | 9,80 (1,46) | 4,04 (0,38) |
| 18 | 5,80 (1,26) | 2,33 (0,39) |
| 21 | 4,80 (1,27) | 1,20 (0,32) |

Tabela 15. Variação da taxa de secagem (g/h) e da umidade da madeira (%) em função do tempo de secagem para *Araucaria angustifolia*, quando submetida a uma secagem a 100°C. Os valores entre parênteses representam o erro padrão (sm) do valor médio (m).

| TEMPO (h) | UMIDADE (%) | TAXA DE SECAGEM (g/h) |
|--------------|----------------|--------------------------|
| 0 | 130,6 (12,9) | - |
| 1 | 116,8 (13,9) | 33,71 (4,0) |
| 2 | 98,8 (14,1) | 33,82 (3,6) |
| 3 | 83,5 (13,8) | 29,32 (2,2) |
| 4 | 72,7 (13,0) | 20,47 (2,1) |
| 5 | 61,2 (12,2) | 22,03 (2,4) |
| 6 | 50,7 (11,2) | 19,97 (2,5) |
| 7 | 41,2 (9,9) | 17,89 (2,7) |
| 8 | 33,3 (8,8) | 15,14 (2,6) |
| 9 | 26,7 (7,9) | 12,58 (2,2) |
| 10 | 21,4 (6,8) | 10,05 (2,3) |
| 11 | 17,7 (6,1) | 7,1 (1,6) |
| 12 | 13,9 (5,2) | 7,2 (1,8) |
| 15 | 8,3 (3,5) | 5,3 (1,5) |
| 16,8 | 5,0 (2,1) | 3,2 (1,4) |

Tabela 16. Variação da taxa de secagem (g/h) e da umidade da madeira (%) em função do tempo de secagem para *Apuleia leiocarpa*, quando submetida a uma secagem a 100°C. Os valores entre parênteses representam o erro padrão (sm) do valor médio (m).

| TEMPO (h) | UMIDADE (%) | TAXA DE SECAGEM (g/h) |
|--------------|----------------|--------------------------|
| 0 | 72,2 (3,74) | - |
| 2 | 52,28 (3,06) | 28,19 (2,15) |
| 4 | 36,12 (1,83) | 22,80 (1,85) |
| 6 | 26,90 (1,53) | 13,01 (1,38) |
| 8 | 20,98 (1,51) | 8,34 (0,45) |
| 10 | 16,78 (1,40) | 6,01 (0,35) |
| 12 | 13,46 (1,31) | 4,62 (0,26) |
| 15 | 9,90 (1,11) | 3,33 (0,20) |
| 18 | 7,32 (0,86) | 2,52 (0,21) |
| 21 | 5,56 (0,65) | 1,77 (0,20) |

Tabela 17. Variação da taxa de secagem (g/h) e da umidade da madeira (%) em função do tempo de secagem para *Hymenaea courbaril*, quando submetida a uma secagem a 100°C. Os valores entre parênteses representam o erro padrão (sm) do valor médio (m).

| TEMPO (h) | UMIDADE (%) | TAXA DE SECAGEM (g/h) |
|--------------|----------------|--------------------------|
| 0 | 51,2 (3,56) | — |
| 2 | 37,0 (2,46) | 24,82 (6,52) |
| 4 | 28,7 (2,52) | 14,48 (1,41) |
| 6 | 23,6 (2,34) | 9,04 (0,62) |
| 8 | 19,6 (2,21) | 6,80 (0,40) |
| 10 | 16,4 (2,04) | 5,66 (0,50) |
| 12 | 14,1 (1,87) | 4,21 (0,39) |
| 15 | 10,6 (1,91) | 3,99 (0,39) |
| 18 | 8,9 (1,41) | 2,00 (0,73) |
| 21 | 7,5 (1,56) | 1,64 (0,36) |
| 24 | 6,1 (1,08) | 1,79 (0,96) |
| 27 | 4,6 (0,74) | 1,12 (0,05) |

Tabela 18. Variação da taxa de secagem (g/h) e da umidade da madeira (%) em função do tempo de secagem para *Eucalyptus saligna*, quando submetida a uma secagem a 100°C. Os valores entre parênteses representam o erro padrão (sm) do valor médio (m).

| TEMPO (h) | UMIDADE (%) | TAXA DE SECAGEM (g/h) |
|--------------|----------------|--------------------------|
| 0 | 91,8 (12,6) | - |
| 2 | 67,8 (11,5) | 20,36 (0,79) |
| 4 | 55,1 (9,4) | 16,16 (1,95) |
| 6 | 46,3 (8,0) | 11,23 (1,33) |
| 8 | 39,7 (6,8) | 11,70 (6,70) |
| 10 | 34,3 (5,8) | 9,54 (5,56) |
| 12 | 30,0 (4,9) | 5,44 (0,88) |
| 15 | 24,6 (3,9) | 4,57 (0,71) |
| 18 | 20,1 (3,0) | 3,83 (0,55) |
| 21 | 16,7 (2,3) | 2,93 (0,48) |
| 24 | 13,8 (1,7) | 2,39 (0,36) |
| 27 | 11,5 (1,5) | 1,92 (0,20) |
| 30 | 8,2 (0,9) | 2,93 (0,29) |
| 38 | 5,0 | 0,96 |

4.1.1.3. Rachaduras de topo.

Na figura 7 são apresentados os resultados encontrados para as rachaduras de topo nas madeiras submetidas a secagem a 100°C.

De uma maneira geral, o comportamento das madeiras segue o mesmo padrão para perda de massa de água e taxa de secagem, ou seja, espécies consideradas de fácil secagem tendem a apresentar rachaduras de topo em pequenas magnitudes de intensidade (numa escala de 1 a 6), enquanto que as madeiras difíceis de secar num processo convencional apresentam, no ensaio a 100°C, rachaduras mais intensas.

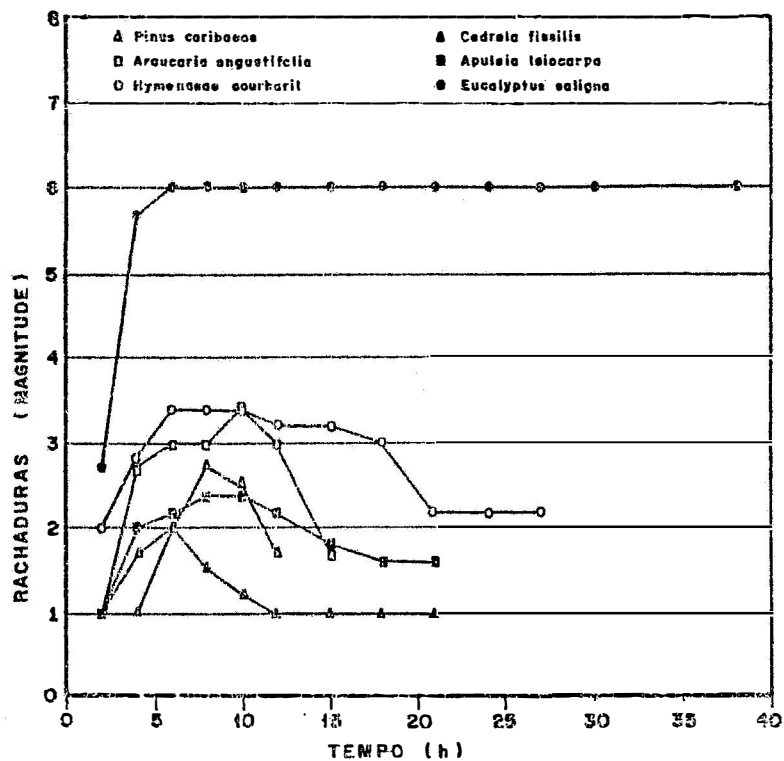


Figura 7. Rachaduras de topo em função do tempo na secagem a 100°C.

Nas figuras de 8 a 13 são apresentados de forma individualizada os comportamentos das diversas madeiras.

Conforme pode ser observado em todas as madeiras, com excessão de *Pinus caribaea*, a rachadura de topo surge no início da secagem, atingindo um valor máximo que varia de acôrdo com a espécie para, em seguida, diminuir seu grau de intensidade (magnitudo) ou até visualmente fechar na sua totalidade, como é o caso de *Cedrela fissilis*.

O comportamento da espécie *Pinus caribaea* pode ser explicado pela alta permeabilidade que a madeira possui.

A formação das rachaduras de topo, como já foi discutido anteriormente, se deve a diferença entre as retrações tangencial e radial, o que se acentua devido a elevada temperatura empregada no ensaio, ou ainda a diferença na velocidade de movimentação da água entre as direções paralela e transversal as fibras.

De uma forma geral, o comportamento das madeiras, com relação a rachadura de topo, quando submetidas a um ensaio de secagem a 100°C parece seguir o mesmo padrão de variação das tensões de secagem (tração e compressão).

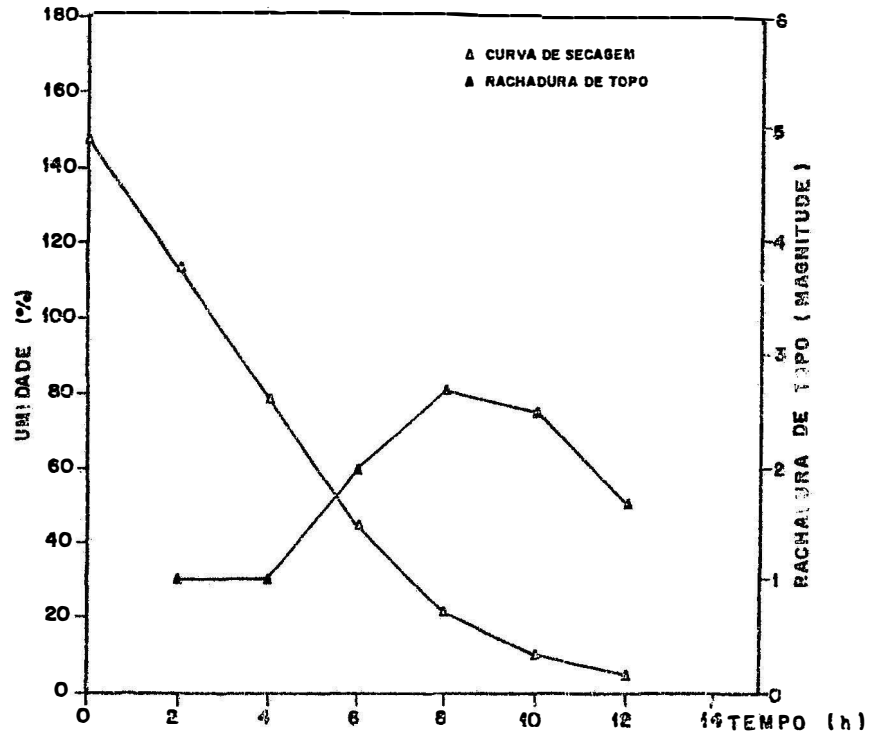


Figura 8 . Curva de secagem e rachadura de topo, em função do tempo de secagem, para amadeira de *Pinus caribaea* quando submetida ao teste a 100°C.

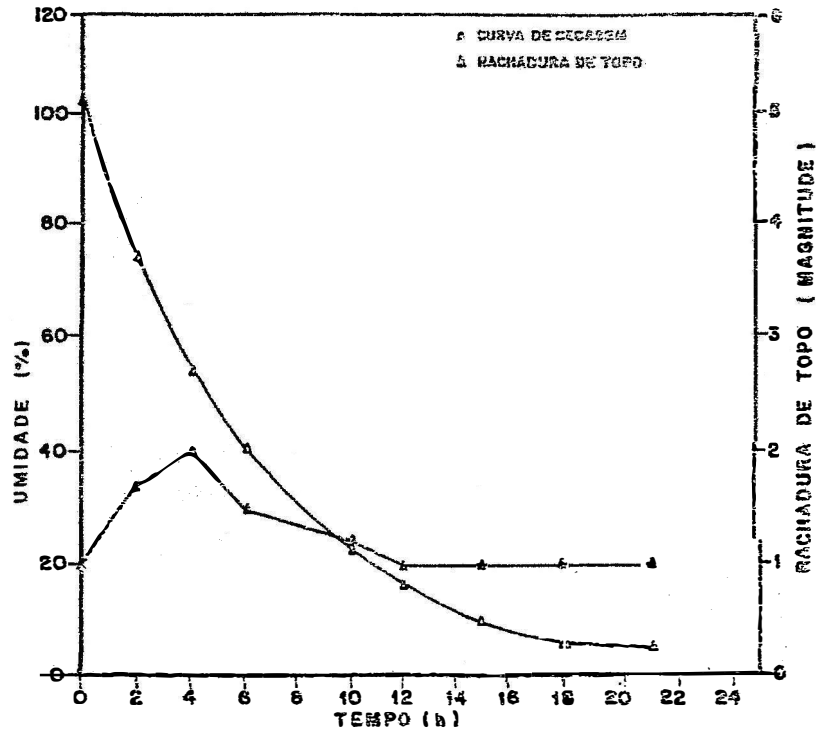


Figura 9 . Curva de secagem e rachadura de topo, em função do tempo de secagem, para a madeira de *Cedrela fissilis* quando submetida ao teste a 100°C.

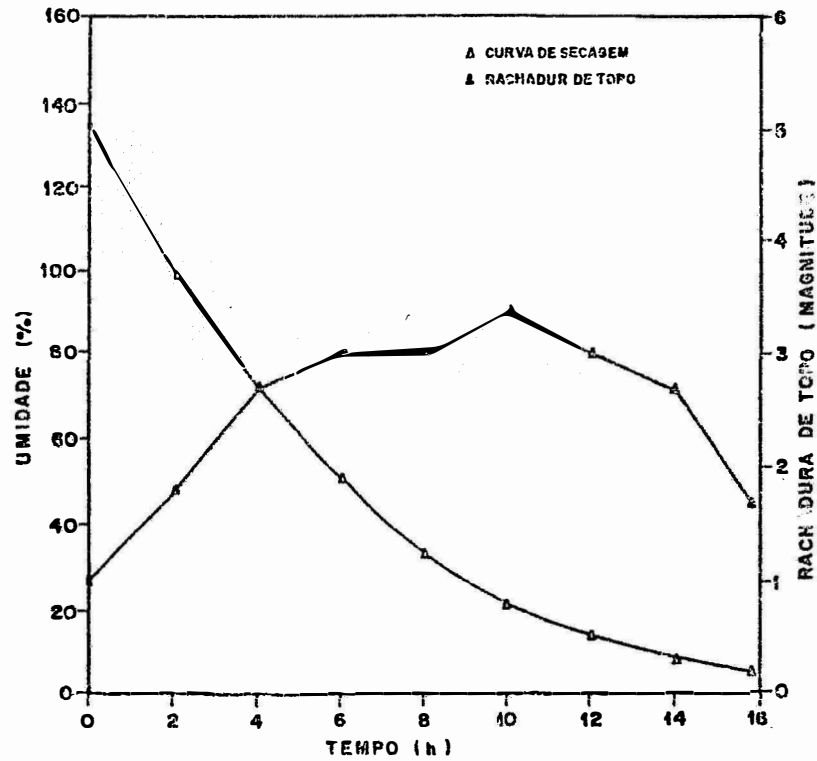


Figura 10. Curva de secagem e rachadura de topo, em função do tempo de secagem, para a madeira de *Araucaria angustifolia* quando submetida ao teste a 100°C.

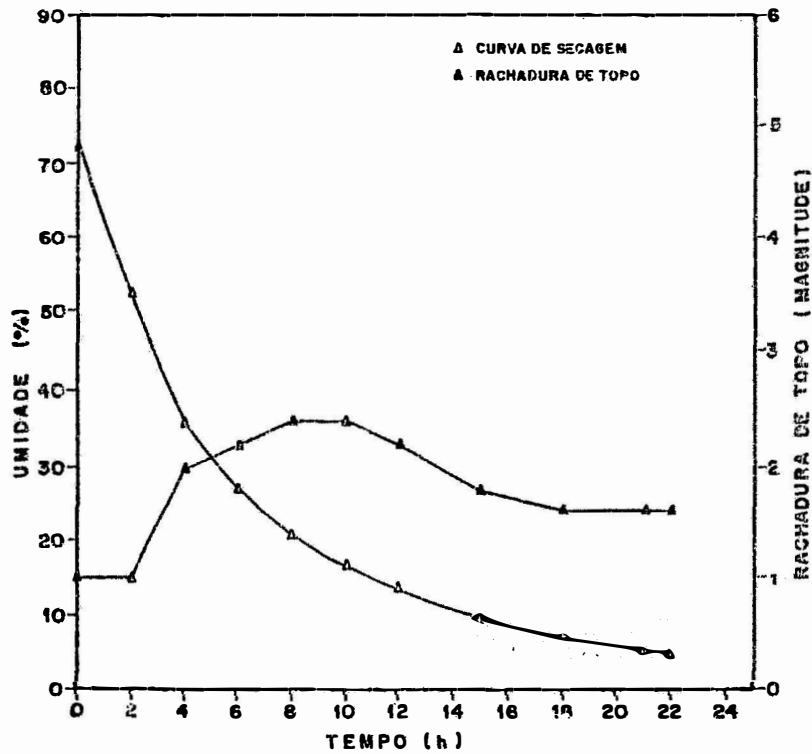


Figura 11. Curva de secagem e rachadura de topo, em função do tempo de secagem, para a madeira de *Apuleia leiocarpa* quando submetida ao teste a 100°C.

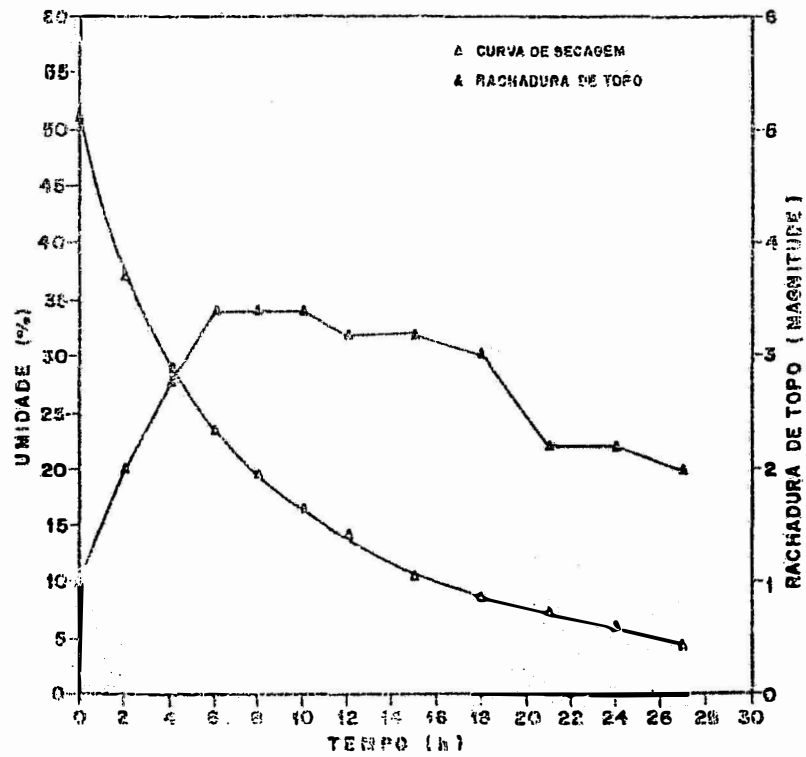


Figura 12. Curva de secagem e rachadura de topo, em função do tempo de secagem, para a madeira de *Hymenaea courbaril* quando submetida ao teste a 100°C.

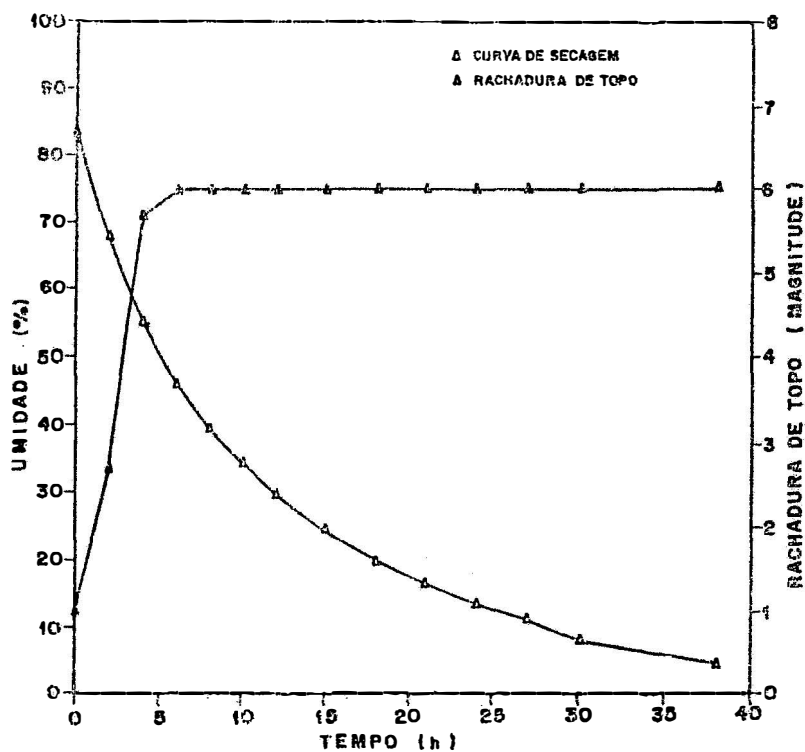


Figura 13 . Curva de secagem e rachadura de topo, em função do tempo de secagem, para a madeira de *Eucalyptus saligna* quando submetida ao teste a 100°C.

4.2. Fase de aplicação da metodologia

4.2.1. Elaboração dos programas de secagem.

4.2.1.1. Definição das equações.

Nas tabelas de 19 a 24 são apresentados os resultados referentes a análise de correlação pelo método Stepwise (passo a passo) nas variáveis obtidas com a secagem a 100°C.

Tabela 19. Correlação entre a temperatura inicial e as variáveis RT1 (rachadura de topo de UI a 30%), RT2 (rachadura de topo de 30% a 5%), TX1 (taxa de secagem de UI a 30%) e TX2 (taxa de secagem de 30% a 5%)

| TERMO | COEFICIENTE | TESTE t |
|-------|-------------|-----------|
| Bo | 50.20891 | 0 |
| Tx1 | -0.90964 | -6.64339 |
| Tx2 | 3.628481 | 13.14702 |
| RT1 | -0.501675 | -1.01924 |
| RT2 | -1.215086 | -2.426856 |

Tabela 20 . Análise da variância aplicada aos resultados da
tabela 19.

| VARIAÇÃO | GL | SQ | DM | F | R2 |
|-----------|----|----------|----------|---------|-------|
| REGRESSÃO | 4 | 1529.334 | 382.3336 | 69.60** | 0.917 |
| RESIDUO | 25 | 137.332 | 5.4932 | | |
| TOTAL | 29 | 1666.666 | 57.47126 | | |

** : significativo ao nível de 1% de probabilidade

Tabela 21 . Correlação entre o potencial de secagem
inicial e as variáveis M30 (massa de água a
30%), TX1 (taxa de secagem de UI a 30%), TX2
(taxa de secagem de 30% a 5%) e RT3 (rachadura
de topo máxima).

| TERMO | COEFICIENTE | TESTE t |
|-------|-------------|----------|
| Bo | 4.71084 | 0 |
| M30 | -0.091620 | -3.03388 |
| TX1 | -0.064489 | -3.97251 |
| TX2 | 0.204631 | 5.52357 |
| RT3 | -0.224041 | -6.68084 |

Tabela 22 : Análise da variância aplicada aos resultados da
tabela 21.

| VARIACÃO | GL | SQ | QM | F | R2 |
|-----------|----|---------|--------|---------|-------|
| REGRESSÃO | 4 | 9.8617 | 2.4654 | 59.36** | 0.905 |
| RESIDUO | 25 | 1.8617 | 0.0415 | | |
| TOTAL | 29 | 10.9000 | 0.1376 | | |

** . significativo ao nível de 1% de probabilidade

Tabela 23 . Correlação entre a temperatura final e as
variáveis RT1 (rachadura de topo de UI a 30%),
M5 (massa de água a 5%) e TX2 (taxa de secagem
de 30% a 5%).

| TERMO | COEFICIENTE | TESTE t |
|-------|-------------|-----------|
| B0 | 77.85043 | 0 |
| M5 | -0.57971 | -5.49657 |
| TX2 | 1.18438 | 9.43502 |
| RT1 | -2.35447 | -11.45782 |

Tabela 24 . Análise da variância aplicada aos resultados da tabela 23.

| VARIACÃO | GL | SQ | QM | F | R2 |
|-----------|----|--------|----------|--------|-------|
| REGRESSÃO | 4 | 1177.1 | 392.3667 | 139.93 | 0.942 |
| RESIDUO | 25 | 72.9 | 2.8038 | | |
| TOTAL | 29 | 1250.0 | 43.103 | | |

** : significativo ao nível de 1% de probabilidade

Na tabela 25 são encontrados os valores médios obtidos para as variáveis selecionadas pelo Método STEPWISE, para as madeiras submetidas a secagem a 100°C.

Como pode ser observado, com excessão da taxa de secagem (UI a 30%) e (30 a 5%), todas as variáveis apresentam uma tendência de relacionamento, de modo crescente, com as madeiras quando submetidas a um processo de secagem convencional (representada pelos programas de secagem)

Tabela 25 Médias das variáveis analisadas pelo Método STEPWISE (passo a passo) para as madeiras submetidas a secagem a 100°C.

| VARIÁVEIS | ESPÉCIES/PROGRAMAS | | | | | |
|-----------|--------------------|-------|-------|--------|--------|-----------|
| | PINUS | CEDRO | PINHO | GRAPIA | JATOBÁ | EUCALIPTO |
| | 10 | 8 | 6 | 4 | 3 | 2 |
| M30 | 54.85 | 54.65 | 58.33 | 84.73 | 105.45 | 73.55 |
| M5 | 9.11 | 9.14 | 9.73 | 14.10 | 17.67 | 11.69 |
| Tx1 | 28.97 | 15.36 | 23.02 | 22.40 | 20.41 | 10.94 |
| Tx2 | 10.75 | 4.00 | 6.63 | 4.28 | 3.73 | 2.54 |
| RT1 | 2.60 | 1.40 | 3.40 | 1.80 | 2.80 | 6.00 |
| R12 | 1.60 | 1.00 | 2.00 | 1.96 | 2.80 | 5.40 |
| RT3 | 2.80 | 1.80 | 3.40 | 2.40 | 3.40 | 6.00 |

Na tabela 26 são representados os valores comparativos para as temperaturas inicial (TI), temperatura final (TF) e o potencial de secagem inicial (PSI) existentes nos programas padrões (anexo 1) e os propostos pela metodologia, para as espécies estudadas na fase exploratória

Como pode ser observado os valores propostos estão bem próximos aqueles existentes na literatura, o que comprova a eficácia da metodologia

Tabela 26: Valores comparativos para as temperaturas inicial e final e potencial de secagem inicial referente as madeiras submetidas ao ensaio de 100°C.

| ESPECIE | TEMPERATURA | | | | POTENCIAL DE SECAGEM | |
|-----------|-------------|----|----|-------|----------------------|-----|
| | * INICIAL | | ** | FINAL | INICIAL | *** |
| | A | B | A | B | A | B |
| PINUS | 60 | 59 | 75 | 75 | 4.6 | 4.6 |
| CEDRO | 60 | 58 | 75 | 75 | 4.6 | 4.6 |
| PINHO | 50 | 52 | 70 | 70 | 3.3 | 3.5 |
| GRAPIA | 50 | 53 | 70 | 69 | 2.6 | 2.9 |
| JATOBÁ | 50 | 49 | 65 | 66 | 2.6 | 2.6 |
| EUCALIPTO | 40 | 40 | 65 | 65 | 3.4 | 3.6 |

$$* \quad TI = 50.21 - 0.502 [RT1] + 3.628 [Tx2] - 0.910 [Tx1] - 1.215 [RT2]$$

$$** \quad TF = 77.85 - 2.364 [RT1] - 0.580 [M5] + 1.184 [Tx2]$$

$$*** \quad PSI = 4.710 - 0.009 [M30] + 0.205 [Tx2] - 0.064 [Tx1] - 0.224 [RT3]$$

A : Valor existente nos programas padrões

B : Valor proposto pela metodologia

4.2.1.2. Aplicação da metodologia

Nas tabelas 27 e 28 são apresentados, respectivamente, os resultados do teste de secagem á 100°C efetuado de acordo com a metodologia proposta e os programas sugeridos, conforme anexo 1, a partir da aplicação das equações anteriormente citadas.

Conforme pode ser observado na tabela 28, a algumas espécies são sugeridos os mesmos programas de secagem devido apresentarem uma afinidade no comportamento diante a secagem a 100°C. No entanto, essas madeiras não poderão fazer parte de um mesmo ensaio de secagem convencional, haja visto as diferenças nas umidades iniciais encontradas (tabela 29).

Tabela 27. Médias obtidas para as madeiras submetidas a secagem a 100°C referente a fase de avaliação da metodologia.

| ESPECIE | P A R Â M E T R O S | | | | | | |
|--------------|---------------------|-------|-----------------------|------|-------------------|-----|-----|
| | MASSA DE AGUA (g) | | TAXA DE SECAGEM (g/h) | | RALHADURA DE TOPO | | |
| | M30 | M5 | TX1 | TX2 | RT1 | RT2 | RT3 |
| Guajuvira | 77.80 | 13.11 | 19.14 | 8.15 | 3.0 | 3.5 | 3.5 |
| Angico | 91.23 | 15.32 | 12.55 | 3.52 | 3.0 | 3.0 | 3.0 |
| Pessequeiro | 71.66 | 11.89 | 14.77 | 4.52 | 3.0 | 2.7 | 3.0 |
| Marmeleiro | 70.08 | 11.71 | 11.87 | 3.92 | 2.2 | 2.2 | 2.2 |
| Timburi | 60.73 | 10.13 | 9.27 | 2.69 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| Canela pinho | 49.16 | 8.26 | 15.89 | 4.73 | 3.0 | 3.0 | 3.0 |
| Mandioqueira | 57.55 | 9.80 | 15.57 | 5.83 | 2.2 | 1.6 | 2.2 |
| Açait.cavalo | 62.06 | 10.31 | 16.61 | 5.65 | 3.0 | 3.0 | 3.0 |
| Maçaranduba | 106.78 | 17.19 | 8.68 | 2.39 | 2.3 | 4.5 | 4.5 |
| Quarubarana | 57.53 | 9.60 | 13.19 | 4.72 | 5.0 | 5.0 | 5.0 |

Tabela 29. Umidade inicial das madeiras estudadas na fase de avaliação da metodologia.

| ESPÉCIE | UMIDADE INICIAL (%) |
|---------------|---------------------|
| Maçaranduba | 35.2 |
| Angico | 52.9 |
| Guarubarana | 100.2 |
| Canela pinho | 101.2 |
| Açoita cavalo | 104.6 |
| Guajuvira | 64.3 |
| Pessegueiro | 85.2 |
| Marmeleiro | 73.8 |
| Timburi | 135.3 |

4.2.2. Avaliação da secagem convencional.

A avaliação da secagem convencional foi feita através de uma análise individual da velocidade de secagem, umidade final das peças e qualidade da madeira.

4.2.2.1. Velocidade de secagem

Nas tabelas 30 a 32 são apresentadas as taxas de secagem em função da umidade da madeira e do tempo de

secagem para *Parapiptadenia rigida* (Angico), *Manilkara huberi* (Maçaranduba) e *Erisma uncinatum* (Quarubarana).

Conforme pode ser observado, durante os três testes ocorreram taxas de secagem inicial diferenciadas atingindo valores de 13.3% / dia para o Angico, 1.9% / dia para a Maçaranduba e 18.2% / dia para o Quarubarana. A taxa diminuiu gradativamente para 0.5% / dia para o Angico, 0.7% / dia para a Maçaranduba e 8.0% / dia para o Quarubarana, ao final do processo.

Muito embora as espécies Angico Quarubarana e tenham sido **secadas** utilizando-se o mesmoprograma, seus comportamentos com relação a taxa de secagem acima e abaixo do PSF foram diferentes.

Tabela 30. Variação da taxa de secagem (%/dia), e da umidade da madeira (%) em função do tempo de secagem, relacionada com a temperatura do secador para a madeira de *Parapiptadenia rigida*. Os valores entre parênteses representam o erro padrão (sm) do valor médio (m).

| TEMPO (DIAS) | UMIDADE (%) | | TAXA DE SECAGEM (%/dia) | | TEMPERATURA (°C) |
|-----------------|-------------|--------|-------------------------|--------|---------------------|
| | (MÉDIA) | (sm) | (MÉDIA) | (sm) | |
| 0 | 53.5 | (2.41) | - | - | 50 |
| 1 | 40.2 | (1.98) | 13.3 | (2.21) | 50 |
| 2 | 36.1 | (2.31) | 4.1 | (0.80) | 50 |
| 3 | 31.5 | (2.51) | 4.6 | (0.60) | 50 |
| 4 | 26.3 | (2.50) | 5.2 | (0.75) | 55 |
| 5 | 20.3 | (2.30) | 6.0 | (0.60) | 65 |
| 6 | 16.4 | (2.20) | 3.9 | (0.36) | 70 |
| 7 | 13.8 | (1.59) | 2.6 | (0.15) | 70 |
| 8 | 10.1 | (1.24) | 3.7 | (0.15) | 70 |
| 9 | 9.3 | (0.96) | 0.8 | (0.04) | 70 |
| 10 | 7.5 | (0.55) | 1.8 | (0.02) | 70 |
| 11 | 7.0 | (0.76) | 0.5 | (0.01) | 70 |

Tabela 31. Variação da taxa de secagem (%/dia), e da umidade da madeira (%) em função do tempo de secagem, relacionada com a temperatura do secador para *Manilkara huberi*. Os valores entre parênteses representam o erro padrão (sm) do valor médio (m).

| TEMPO (DIAS) | UMIDADE (%) | | TAXA DE SECAGEM (%/dia) | | TEMPERATURA (°C) |
|-----------------|-------------|--------|-------------------------|--------|---------------------|
| | (MÉDIA) | (sm) | (MÉDIA) | (sm) | |
| 0 | 33.5 | (0.36) | - | - | 40 |
| 2 | 29.6 | (0.35) | 1.9 | (0.09) | 45 |
| 4 | 28.1 | (0.37) | 0.7 | (0.04) | 45 |
| 6 | 25.8 | (0.37) | 1.1 | (0.15) | 45 |
| 8 | 22.9 | (0.35) | 1.4 | (0.20) | 55 |
| 10 | 21.5 | (0.34) | 0.7 | (0.10) | 55 |
| 12 | 18.0 | (0.25) | 1.7 | (0.35) | 65 |
| 14 | 15.7 | (0.15) | 1.1 | (0.07) | 65 |
| 16 | 13.0 | (0.18) | 1.3 | (0.08) | 65 |
| 18 | 11.6 | (0.09) | 0.7 | (0.02) | 65 |
| 20 | 10.6 | (0,08) | 0.5 | (0.01) | 65 |

Tabela 32. Variação da taxa de secagem (%/dia), e da umidade da madeira (%) em função do tempo de secagem, relacionada com a temperatura do secador para *Erisma uncinatum*. Os valores entre parênteses representam o erro padrão (sm) do valor médio (m).

| TEMPO (DIAS) | UMIDADE (%) | | TAXA DE SECAGEM (%/dia) | | TEMPERATURA (°C) |
|-----------------|-------------|--------|-------------------------|--------|---------------------|
| | (MÉDIA) | (sm) | (MÉDIA) | (sm) | |
| 0 | 97.6 | (0.40) | - | - | 50 |
| 1 | 79.4 | (0.35) | 18.2 | (2.10) | 50 |
| 2 | 62.9 | (0.20) | 16.5 | (1.75) | 50 |
| 3 | 49.0 | (0.25) | 13.9 | (0.94) | 50 |
| 4 | 38.2 | (0.20) | 10.8 | (0.50) | 50 |
| 5 | 27.3 | (0.10) | 10.9 | (0.35) | 55 |
| 6 | 15.4 | (0.08) | 11.9 | (0.20) | 65 |
| 7 | 7.40 | (0.05) | 8.0 | (0.10) | 70 |

Na tabela 33 são apresentados as taxas de secagem para as diferentes madeiras submetidas a secagem convencional. Conforme pode ser observado, para todas as espécies o valor da taxa de secagem, acima do PSF, foi elevado.

A taxa de secagem elevada, no início do processo, é decorrente da retirada de água capilar, cuja remoção está mais relacionada com a circulação do ar,

segundo HILDERBRAND (1970), JANKOWSKY (1980) e JANKOWSKY & ZAPATA (1983).

Com relação a taxa de secagem abaixo do PSF, a diferença encontrada para as espécies pode ser atribuída as diferentes densidades das madeiras, o que pode ser observado nas espécies *Manilkara huberi* e *Erisma uncinatum*, que representam os dois extremos, com 0,044 e 0,462 de taxa de secagem e densidade básica de 0,83 e 0,46, respectivamente.

Tabela 33 . Taxa de secagem (%/h) obtidas no processo convencional.

| NIVEL DE UMIDADE (%/h) | ESPÉCIE / DENSIDADE BÁSICA(g/cm ³) | | |
|------------------------|--|-------------|-------------|
| | ANGICO | MAÇARANDUBA | QUARUBARANA |
| | 0,71 | 0,83 | 0,46 |
| Até o PSF | 0.307 | 0.083 | 0.590 |
| Abaixo do PSF | 0.148 | 0.044 | 0.462 |
| MEDIA | 0.228 | 0.663 | 0.526 |

Com relação ao tempo de secagem as madeiras testadas foram classificadas de acordo com os critérios observados na tabela 8.

Os resultados encontrados para *Manilkara huberi* e *Erisma uncinatum* são bastante conflitantes com os

encontrados por BRASIL (1988), onde classificam as referidas madeiras como de rápida secagem apresentando um tempo de secagem de 7,0 e 4,5 dias, respectivamente.

Isto pode ser explicado pela diferença nos programas utilizados pelo IBDF e os propostos no presente trabalho, (comparativamente na tabela 35), onde verifica-se que a temperatura inicial mais elevada muito embora assegure uma secagem mais rápida pode influenciar no aparecimento de rachaduras em grande escala.

Tabela 34 . Classificação das madeiras com relação ao comportamento numa secagem convencional.

| ESPÉCIE | TEMPO DE SECAGEM (dias) | CLASSE |
|-------------|-------------------------|---------------------|
| Angico | 12 | Moderadamente lenta |
| Maçaranduba | 20 | Lenta |
| Quarubarana | 6.6 | Rápida |

Tabela 35- Programas de secagem para as madeiras *Manilkara huberi* e *Erisma uncinatum*.

| ESPÉCIE | PROGRAMAS | | | | | |
|-------------------------|-----------|----|-----|----------|----|-----|
| | IBDF | | | PROPOSTO | | |
| | TI | TF | PSI | TI | TF | PSI |
| <i>Manilkara huberi</i> | 60 | 70 | 2.2 | 40 | 65 | 2.5 |
| <i>Erisma uncinatum</i> | 70 | 80 | 5.5 | 50 | 70 | 3.1 |

4.2.2.2. Distribuição da umidade final

Com relação a distribuição da umidade final dentro das pilhas, notou-se que todas as peças de madeira, ao final da secagem, apresentaram-se homogêneas quanto ao teor de umidade; excetuando-se a madeira de *Erisma uncinatum* que apresentou uma diferença acentuada entre as peças (tabela 36). Possivelmente este fato se deve a uniformização insuficiente ao final do ensaio.

O lado A da pilha, como era de se esperar, ficou ligeiramente mais seco que o lado B. Isto se deve a sua localização mais próxima a entrada de ar.

Tabela 36 . Distribuição da umidade ao final da secagem convencional.

| POSIÇÃO DA MADEIRA | UMIDADE (%) | | | | | |
|-----------------------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|
| | ANGICO | | MAÇARANDUBA | | QUARUBARANA | |
| | (m) | (sm) | (m) | (sm) | (m) | (sm) |
| A | 10.1 | (1.84) | 7.0 | (0.46) | 10.0 | (0.49) |
| B | 9.9 | (1.91) | 7.2 | (0.43) | 18.0 | (1.51) |
| Minimo : | 7.7 | | 5.8 | | 9.3 | |
| Máximo : | 12.5 | | 8.0 | | 23.7 | |
| Média : | 10.1 | | 6.9 | | 17.0 | |

A : Lado da pilha correspondente a entrada de ar

B : Lado da pilha correspondente a saída de ar

(sm) : Erro padrão da média

4.2.2.3. Qualidade da madeira.

Os resultados encontrados para a avaliação da qualidade da madeira podem ser observados na tabela 37.

Como pode ser notado todas as espécies não apresentaram defeitos que comprometessem os programas sugeridos com o uso da metodologia proposta.

O defeito detectado em maior grau foi, de uma

maneira geral, o empenamento, muito embora este defeito não represente um fator limitante no processo de secagem podendo, mediante o uso de técnicas adequadas, ser minimizado.

A classificação da qualidade da madeira em relação aos defeitos (rachaduras, empenamentos, colapso e encruamento) foi feita com base nos critérios previstos na tabela 7.

Como pode ser observado na tabela 38, praticamente todas as espécies apresentaram ao final do processo de secagem uma qualidade excelente tendo em vista o mínimo de defeitos que ocorreram.

Portanto pode-se concluir que os programas sugeridos pela metodologia podem ser utilizados para essas espécies.

Tabela 37 . Ocorrência de defeitos de secagem nas madeiras estudadas. A porcentagem refere-se ao número de peças em relação ao total de peças da pilha.

| TIPO DE DEFEITO | ESPÉCIE / % DE DEFEITO | | |
|-----------------|------------------------|-------------|-------------|
| | ANGICO | MAÇARANDUBA | QUARUBARANA |
| Empenamento | | | |
| - encanoado | 22 | 15 | 21 |
| - torção | 33 | 30 | 17 |
| Rachaduras | | | |
| - topo | - | 8 | 4 |
| - superfície | - | 10 | - |
| - interna | - | - | - |
| Colapso | - | - | - |
| Encruamento | - | - | - |

Tabela 38 . Classificação dos defeitos das peças para as madeiras submetidas ao processo de secagem convencional, de acordo com MARTINS (1984) (tabela 7).

| DISCRIMINAÇÃO | E S P É C I E S | | |
|---------------|-----------------|-------------|-------------|
| | ANGICO | MAÇARANDUBA | QUARUBARANA |
| RACHADURAS | | | |
| topo | Ausente | Ausente | Ausente |
| superfície | Ausente | Ausente | Ausente |
| interna | Ausente | Ausente | Ausente |
| COLAPSO | Ausente | Ausente | Ausente |
| ENCRUAMENTO | Ausente | Ausente | Ausente |
| EMPENAMENTO | | | |
| encanoado | Pequeno | Pequeno | Pequeno |
| torção | Moderada | Pequena | Pequena |

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados encontrados e na discussão dos mesmos pode-se concluir que:

- 1) A metodologia proposta no presente trabalho pode ser utilizada para prever o comportamento de uma dada madeira quando submetida a um processo de secagem convencional.
- 2) A taxa de secagem (g/h) [(UI a 30% de umidade) e (30% a 5% de umidade)]; rachadura máxima de topo [(UI A 30% de umidade) e (30 a 5% de umidade)] foram as variáveis de maior importância para elaborar os programas de secagem de madeiras.
- 3) Tendo em vista uma margem de segurança na aplicação dos programas, sugere-se que após a definição das temperaturas inicial e final e do potencial de secagem inicial, seja sempre selecionado o programa imediatamente anterior ao sugerido pela metodologia, até que se obtenha experiência com a

madeira.

- 4) As equações que possibilitaram estabelecer os programas de secagem são:

$$\begin{aligned} \text{TEMPERTURA INICIAL} = & 50.21 - 0.502 (\text{RT1}) + 3.628 (\text{Tx2}) \\ & - 0.910 (\text{Tx1}) - 1.215 (\text{RT2}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{TEMPERATURA FINAL} = & 77.85 - 2.364 (\text{RT1}) - 0.580 (\text{M5}) + \\ & + 1.184 (\text{Tx2}). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{POTENCIAL DE} & & & 4.71 - 0.009 (\text{M3D}) + 0.205 (\text{Tx2}) - \\ \text{SECAGEM} & = & & \\ \text{INICIAL} & & & - 0.064 (\text{Tx1}) - 0.224 (\text{RT3}) \end{aligned}$$

onde:

!TX1: Taxa de secagem (UI a 30% de umidade)

TX2: Taxa de secagem (30% a 5% de umidade)

RT1: Rachadura de topo (UI a 30% de umidade)

RT2: Rachadura de topo (30% a 5% de umidade)

RT3: Rachadura de topo máxima

6. LITERATURA CITADA.

- BAILEY, P.J. & PRESTON, R.D. Some aspects of softwood permeability: structural studies with douglas fir sapwood and heartwood. Holzforschung, Berlin, 23(4): 113 - 20, 1960.
- BAKER, W.J. How wood dries. USDA Forest Service FPL, Madison, (1642): 1-9, set. 1956.
- BRAHMALL, G. & WELLWOOD, R.W.. Kilndrying of western Canadian lumber. Vancouver, Western Forest Products Laboratory, 1976. 112p.
- BRASIL. INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL. Madeiras da Amazonia: características e utilização. Floresta Nacional do Tapajos. Brasilia, CNPQ, 1988 v.1.
- BRASIL. INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL. Madeiras da Amazonia: características e utilização. Estação Experimental de Curuá - Una, Brasilia, CNPQ, 1988. v.2
- BRASIL. SUPERINTENDENCIA DO DESENVOLVIMENTO DA AMAZONIA. Estudos sobre métodos de secagem de madeiras da Amazonia. Belém SUDAM, 1981. 18p.
- BRITISH FOREST PRODUCTS RESEARCH LABORATORY kiln drying schedules. London, 1959. (LEAFLET, 42)

- BROTERO, F.A. Secagem de madeira em estufa. São Paulo. IPT, 1941. 47p.
- BROWN, H.P.; FANSHIN, A.J. & FORSAITH, C.C.. Textbook of wood technology. New York, McGraw - Hill, 1952, 783p.
- DURAND, P.Y. Contribution a l'étude de la détermination des tables des séchage à partir des caractères physiques du bois. Bois et forêts des tropiques, Nogent-sur-marne (207) : 63 - 81. 1985.
- EGNER, K. El secado de maderas a temperaturas de mais de 100°C. Holz als Roh und Werkstoff 9: 1-84, 1951.
- ERICKSON, H.D.; SCHIMITZ, F. & GORTNER, R.A., The permeability of wood liquids and factors affecting the rate of flow. Technical Bulletin, University of Minnesota. Agricultural Experiment Station, (122) : 1-42, 1937.
- FERREIRA, C.M. et alii. Variação da umidade da madeira de Eucalipto estocadas em pátios industriais. Silvicultura, São Paulo, 8 (28): 779-81, 1982.
- ~
GALVÃO, A.P.M. Secagem acelerada: programa para a madeira de jatobá (*Hymenaea stilbocarpa* Hayne). IPEF, Piracicaba, (11): 53-65, 1976.
- ~
GALVÃO, A.P.M. & JANKOWSKY, I.P. Secagem racional da madeira. São Paulo, Nobel, 1985. 111p.
- ~
GALVÃO A.P.M.; SIAU, J.F. & SKAAR, C. Factors influencing the transity flow of oils into coniferous woods. Wood Science, Madison 7(2) : 85-91, 1974.

- HART, C.A. The drying of wood. Raleigh, North Carolina Agriculture Extension Service, 1968. 24p.
- HILDEBRAND, R. El secado de madeira asserrada. Berlim, Maschinenbau GmbH, 1964. 150p.
- HILDEBRAND, R. Kiln drying of saw timber. Berlin, Maschinenbau GmbH, 1970, 198p.
- JANKOWSKY, I.P. Madeira juvenil: formação e aproveitamento industrial. Circulat Técnica IPEF, Piracicaba (81): 1-8, 1979.
- JANKOWSKY I.P. Programas de secagem: fundamentos teóricos e sua aplicação para madeiras de Pinus sp. Piracicaba, ESLAQ/DCF, 1983. 9p. (não publicado).
- JANKOWSKY I.P. Secagem acelerada da madeira de pinheiros tropicais em estufas industriais: efeito do aparelhamento e do tratamento preservativo superficiais na secagem da madeira de *Pinus sp.* Boletim Informativo PPT, Piracicaba (8): 39-50, 1980.
- JANKOWSKY I.P. Secagem acelerada de pinheiros tropicais em estufas industriais. Boletim Informativo PPT, Piracicaba, (4): 53-60, 1979.
- KAUMANN, W.G. Cell collapse in wood. Melbourne, CSIRO. Division of Forest Products, 1964. 63p.
- KEYLWERTH, R. Los cambios de forma de las secciones de la madera. Holz als Roh-und Werkstoff, 9, 1951.
- KININMONTH, J.A. Permeability and fine structure of certain

hardwoods and effects on drying: 1- Transverse permeability of wood to micro filtered water. Holzforschung, (2594) : 128-33, 1972.

KOLLMANN, F. Investigation sobre las origenes de los defectos de secado de madera de roble verde. Estocolmo, Tráforskninginstitut, 1950, 21p.

KOLLMANN, F. & CÔTE, W.A. Principles of wood science and technology. New York, Springer - Verlag, 1968. v.1.

KOLLMANN, F. & SCHNEIDER, A. the influence of the flow velocity in hot steam drying of saw timber. (Holz als Roh-und werkstoff), 19: 461 - 78, 1961.

McMILLEN, J.M. Acelerated kiln drying of presurfaced 1-inch northern red oak. USDA Forest Service, FPL Research Paper, Madison (122): 1-29, dez. 1969.

McMILLEN J.M. Drying stress in red oak. Forest Products Journal, Madison 5(1): 71-6, 1955.

McMILLEN J.M. Transverse strains during drying of 2-inch Ponderosa Pine. USDA, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison (83). 1968.

NOCK, H.P. Influência de tratamentos a vapor em algumas propriedades físicas da madeira de Imbuia (Ocotea porosa). Floresta, Curitiba 4(1): 50-63, 1974.

PRAK, A.L. Unsteady - state gas permeability of wood, Wood Science and Technology, New York 4: 50-60, 1970.

PRATT, G.H. Timber drying manual. London Dept. of Environment. Building Research Establishment. 1974. 152p.

RASMUSSEN, E.P. Dry kiln operator's manual. Madison, Forest Products Laboratory, 1961. 197p.

RESCH, H. Unsteady-stable flow of compressible fluids through wood. Forest Products Journal, Madison 17 (8): 48-50, 1967.

RIETZ, R.C. Accelerating the kiln drying of hardwoods. Madison, Forest Products Laboratory, 1970. 6p.

SANTINI, E.J. & TOMASELLI, I. Colapso nas madeiras e algumas experiências brasileiras. Série Técnica FUPPEF, Curitiba (30): 1-21, 1980.

SEBASTIAN, L.P.; CÔTÉ, W.A. & SKAAR, C. Relationship of gas phase permeability to ultrastructure of white spruce wood. Forest Products Journal, Madison 15 (9): 394 - 404, 1965.

SIAU, J.F. Flow in wood. New York, Syracuse University Press, 1971. 131p.

SKAAR, C. Notas de aula. New York, College of Environmental Science and Forestry, 1969. (não publicado).

SKAAR, C. Water in wood. New York, Syracuse University Press, 1972. 218p.

SMITH, A.J. Preservation and permeability of wood. Timber technology convention paper. (2): 469-3, 1972.

STAMM, A.J. Wood and cellulose science. New York, Ronald Press, 1964. 549p.

TEREZAWA, S. Methods for easy determination of kiln drying schedule of wood. Wood Industry, 20 (5), 1965.

VILLIERE, A. Séchage des bois. 6. ed. Paris, Dunod, 1966. 410p.

YAMAMOTO, A.K. Secagem das madeiras. Boletim Técnico, ABPM, São Paulo, 2(1), 1974.

ZAPATA, E.H. Determinação de programas acelerados de secagem artificial para madeira de Pinus sp. Piracicaba, ESALQ/DCF, 1981. 25p. (não publicado)

A P Ê N D I C E

Anexo 1: Programas de secagem utilizados no desenvolvimento do trabalho.

Programa n° 1

| UMIDADE | Ts(°C) | Tu(°C) | UR(%) | UE(%) | POTENCIAL |
|-------------|--------|--------|-------|-------|-----------|
| Aquecimento | 35.0 | 34.0 | 94 | 21.9 | - |
| Até 50 | 35.0 | 34.0 | 94 | 21.9 | >2.3 |
| 50 | 35.0 | 34.0 | 94 | 21.9 | 2.3 |
| 40 | 35.0 | 33.5 | 90 | 19.7 | 2.0 |
| 30 | 35.0 | 33.0 | 88 | 18.4 | 1.6 |
| 25 | 40.0 | 37.0 | 83 | 16.2 | 1.5 |
| 20 | 50.0 | 45.5 | 76 | 13.1 | 1.5 |
| 15 | 50.0 | 42.0 | 61 | 9.7 | 1.5 |
| 10 | 50.0 | 36.0 | 40 | 6.5 | 1.5 |

Programa n° 2

| UMIDADE | Ts(°C) | Tu(°C) | UR(%) | UE(%) | POTENCIAL |
|-------------|--------|--------|-------|-------|-----------|
| Aquecimento | 40.0 | 39.0 | 94 | 21.6 | - |
| Até 50 | 40.0 | 38.5 | 91 | 19.8 | >2.5 |
| 50 | 40.0 | 38.5 | 91 | 19.8 | 2.5 |
| 40 | 40.0 | 38.0 | 88 | 18.3 | 2.2 |
| 30 | 45.0 | 42.5 | 86 | 17.0 | 1.8 |
| 25 | 50.0 | 46.5 | 81 | 14.7 | 1.7 |
| 20 | 60.0 | 54.5 | 74 | 11.8 | 1.7 |
| 15 | 60.0 | 51.0 | 60 | 8.8 | 1.7 |
| 10 | 60.0 | 44.0 | 38 | 5.8 | 1.7 |

Programa n° 3

| UMIDADE | Ts(°C) | Tu(°C) | UR(%) | UE(%) | POTENCIAL |
|-------------|--------|--------|-------|-------|-----------|
| Aquecimento | 40.0 | 39.0 | 94 | 21.6 | - |
| Até 50 | 40.0 | 38.5 | 91 | 19.8 | >2.5 |
| 50 | 40.0 | 37.5 | 85 | 17.0 | 2.4 |
| 40 | 40.0 | 37.5 | 85 | 17.0 | 2.4 |
| 30 | 45.0 | 41.0 | 79 | 14.2 | 2.1 |
| 25 | 55.0 | 49.0 | 71 | 11.3 | 2.2 |
| 20 | 65.0 | 56.5 | 63 | 9.1 | 2.2 |
| 15 | 65.0 | 51.5 | 49 | 6.8 | 2.2 |
| 10 | 65.0 | 43.0 | 29 | 4.5 | 2.2 |

Programa n° 4

| UMIDADE | Ts(°C) | Tu(°C) | UR(%) | UE(%) | POTENCIAL |
|-------------|--------|--------|-------|-------|-----------|
| Aquecimento | 40.0 | 39.0 | 94 | 21.6 | - |
| Até 50 | 40.0 | 38.5 | 91 | 19.8 | >2.7 |
| 50 | 40.0 | 38.0 | 88 | 18.3 | 2.7 |
| 40 | 40.0 | 37.0 | 83 | 16.2 | 2.5 |
| 30 | 45.0 | 39.5 | 70 | 12.1 | 2.5 |
| 25 | 55.0 | 47.5 | 64 | 10.0 | 2.5 |
| 20 | 65.0 | 54.5 | 58 | 8.0 | 2.5 |
| 15 | 70.0 | 54.0 | 45 | 6.1 | 2.5 |
| 10 | 70.0 | 46.0 | 27 | 4.1 | 2.5 |

Programa n° 5

| UMIDADE | Ts (°C) | Tu (°C) | UR (%) | UE (%) | POTENCIAL |
|-------------|---------|---------|--------|--------|-----------|
| Aquecimento | 40.0 | 39.0 | 94 | 21.6 | - |
| Até 50 | 40.0 | 38.0 | 88 | 18.3 | >3.1 |
| 50 | 40.0 | 37.0 | 83 | 16.2 | 3.1 |
| 40 | 40.0 | 35.0 | 72 | 12.8 | 3.1 |
| 30 | 45.0 | 37.0 | 60 | 9.7 | 3.1 |
| 25 | 55.0 | 45.0 | 54 | 8.1 | 3.1 |
| 20 | 65.0 | 51.0 | 48 | 6.6 | 3.0 |
| 15 | 70.0 | 50.0 | 35 | 5.0 | 3.0 |
| 10 | 70.0 | 42.0 | 20 | 3.3 | 3.0 |

Programa n° 6

| Umidade | Ts (°C) | Tu (°C) | UR (%) | UE (%) | POTENCIAL |
|-------------|---------|---------|--------|--------|-----------|
| Aquecimento | 50.0 | 49.0 | 95 | 21.5 | - |
| Até 50 | 50.0 | 48.0 | 89 | 18.0 | >3.1 |
| 50 | 50.0 | 47.0 | 84 | 15.8 | 3.1 |
| 40 | 50.0 | 46.0 | 79 | 14.0 | 2.9 |
| 30 | 55.0 | 49.5 | 73 | 11.7 | 2.6 |
| 25 | 65.0 | 58.0 | 68 | 9.9 | 2.5 |
| 20 | 70.0 | 59.0 | 59 | 8.0 | 2.5 |
| 15 | 70.0 | 54.0 | 45 | 6.1 | 2.5 |
| 10 | 70.0 | 46.0 | 27 | 4.1 | 2.5 |

Programa n° 7

| UMIDADE | Ts(°C) | Tu(°C) | UR(%) | UE(%) | POTENCIAL |
|-------------|--------|--------|-------|-------|-----------|
| Aquecimento | 50.0 | 49.0 | 95 | 21.5 | - |
| Até 50 | 50.0 | 48.0 | 89 | 18.0 | >3.4 |
| 50 | 50.0 | 46.5 | 81 | 14.7 | 3.4 |
| 40 | 50.0 | 44.5 | 72 | 12.0 | 3.3 |
| 30 | 55.0 | 47.0 | 62 | 9.6 | 3.1 |
| 25 | 65.0 | 55.0 | 59 | 8.2 | 3.0 |
| 20 | 70.0 | 56.0 | 50 | 6.7 | 3.0 |
| 15 | 70.0 | 50.0 | 35 | 5.0 | 3.0 |
| 10 | 70.0 | 42.0 | 20 | 3.3 | 3.0 |

Programa n° 8

| UMIDADE | Ts(°C) | Tu(°C) | UR(%) | UE(%) | POTENCIAL |
|-------------|--------|--------|-------|-------|-----------|
| Aquecimento | 50.0 | 49.0 | 95 | 21.5 | - |
| Até 50 | 50.0 | 47.0 | 84 | 15.8 | >3.8 |
| 50 | 50.0 | 45.5 | 76 | 13.1 | 3.8 |
| 40 | 50.0 | 43.5 | 67 | 11.0 | 3.6 |
| 30 | 55.0 | 45.5 | 56 | 8.5 | 3.5 |
| 25 | 65.0 | 52.5 | 52 | 7.2 | 3.5 |
| 20 | 75.0 | 58.0 | 44 | 5.8 | 3.5 |
| 15 | 75.0 | 51.0 | 30 | 4.2 | 3.5 |
| 10 | 75.0 | 44.0 | 18 | 2.8 | 3.5 |

Programa n° 9

| UMIDADE | Ts(°C) | Tu(°C) | UR(%) | UE(%) | POTENCIAL |
|-------------|---------|---------|-------|-------|-----------|
| Aquecimento | 50.0 | 49.0 | 95 | 21.5 | - |
| Até 50 | 50.0 | 46.5 | 81 | 14.7 | >3.8 |
| 50 | 50.0 | 45.5 | 76 | 13.1 | 3.8 |
| 40 | 50.0 | 44.0 | 70 | 11.6 | 3.5 |
| 30 | 55.0 | 47.0 | 62 | 9.6 | 3.1 |
| 25 | 60.0 | 50.0 | 56 | 8.2 | 3.0 |
| 20 | 70.0 | 56.0 | 50 | 6.7 | 3.0 |
| 15 | 80.0 | 60.0 | 40 | 5.0 | 3.0 |
| 10 | 80.0 | 51.0 | 23 | 3.3 | 3.0 |

Programa n° 10

| UMIDADE | Ts(°C) | Tu(°C) | UR(%) | UE(%) | POTENCIAL |
|-------------|---------|---------|-------|-------|-----------|
| Aquecimento | 60.0 | 59.0 | 95 | 20.5 | - |
| Até 50 | 60.0 | 56.0 | 80 | 13.5 | >4.0 |
| 50 | 60.0 | 55.0 | 76 | 12.3 | 4.0 |
| 40 | 60.0 | 54.0 | 71 | 11.0 | 3.6 |
| 30 | 65.0 | 56.0 | 62 | 8.9 | 3.4 |
| 25 | 70.0 | 57.0 | 53 | 7.1 | 3.5 |
| 20 | 75.0 | 58.0 | 44 | 5.9 | 3.4 |
| 15 | 80.0 | 56.0 | 32 | 4.2 | 3.6 |
| 10 | 80.0 | 50.0 | 22 | 3.1 | 3.2 |

Anexo 2: Formulário utilizado no acompanhamento da secagem a 100°C.

SETOR DE SECAGEM E PRESERVAÇÃO DA MADEIRA
FICHA DE CONTROLE PARA ENSAIO DE SECAGEM

Espécie _____ Código _____ Temperatura _____
Dimensões _____ Início _____ Término _____

| DADOS DE AMOSTRAGEM | PERDA DE MASSA | | | | DEFEITOS | | | | | | | | | |
|-----------------------|----------------|------|-----------|--------|------------|------|------|--------------|------|-------|-------|---------|---------|--|
| | DATA | HORA | MASSA (g) | Vc (%) | RACHADURAS | | | EMPENAMENTOS | | | | COLAPSO | DESCOL. | |
| | | | | | TOPO | SUP. | INT. | ENC. | LAT. | LONG. | TORC. | | | |
| Nº | | | | | | | | | | | | | | |
| Pu= g | | | | | | | | | | | | | | |
| Pse= g | | | | | | | | | | | | | | |
| Pi= g | | | | | | | | | | | | | | |
| Ps= g | | | | | | | | | | | | | | |
| Ui= % | | | | | | | | | | | | | | |
| Uf= % | | | | | | | | | | | | | | |
| Tempo= h | | | | | | | | | | | | | | |
| Taxa de Secagem(%/h)= | | | | | | | | | | | | | | |
| CORPO DE PROVA | | | | | | | | | | | | | | |
| Pu= g | | | | | | | | | | | | | | |
| Ps= g | | | | | | | | | | | | | | |
| U= g | | | | | | | | | | | | | | |
| Nº | | | | | | | | | | | | | | |
| Pu= g | | | | | | | | | | | | | | |
| Pse= g | | | | | | | | | | | | | | |
| Pi= g | | | | | | | | | | | | | | |
| Ps= g | | | | | | | | | | | | | | |
| Ui= % | | | | | | | | | | | | | | |
| Uf= % | | | | | | | | | | | | | | |
| Tempo= h | | | | | | | | | | | | | | |
| Taxa de Secagem(%/h)= | | | | | | | | | | | | | | |
| CORPO DE PROVA | | | | | | | | | | | | | | |
| Pu= g | | | | | | | | | | | | | | |
| Ps= g | | | | | | | | | | | | | | |
| U= g | | | | | | | | | | | | | | |

Observações: