COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE SECAGEM PARA MADEIRA DE *Pinus caribaea* var. *hondurensis*

EDGARDO ZAPATA HENRIQUEZ

Orientador: ANTONIO PAULO MENDES GALVÃO

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Junho - 1986

Ao

Professor e amigo

Ivaldo Pontes Jankowsky

Ofereço

À minha adorada esposa

Sílvia Starck Mantoanelli Henriques

DEDICO

AGRADECIMENTOS

- . Ao Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP, que permitiu a realização do curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.
- . Ao orientador Professor Dr. Antonio Paulo Mendes Galvão.
- . Aos co-orientadores, Professores e amigos, Ivaldo Pontes Jankowsky e Luiz Carlos de Sampaio Oliveira.
- . Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo auxílio financeiro.
- . Ao Instituto Florestal do Estado de São Paulo, por ceder a madeira para os ensaios.
- . Ao Agrupamento de Produção Industrial, da Divisão de Madeiras do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, pela cessão do secador solar.
- . Ao pessoal da SONAR - Serviços de Datilografia S/C Ltda., pelo inestimável auxílio.
- . Aos funcionários do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP, pela enorme colaboração.
- . Aos funcionários do Agrupamento de Produção Industrial, pela camaradagem e boa vontade.

.iv.

- . Ao pessoal da Fazenda Campininha, do Instituto Florestal do Estado de São Paulo, pela boa disposição e amizade.
- . Aos demais professores, funcionários, colegas e amigos que direta ou indiretamente colaboraram no trabalho.

ÍNDICE

	<u>página</u>
RESUMO	vii
SUMMARY	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1. Relações água-madeira	5
2.2. Defeitos de secagem	10
2.3. Enfoque histórico do estudo das tensões	13
2.4. O processo de secagem	15
2.5. Métodos de secagem	22
2.5.1. Secagem ao ar	24
2.5.2. Secagem solar	28
2.5.3. Secagem artificial em secadores con- vencionais	40
3. MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1. Preparação da madeira	46
3.2. Métodos de secagem	49
3.2.1. Secagem ao ar	49
3.2.2. Secagem solar	53
3.2.3. Secagem convencional	58
3.3. Avaliação das tensões de secagem	61
3.4. Avaliação dos métodos de secagem	68
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	70

4.1. Avaliação dos métodos de secagem	70
4.1.1. Secagem ao ar	70
4.1.2. Secagem solar	89
4.1.3. Secagem convencional	102
4.2. Comparação entre os métodos de secagem	111
4.2.1. Velocidade de secagem	111
4.2.2. Distribuição da umidade final	113
4.2.3. Qualidade da madeira	114
5. CONCLUSÕES	126
5.1. Recomendações	127
6. LITERATURA CITADA	129

COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE SECAGEM PARA MADEIRA DE
Pinus caribaea var. hondurensis

Autor: EDGARDO ZAPATA HENRIQUEZ

Orientador: ANTONIO PAULO MENDES GALVÃO

RESUMO

Madeira de 2,5 cm de espessura de Pinus caribaea var. hondurensis, de 22 anos de idade, foi seca por meio de secagem ao ar, solar e convencional.

A secagem ao ar foi conduzida em dois locais; a secagem solar utilizou um secador com coletor interno, no teto; e a secagem convencional seguiu um programa tradicional de secagem.

Foram analisadas a velocidade e taxa de secagem, distribuição da umidade final e ocorrência de defeitos, para cada método de secagem.

Semelhantes análises foram feitas para tipo de madeira, juvenil e adulta, e para classe diametral, com diâmetros médios de 28,5, 35,5 e 42,5 cm, cada classe.

Foi utilizado o método das fatias ("slice technique") para tentar descobrir o padrão característico de tensões para a espécie.

A comparação dos resultados para os diferentes métodos permitiu concluir que:

- a secagem ao ar funciona eficientemente para secar madeira cuja utilização final não exija baixas umidades (menor que 15% - 18%);
- a secagem solar foi superior à secagem ao ar em termos de qualidade do produto final, e de velocidade de secagem, principalmente na remoção da água higroscópica;
- a secagem convencional se mostrou como o melhor método para secar madeira de Pinus caribaea var. hondurensis tanto em termos de qualidade como de velocidade de secagem;
- nem o ritmo de crescimento e nem o tipo de madeira influenciavam a secagem do Pinus caribaea var. hondurensis ou a distribuição da umidade final.

Sugere-se:

- um estudo sobre a combinação de métodos de secagem, visando diminuir os custos do processo;

- aprofundar o estudo sobre o desenvolvimento das tensões de secagem com madeiras de coníferas.

COMPARISON OF DRYING METHODS FOR
Pinus caribaea var. hondurensis LUMBER

Author: EDGARDO ZAPATA HENRIQUEZ

Adviser: ANTONIO PAULO MENDES GALVÃO

SUMMARY

Boards with 2.5 cm thickness of 22-year old Pinus caribaea var. hondurensis trees were dried using air drying, solar drying and kiln drying.

Air drying was carried out in two locations; solar drying used a dryer with internal roof collector; and kiln drying used a conventional schedule.

The drying velocity and rate, the final moisture distribution and the effects for each drying method were analysed.

Similar analyses were made for type of wood, juvenile and mature wood, and for diameter class, with mean DBH of 28.5, 35.5 and 42.5 for each class.

The slice technique method was adapted for trying to identify the characteristic drying-stress pattern for the species.

The comparison between results for the different methods led to the following conclusions:

- air drying works efficiently for wood which final use does not require a low moisture content (less than 15% - 18%);
- solar drying was better than air drying in terms of final product quality and drying velocity, specially for hygroscopic water removal;
- kiln drying showed the best results as a method for Pinus caribaea var. hondurensis drying, both in quality and velocity;
- neither the diameter class nor the type of wood affects in a significant way the Pinus drying or the final moisture distribution.

Suggestions:

- A study on the drying method combination for the purpose of process cost reduction;
- to further the research on the conifer wood drying-stress development.

1. INTRODUÇÃO

Os primeiros ensaios de introdução de coníferas no Brasil, segundo GOLFARI et alii (1978), foram efetuados em 1936 pelo Serviço Florestal do Estado de São Paulo, com espécies da Europa. Em 1947 foram introduzidas dos Estados Unidos as primeiras sementes de Pinus elliottii, e no ano seguinte iniciou-se um plano de estímulo ao reflorestamento, com a distribuição de mudas de P. radiata, espécie que demonstrou em poucos anos sua incapacidade de se desenvolver nas condições ambientais brasileiras.

Ainda segundo GOLFARI et alii (1978), posteriormente foi intensificada a introdução de outras coníferas como P. taeda, P. caribaea, P. oocarpa e P. kesiya. No final de 1955, o Serviço Florestal, estimulado pelo comportamento promissor do P. elliottii e do P. taeda, iniciou um amplo pla

no de reflorestamento em suas estações experimentais.

Esses resultados promissores do P. elliottii e do P. taeda foram observados em regiões temperadas do Brasil, limitando assim a sua região de plantio a latitudes não superiores à do estado do Paraná.

Ficava evidente com isso, a falta de espécies que pudessem ser plantadas ao longo de todo o território brasileiro, enfrentando grandes variações edafo-climáticas.

Foi assim que se firmaram as espécies de pinheiros tropicais no quadro do reflorestamento, adaptando-se bem em solos de cerrado, regiões com elevadas temperaturas ambientais, escassa precipitação, etc..

Hoje, é fato consumado que os pinheiros tropicais (P. caribaea e P. oocarpa), podem ser plantados em quase todo o Brasil, e detêm participação expressiva nos programas de reflorestamento.

Dentre as espécies de pinheiros tropicais, o P. caribaea var. hondurensis é uma das mais plantadas no Brasil e a que apresenta maior produção volumétrica de madeira: 25 m³/ha/ano, segundo dados da Companhia Agroflorestal Monte Alegre, na região de Agudos, SP.

Em relação à produção de madeira serrada, tem

-se observado uma diminuição gradativa na participação da A-raucaria angustifolia, na ordem de 20% ao ano (AZEREDO, 1982). Da mesma forma, a madeira de folhosas também apresenta uma queda na produção da ordem de 10% ao ano.

A década de 80 é responsável por uma série de profundas modificações, tanto no perfil do produtor quanto nos padrões do consumo de madeiras: simultaneamente acontecem um aumento na demanda de madeira serrada e na produção racional de madeira de Pinus, principalmente em função da sua elevada taxa de crescimento.

Isto traduz-se num aumento na produção de madeira de Pinus da ordem de 35% ao ano (AZEREDO, 1982), para poder suprir a demanda constante e crescente.

Os únicos dados disponíveis sobre a produção de madeira de Pinus datam de 1982, e eles estimavam que entre 1982 e 1984 ocorreria um aumento de 55% na produção, passando de 436.000 m³ em 1982, para 675.000 m³ em 1984 (AZEREDO, 1982).

Segundo VIANNA NETO (1984), diante da real importância do gênero Pinus para o setor madeireiro, existe uma certa urgência para que os produtores de madeira tenham acesso a alternativas tecnológicas para processar adequadamente esta matéria prima, visando oferecer um produto condizente com as exigências do mercado consumidor.

Um dos aspectos desse processamento adequado

da madeira é a secagem racional, que evita o aparecimento de fungos manchadores e apodrecedores; diminui a higroscopicidade natural da madeira, melhorando a sua qualidade e au~~mentan~~do, assim, sua participação em vários setores de transformação e beneficiamento.

Contudo, torna-se necessário, também, adequar métodos simples para a secagem, tentando evitar que os custos decorrentes desse processo inviabilizem a posterior comercialização do produto final. De acordo com AZEREDO (1984), o custo da secagem artificial da madeira de Pinus, serrada em bruto, é de 4,30 US\$/m³, representando cerca de 10% do custo total de produção.

Dessa forma, o presente trabalho procurou avaliar diferentes métodos simples para a secagem da madeira de Pinus caribæa var. hondurensis em função das características da madeira. Seus principais objetivos foram:

- a. a comparação entre os três métodos estudados (ao ar, solar e convencional);
- b. a verificação dos possíveis efeitos do ritmo de crescimento e do tipo de madeira (juvenil e adulta) no processo de secagem;
- c. a avaliação das deformações causadas pelas tensões internas decorrentes da secagem, visando estabelecer o padrão característico de tensões para a espécie.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Relações água-madeira

O tronco da árvore viva está saturado de uma solução diluída de sais minerais denominada seiva. Esta solução que permanece na madeira após o corte e desdobro desse tronco, é considerada, para fins de secagem, como sendo apenas água.

Esta água está presente na madeira recém-cortada em quatro diferentes formas ou tipos (de acordo com KOLLMANN e CÔTÉ, 1968):

- a. água livre ou capilar;
- b. água higroscópica;
- c. água de constituição, fazendo parte das mo

lêculas de celulose, hemicelulose e lignina.

d. vapor d'água, localizado nas aberturas naturais da madeira e movimentando-se por fenômeno de difusão.

No processo de secagem, interessa apenas a movimentação da água no sentido da dessorção ou perda, que pode ser estudada sob dois aspectos principais: movimentação da água capilar e da água higroscópica (abaixo dos 100°C de temperatura, a difusão do vapor d'água não contribui significativamente para o processo de secagem).

Segundo BROWN *et alii* (1952), STAMM (1964), KOLLMANN e CÔTÉ (1968), SIAU (1971) e SKAAR (1972), a água capilar na madeira está retida por forças capilares e movimenta-se pelas aberturas naturais do material, até o ponto de saturação das fibras (PSF) ser atingido.

Este ponto pode ser definido como o estado da madeira em que não existe mais água capilar nos lúmens das células, restando apenas a água higroscópica nas paredes celulares. De acordo com SKAAR (1972), varia normalmente entre 25% e 35% de umidade (em relação ao peso seco do material).

Abaixo desse ponto, começa a movimentação da

água higroscópica através da parede celular e a consequente contração da madeira, segundo KOLLMANN e CÔTÉ (1968), SIAU (1971) e SKAAR (1972).

Esta movimentação está regida por fenômenos de difusão, e depende principalmente da umidade e da temperatura, da densidade básica da madeira e da direção estrutural considerada.

Uma vez que a movimentação da água capilar realiza-se através das aberturas naturais, o fator limitante à sua retirada é a permeabilidade da madeira.

Esta característica da madeira tem sido objeto de estudo de vários autores, entre eles ERICKSON *et alii* (1937), SEBASTIAN *et alii* (1965), PRAK (1970), SIAU (1971), SKAAR (1972), GALVÃO *et alii* (1974). Demonstrou-se que ela é maior no sentido longitudinal ou paralelo às fibras, em comparação com o sentido transversal, e maior no sentido radial do que no tangencial.

A permeabilidade longitudinal das coníferas está diretamente relacionada com o número, tamanho, distribuição e condição das pontuações aureoladas, já que é através destas estruturas que se dá o fluxo (ERICKSON *et alii*, 1937; SEBASTIAN *et alii*, 1965; BAILEY e PRESTON, 1969; SMITH, 1972). SIAU (1971) encontrou que as pontuações das coníferas são responsáveis por 80% da resistência à passagem de um fluido

na madeira.

O fator limitante na secagem da madeira é frequentemente a remoção da água capilar. Skaar, citado por SIAU (1971), afirma que a chave para futuros ganhos na aceleração da secagem provavelmente está em se achar novos métodos para a remoção desta água, mais eficientemente do que é possível com os presentes métodos de secagem.

Para a água higroscópica, a sua velocidade de difusão no sentido longitudinal é de 2 a 3 vezes maior que no sentido transversal.

SIAU (1971) mostrou que os valores radiais são de 17% a 25% maiores que os tangenciais; já para KOLLMANN e CÔTÉ (1968), os valores radiais são de 20% a 50% maiores que os tangenciais.

Durante a secagem, a madeira sofre mudanças nas suas dimensões; KOLLMANN e CÔTÉ (1968), Mc MILLEN (1968) e MORTATTI (1980), relatam retrações dimensionais da ordem de 2% com umidades variando de 35% a 150%.

Já para umidades inferiores a 30% os valores de retração são maiores, de acordo com STAMM (1964), KOCH (1972) e BRAMHALL e WELLWOOD (1976), entre outros.

Estas retrações da madeira irão acontecer até

se atingir a condição de equilíbrio higroscópico com o meio, denominada umidade de equilíbrio (UE), e definida por Mc MILLEN (1964) como sendo o teor de umidade ao qual a madeira chegará quando colocada ao ar, sob uma dada condição de temperatura e umidade relativa, sem mais ganhar ou perder umidade para o meio.

Essa UE também é afetada pela composição química da madeira: JANKOWSKY (1979c), trabalhando com Araucaria angustifolia, Swietenia macrophylla e Eucalyptus citriodora, concluiu que um acréscimo no teor de extrativos ocasionou um decréscimo da umidade de equilíbrio nas três espécies e que este efeito se acentuou em condições acima de 60% de umidade relativa.

STAMM e LOUGHBOROUGH (1935) já mencionavam que havia um decréscimo temporário de aproximadamente 0,5% na umidade de equilíbrio para um acréscimo de 1°C na temperatura, se esta estiver na faixa entre 25°C e 50°C. Já para temperaturas mais elevadas (entre 80°C e 108°C), SALAMON (1966) menciona que esse decréscimo temporário na umidade de equilíbrio é menor, da ordem de 0,3%, para cada aumento de 1°C de temperatura. Isto mostra claramente que a tendência não é linear.

Stamm, Burr e Kline, citados por KOLLMANN et alii (1975), mostram que é possível obter uma redução perma-

nente de 40% na movimentação dimensional quando a madeira é exposta, na ausência de oxigênio, a temperatura de 210°C por 1 dia ou a 160°C por 1 mês, ou ainda a 120°C por 1 ano.

De acordo com JANKOWSKY (1985), através da secagem artificial, pode-se diminuir a higroscopicidade da madeira e a sua posterior movimentação quando em serviço.

2.2. Defeitos de secagem

Devido a anisotropia da madeira, a retração dimensional durante a secagem, é diferente nas direções estruturais consideradas: no sentido longitudinal é desprezível para madeira adulta (0,1% a 0,3%), de acordo com HILDEBRAND (1970); mas no sentido transversal (radial e tangencial), a retração é maior, e é afetada pelos ângulos fibrilares existentes nas diferentes camadas da parede secundária, principalmente da camada S2. Como a remoção da água ocorre nos radicais hidroxilas livres que se encontram dispostos perpendicularmente ao eixo das moléculas de celulose e hemiceluloses, a maior movimentação se dá no sentido perpendicular às fibras, de acordo com BRAMHALL e WELLWOOD (1976).

Para KOLLMANN e CÔTÉ (1968), a retração tangencial total em uma secagem está entre 3,5% e 15% da dimensão verde da peça em questão. Já para a retração radial, o

intervalo está entre 2,4% a 11,0%.

Com exceção do colapso (que está relacionado com o fluxo capilar e a permeabilidade da madeira), os demais defeitos de secagem estão de alguma forma ligados às diferentes retrações verificadas na madeira.

Resumindo a discussão apresentada por GALVÃO e JANKOWSKY (1985) pode-se afirmar que os empenamentos são decorrentes das retrações diferenciadas que podem ocorrer na peça submetida a secagem, causadas tanto pela anisotropia da madeira como pelas diferenças entre cerne e alburno, lenhos inicial e tardio ou madeira juvenil e adulta.

Já os defeitos como rachaduras superficiais ou de topo e o endurecimento superficial ou encruamento, são decorrentes das tensões internas que se desenvolvem durante o processo de secagem.

Nos primeiros estágios da secagem, as camadas superficiais das tábuas secam rapidamente abaixo do PSF e atingem o equilíbrio com o ar em volta. Como consequência, estas camadas tendem a se retrair.

Porém, esta retração está limitada pela parte interna que se mantém ainda acima do PSF. As fibras superficiais estão, então, sujeitas a tensão de tração, ao passo

que o centro da peça está sujeito a tensão de compressão.

De acordo com McMILLEN (1955, 1969), se estas tensões de tração forem superiores à resistência perpendicular das fibras da madeira, formam-se rachaduras superficiais, e se estas condições ultrapassarem o limite de proporcionalidade da madeira, desenvolver-se-á uma deformação permanente, denominada fixação ou encruamento.

Segundo RIETZ (1970), a manutenção destas propriedades de resistência, através do conhecimento da relação temperatura/teor de umidade/tensões, é a solução para evitar as rachaduras e a chave para a aceleração da secagem sem o aparecimento de defeitos.

Para evitar o problema das rachaduras, McMILLEN (1955) sugere que a umidade relativa no início da secagem seja mantida o suficientemente alta para que a perda de umidade não seja tão acentuada. Deve-se manter a temperatura baixa até que toda a água capilar tenha sido retirada. Após esse instante, a umidade relativa pode ser abaixada e a temperatura elevada sem o risco de aparecimento de defeito.

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

McMILLEN (1968), trabalhando com Pinus ponderosa, relata que a reversão das tensões ocorreu abaixo dos 20% de umidade na madeira. Aparentemente é o teor de umidade que determina esta reversão; porém, mais estudos para a compreensão deste fenômeno estão faltando.

2.3. Enfoque histórico do estudo das tensões

H.D. Tiemann, em 1917, foi provavelmente o primeiro pesquisador a compreender as tensões, seu desenvolvimento e fixação (TIEMANN, 1917). Em 1919 publicou um trabalho onde apresentava um modelo teórico para tentar entender as tensões de secagem (TIEMANN, 1919).

Esses trabalhos correspondem ao período inicial de aquisição de conhecimentos gerais sobre as tensões e devem ter sido úteis para o estabelecimento dos programas tradicionais de secagem e dos métodos de alívio de tensões, apropriados para os equipamentos em uso naquela época.

McMILLEN (1955) cita que em 1924, E.C. Peck desenvolveu análise de tensões durante a secagem, no Forest Products Laboratory, e que Loughborough, em 1929, usou medições com forquilhas para demonstrar a existência da tensão e seu alívio.

Nessa retrospectiva, PECK (1940) indicou que um abaixamento drástico na umidade relativa podia ser usado, após a reversão das tensões ter acontecido, sem perigo para a madeira.

TORGESON (1951) apresentou uma série completa de "novos" programas de secagem para as madeiras dos EEUU, baseados nos princípios dos estudos anteriores.

McMILLEN (1955) começou uma série de artigos fundamentados em trabalhos experimentais, estudando os aspectos relacionados com as tensões na madeira, sendo provavelmente o pesquisador que mais estudou as tensões de secagem (McMILLEN, 1955a, 1955b, 1958, 1963, 1968).

Há, porém, muito pouca informação sobre o desenvolvimento das tensões durante a secagem das coníferas. A maior parte dos estudos foi realizada em madeira de folhosas, por parecer que estas espécies apresentam uma movimentação maior e mais fácil de ser avaliada, segundo McMILLEN (1963).

Espenas, citado por McMILLEN (1963), reportou que as coníferas, particularmente Pseudotsuga menziesii, não desenvolvem os mesmos modelos de tensões que a maioria das folhosas.

Isto foi confirmado por JANKOWSKY e ZAPATA

(1983) trabalhando com Pinus caribaea var. hondurensis, evidenciando a dificuldade de se estabelecer o padrão típico do desenvolvimento das tensões para tal espécie.

2.4. O processo de secagem

Segundo GALVÃO e JANKOWSKY (1985), quando uma peça de madeira verde é exposta ao ambiente, as fibras da superfície tendem a atingir a umidade de equilíbrio (UE) com o ar ao seu redor. Existindo circulação de ar que possibilite remover a água que continua a chegar à superfície, estabelece-se o movimento capilar de água do interior para o exterior da peça.

Para madeiras permeáveis, a taxa de secagem durante a remoção da água capilar é função da velocidade de circulação do ar e da sua capacidade de receber o vapor d'água retirado da madeira, como mostraram claramente JANKOWSKY (1980) e JANKOWSKY e ZAPATA (1983).

Segundo GALVÃO e JANKOWSKY (1985), existindo condições ambientais adequadas que permitam a evaporação da água da superfície, as forças capilares determinam a movimentação inicial da água do interior para o exterior da madeira, que passa a mover-se por difusão quando o teor de umidade cai abaixo do PSF.

Essa difusão da água higroscópica, segundo JANKOWSKY (1979b, 1980) e JANKOWSKY e ZAPATA (1983), é sumamente demorada, não mais dependendo da velocidade de circulação do ar e sim da temperatura e do potencial de secagem.

Segundo HILDEBRAND (1970), três requisitos básicos são necessários para secar a madeira:

- a energia fornecida para evaporar a água durante todo o processo de secagem e também para aumentar a taxa de difusão da água do interior para a superfície da madeira;
- a umidade relativa do ar que envolve a madeira em secagem deve ser capaz de receber a umidade evaporada; e
- o movimento do ar entre as camadas de madeira, definido pela distância dos tabiques, deve fornecer calor à superfície da madeira, manter a umidade relativa no nível desejado e remover a água evaporada contida no ar.

Dada a variedade de fenômenos que estão envolvidos no processo de secagem, muitos também são os fatores que afetam este processo; tanto relacionados com a própria madeira, como relacionados com o meio de secagem. Assim, torna-se relevante discutir separadamente os principais fatores.

- Densidade

Esse parâmetro refere-se à quantidade de substância madeira existente num determinado volume, à uma determinada umidade. Geralmente, utiliza-se a densidade básica, que é a massa de madeira seca em relação ao seu volume saturado, ou seja, a uma umidade superior ao PSF.

De maneira geral, as madeiras mais densas secam mais devagar, isto porque possuem poucos espaços celulares para a movimentação da água capilar, e muita parede celular para ser atravessada por difusão da água higroscópica, de acordo com BROWN *et alii* (1952).

Segundo HART (1966), o tempo de secagem da madeira é diretamente proporcional à densidade da espécie e à espessura da tábua, quando o fator limitante é a remoção da água capilar.

- Estrutura anatômica

SMITH e LEE (1958) trabalhando com folhosas, acharam evidências de que as espécies com maior permeabilidade são geralmente aquelas cujos vasos estão livres de tiloses ou de depósitos de resinas; nestes casos a permeabilidade depende diretamente do tamanho e do número de vasos, como foi confirmado posteriormente por SMITH (1972).

Já no caso das coníferas, a permeabilidade está em função das pontuações aureoladas dos traqueídeos, que se transformam em uma via de fluxo eficiente, como afirmam BAILEY e PRESTON (1969) e SMITH (1972). Se estas pontuações estiverem aspiradas, elas tornam-se um obstáculo ao fluxo do líquido, segundo ERICKSON et alii (1937) e BAILEY e PRESTON (1969).

RIETZ e PAGE (1971) afirmam que nas coníferas o teor de umidade do alburno é geralmente maior que o do cerne; porém, o alburno seca ao ar mais rapidamente que o cerne, estando tão seco quanto o cerne, ou mais ainda, no final da secagem. Por outro lado, KOZLIK e WARD (1981), estudando madeira de Tsuga heterophylla, demonstraram que durante a secagem artificial o cerne alcançou o PSF na metade do tempo que o alburno (sendo que o cerne apresenta quase metade do teor de umidade inicial que o do alburno); do PSF até 15% de umidade, o tempo de secagem para o cerne foi 30% menor que o tempo do alburno.

- Espessura

Segundo KOLLMANN e CÔTÉ (1968), a difusão da água higroscópica é inversamente proporcional à espessura da madeira. Segundo HART (1966) e RIETZ e PAGE (1971), quando o fator limitante é a remoção da água higroscópica, o tem

po de secagem é diretamente proporcional ao quadrado da espessura da tábua e ao quadrado da densidade da espécie.

É considerado como regra geral que o tempo de secagem da madeira é diretamente proporcional à espessura da peça, elevada a potência 1,5. A mesma potência deve ser aplicada à densidade da peça, uma vez que a espessura e a densidade da peça têm o mesmo efeito sobre o tempo de secagem (HILDEBRAND, 1970).

- Umidade

De maneira geral, quanto maior fôr a quantidade de água na madeira, maior será o tempo necessário para a secagem.

Para as madeiras altamente permeáveis, quando o fator remoção de água capilar não é limitante, pode ser verificado que um maior teor de umidade inicial resulta em gradientes de umidade mais inclinados na superfície da madeira, ocasionando uma rapidez de secagem proporcionalmente maior, de acordo com HART (1966).

Assim, o tempo total de secagem pode ser praticamente independente do teor de umidade inicial. Porém, se a remoção da umidade superficial fôr fator limitante, o tempo total de secagem aumenta com o aumento do teor de umi-

dade inicial, mesmo para madeiras altamente permeáveis (HART, 1966); isto porque um maior fluxo de água ocorre, sem ser removido eficientemente da superfície.

Para madeiras altamente impermeáveis, maior teor de umidade inicial não resulta em gradientes mais inclinados na superfície da madeira, sendo que o tempo de secagem até o PSF será proporcional à quantidade de água capilar presente na peça (HART, 1966). Porém, quando os centros das peças atingirem o PSF, todas necessitarão o mesmo tempo adicional para secar.

- Temperatura

Geralmente a temperatura do meio é mais elevada que a do material em secagem, fornecendo assim energia à água da madeira e provocando sua evaporação. A temperatura também influencia a umidade relativa do ar aumentando a pressão de saturação do vapor d'água, ou seja, aumentando a capacidade do ar em receber água evaporada da madeira (RASMUSSEN, 1968; HILDEBRAND, 1970).

À medida que a secagem progride, a taxa de evaporação diminui gradualmente, devendo-se aumentar progressivamente a temperatura para fornecer energia adicional às moléculas de água e manter a taxa de secagem constante.

De maneira geral, quanto maior a temperatura, menor o tempo de secagem. Deve-se observar, porém, certos limites de temperatura para não afetar as propriedades físicas e mecânicas da madeira.

- Umidade Relativa

A umidade relativa está diretamente relacionada com a capacidade do ar de receber maior quantidade de vapor d'água e com a remoção da água nas superfícies da madeira (RASMUSSEN, 1968; HILDEBRAND, 1970).

Assim, para manter a taxa de evaporação constante à medida que a secagem progride, deve-se abaixar progressivamente a umidade relativa, respeitando a resistência do material em secagem.

- Velocidade de circulação do ar

Segundo GALVÃO e JANKOWSKY (1985), a circulação do ar tem quatro finalidades básicas:

- transferir calor do meio de aquecimento para o ambiente de secagem;
- distribuir o calor uniformemente em todo esse ambiente;
- misturar e condicionar o ar (em termos de umidade relativa

e temperatura), antes da sua passagem pela carga em secagem; e

- principalmente, remover a água da superfície da madeira.

Assim, a velocidade da circulação do ar é importante nos estágios iniciais da secagem, quando existem altos teores de umidade; esta importância decresce à medida em que a madeira aproxima-se da UE.

STEINHAGEN (1974), trabalhando com Liriodendrum tulipifera, verificou que abaixo de 40% de umidade não há aumento na rapidez de secagem com o uso de maior velocidade de circulação do ar, e recomenda a utilização de velocidade de menor que 4,2 m/s para umidades abaixo daquele teor.

Nesse sentido, HILDEBRAND (1970) pondera que velocidades de circulação do ar iguais ou superiores a 3 m/s são economicamente vantajosas apenas para madeiras com teores de umidade muito acima do PSF.

2.5. Métodos de secagem

Alguns dos métodos de secagem funcionam eficientemente, no entanto o seu custo é elevado e somente viável a nível de pesquisas, com a secagem por micro-ondas, rádio frequência, radiação infra-vermelha, etc. Outros méto-

dos são altamente sofisticados e com custos ainda elevados, como é o caso da secagem química, à vácuo, por congelamento, com vapor superaquecido, pressão, etc.

Existem ainda, outros métodos considerados comerciais só recentemente, como é o caso da secagem utilizando altas temperaturas e a secagem solar, e por último, os tradicionalmente considerados comerciais, como a secagem ao ar e a secagem em secadores convencionais.

Esta classificação é justificada pelo fato de que um dos aspectos mais importantes da secagem é o seu custo, representado pelos custos de operação do equipamento e de sua depreciação, assim como pelas perdas por degradação do produto final obtido.

As secagens ditas comerciais oferecem o melhor valor em termos de equipamentos e custos operacionais, e a qualidade do produto final é satisfatória para a maioria de suas aplicações.

Se considerarmos os métodos anteriormente citados e as condições econômicas atuais da maioria das empresas brasileiras que secam madeira, chegaremos à conclusão que os métodos comercialmente viáveis são a secagem ao ar com ou sem ventilação forçada, a secagem solar, a secagem em secadores convencionais e a secagem utilizando altas tempera

turas.

2.5.1. Secagem ao ar

É o método mais utilizado para a remoção de grandes quantidades de água da madeira, especialmente no início da secagem, como afirmam RIETZ e PAGE (1971).

Este método de secagem ao ar, também pode ser usado como uma pré-secagem, reduzindo o teor de água da madeira verde até 20%-25% de umidade, quando seria realizada uma secagem convencional até uma umidade em função do local de utilização, como afirmam McMILLEN (1964), RIETZ e PAGE (1971) e OLIVEIRA *et alii* (1982).

De acordo com muitos autores na literatura, dentre eles RASMUSSEN (1968), HILDEBRAND (1970), RIETZ e PAGE (1971), PRATT (1974), BRAMHALL e WELLWOOD (1976), a taxa à qual a madeira verde secará ao ar depende de fatores que envolvem a própria madeira, o pátio e as condições climáticas.

Dentre esses fatores, o pátio de secagem é o mais facilmente controlável, tornando-se assim de grande importância para a secagem ao ar.

O pátio deve estar bem próximo da serraria

que produz ou da fábrica que usa a madeira; deve estar num lugar alto, bem drenado, sem obstáculos aos ventos, etc. (CARLOS, 1984).

Lugares baixos rodeados de alagados ou corpos d'água, retardam a secagem e favorecem o aparecimento de fungos. Lugares elevados e abertos conduzem a uma secagem mais rápida por força dos ventos atuantes; porém, um local alto e seco promove uma secagem tão rápida, que poderá favorecer rachaduras superficiais e de topo.

Outros aspectos que merecem uma atenção especial no pátio de secagem são o preparo das pilhas (por espécies; dimensões, espessuras, grã, valor, etc.); as bases dessas pilhas (que devem permitir ventilação e distanciamento do solo); o espaçamento entre pilhas (que varia em função do clima e dos defeitos a serem evitados); os tabiques, e a proteção da madeira em secagem (contra radiação solar e precipitação diretas).

Os custos de secagem ao ar variam em função de vários fatores, como o pátio de secagem (tamanho, manejo, disposição, produtividade por unidade de área, entabicação, confecção de pilhas, manutenção, etc.), volume de madeira, espécie, espessura, umidade inicial, custo alternativo do capital imobilizado, e principalmente, o tempo de secagem.

Outros fatores, como ressaltam RIETZ e PAGE (1971), e PONCE e WATAI (1985), são os custos com a compra ou arrendamento da terra e seus melhoramentos, investimento em coberturas, tabiques, manutenção de estradas, drenagem, compra de equipamentos e depreciação, salários, impostos, seguro e inventário.

McMILLEN (1964) afirma que um fator não foi levado em consideração nos estudos por ele analisados: foi o custo da degradação da madeira pelo aparecimento de defeitos.

Perdas em valor e em volume de madeira resultantes do aparecimento de defeitos durante a secagem ao ar, devem ser considerados como parte dos custos da secagem, pois a sua porcentagem é significativa, como confirmam RIETZ e PAGE (1971).

No Brasil existem poucas informações sobre os custos de secagem ao ar, como afirmam AZEREDO (1983), CARLOS (1984) e PONCE e WATAI (1985). Porém, no consenso geral sabe-se que não é necessário investir em equipamentos caros, gastar com energia, mão-de-obra especializada, peças de reposição, etc. O pátio de secagem exige um investimento relativamente baixo e sua manutenção é barata.

No processamento da madeira a secagem é uma

das operações mais caras e demoradas. Nesse sentido a secagem ao ar leva vantagem, pois o seu investimento inicial e custo/m³ são comparativamente mais baixos: o custo de secar em secador madeiras densas de folhosas, até o mesmo nível que o atingido na secagem ao ar, pode ser proibitivo, segundo McMILLEN (1964), RIETZ e PAGE (1971) e OLIVEIRA *et alii* (1982).

Os defeitos mais comuns da secagem ao ar podem ser causados por retração da madeira (rachaduras e empenamentos), aparecimento de fungos, decomposição química e ataque de insetos.

As rachaduras superficiais e do topo serão mais severas nas partes da pilha que são mais plenamente expostas, como os topos das tábuas, os lados e as camadas superiores, especialmente se não houver cobertura.

Os empenamentos podem ser reduzidos por um bom entabicação e adequada confecção das pilhas (cobertura e pesos na camada superficial). Uniformidade na serraria, produzindo tábuas de igual espessura, é outro fator desejado que ajuda no controle desse tipo de defeito.

As indústrias têm achado impraticável a determinação periódica do teor de umidade da madeira em secagem, sendo mais interessante, como afirmam RIETZ (1972) e DENIG e

WENGERT (1982), estimar as perdas de umidade em função das condições atmosféricas do local, podendo-se elaborar um calendário regional de secagem para estimar a duração da secagem e qual a época em que a perda de umidade é maior em função do número de dias efetivos de secagem (maior insolação e temperatura, menos chuva, etc.).

Finalmente, há um teor ótimo de umidade final a ser atingido na secagem ao ar para cada espécie, espessura da tábua e condições locais, abaixo do qual o custo para remover 1% de umidade ao ar é maior que o custo da remoção dessa mesma umidade em secadoras convencionais (WENGERT, 1971b).

2.5.2. Secagem solar

Apesar da secagem ao ar ser o método mais utilizado, ela pode ser muito demorada, especialmente nos meses frios e/ou chuvosos, ocasião em que as indústrias precisam de meios mais eficientes para secar a madeira rapidamente.

É por causa disto que os pesquisadores têm-se interessado pela utilização da inesgotável energia do sol para secar a madeira. Os primeiros trabalhos datam da década de 60: JOHNSON (1961), PECK (1962), MALDONADO e PECK (1962), DANIELS (1964), TAO e HSIAO (1964), CHUDNOFF *et alii* (1966).

Com o passar do tempo, as pesquisas têm aumentado muito, trazendo uma contribuição valiosíssima ao assunto: PLUMPTRE (1973), READ *et alii* (1974), VITAL (1976), F.P.R.S. (1977), SANTINI (1981), OLIVEIRA *et alii* (1982), TOMASELLI e MENDES (1983), KYI (1983), SIMPSON e TSCHERNITZ (1984) e outros.

Estas pesquisas têm demonstrado que a secagem solar pode apresentar altas taxas de remoção de água e menos defeitos que a secagem ao ar, reduzindo assim o tempo total da secagem e obtendo um produto de melhor qualidade final.

O funcionamento do secador solar pode ser facilmente explicado com base no princípio físico de que a radiação de ondas curtas pode atravessar materiais translúcidos, o que não ocorre com a radiação de ondas longas. O teto e as paredes do secador são de material translúcido que permitem a passagem da energia solar incidente para o interior, retendo-a o maior tempo possível. As superfícies internas da câmara e o coletor, pintados de preto, absorvem esta energia de ondas curtas e a transformam em energia de ondas longas (calor), a qual é transferida para o ar principalmente por convecção (WENGERT, 1971c; SHARMA, 1975).

Existem três tipos básicos de secadores so

lares, o de coletor externo, o tipo estufa ou casa-de-vegetação, e o semi-estufa. No tipo com coletor externo, o coletor está fisicamente separado da câmara de secagem e o calor é levado até o secador por um meio fluído, ar ou água, de acordo com OLIVEIRA *et alii* (1982). No secador tipo casa de vegetação, o coletor é uma parte integrante do próprio secador, usando o ar para transmitir o calor à madeira. Outras 31 variantes dos três tipos básicos de secadores solares são encontradas em WENGERT e OLIVEIRA (1985).

A escolha do material geralmente é feita em função do seu custo e disponibilidade (BANKS, 1969). Contudo, deve-se considerar também a durabilidade do material em serviço e seu custo de reposição. Normalmente a parede que nunca é atingida pelos raios solares é construída de madeira, assim como também o piso do secador, segundo WENGERT (1971c) e BOIS (1977).

Alguns fatores construtivos do secador solar, que podem afetar o seu funcionamento, devem ser mencionados.

As aberturas ou janelas confeccionadas para eliminar a umidade evaporada não têm-se mostrado muito eficientes (TROXELL e MUELLER, 1968; WENGERT, 1971c; PLUMPTRE, 1973). Contudo, utilizam-se janelas superiores para a entrada do ar seco externo e janelas inferiores para a saída

do ar saturado. Na grande maioria dos secadores, as janelas são reguladas manualmente e os critérios usados diferem muito. CHUDNOFF *et alii* (1966) salientam que no início da secagem quando eventualmente a temperatura alcança valores altos, as janelas devem ser mantidas fechadas para evitar o aparecimento de defeitos na madeira por ocasião do abaixamento da umidade relativa.

Por outro lado, BOIS (1977) diz que no início da secagem, quando a madeira ainda está verde, as janelas devem ser deixadas abertas e à medida que a madeira vai secando, podem ser gradualmente fechadas.

Quando instalados no hemisfério sul, os secadores são voltados para o norte, fazendo ~~com~~ que os raios solares sejam recebidos quase perpendicularmente ao coletor (VITAL e COLLOM, 1974). A maioria dos secadores é construída com o eixo principal (o coincidente com o comprimento da pilha de madeira) orientado na direção leste-oeste (PECK, 1962; MALDONADO e PECK, 1962; TROXELL e MUELLER, 1968).

Para possibilitar uma absorção máxima de energia dentro do secador, a superfície translúcida do teto ou o coletor, devem ser inclinados a um plano normal com os raios solares (BANKS, 1969).

CHUDNOFF *et alii* (1966) afirmam que a eficiên

cia máxima do secador é obtida quando o teto é inclinado perpendicularmente à direção média do sol ao meio dia, ou simplesmente inclinado em direção ao equador a um ângulo com a horizontal igual à latitude do local.

Se o secador fôr projetado para operar o ano todo, a inclinação deve ser igual à latitude; se fôr para funcionar apenas no inverno, o ângulo de inclinação do teto em relação à horizontal deveria ser acrescido em 10° - 15° , ao passo que para o verão, o ângulo deveria ser subtraído de 10° - 15° (OLIVEIRA, 1977, 1978).

Um dos aspectos mais importantes do secador solar é o coletor: a maioria dos coletores de energia solar consiste de uma chapa de metal pintada de preto, que pode ser plana, ondulada ou ranhurada (BANKS, 1969; LITTLE, 1977). As superfícies são pintadas com tinta preta fôscas para absorver a radiação solar e evitar reflexão.

O uso de coletores internos pode ser feito colocando-se a chapa de metal logo abaixo do teto transparente, paralela a esse (MALDONADO e PECK, 1962; CHUDNOFF et alii, 1966; VITAL e COLLOM, 1974; PLUMPTRE, 1979).

Muitas câmaras de secagem foram planejadas sem qualquer tipo de chapa coletora, no entanto, todas as superfícies internas foram pintadas de preto (Troxell e Muel-

LER, 1968; GUENEAU, 1970; SHARMA **et alii**, 1972).

O coletor externo possibilita maior área de absorção de energia solar devido à sua independência com relação ao formato da câmara de secagem (TSCHERNITZ e SIMPSON, 1971). O uso de coletores externos, porém, tem sido limitado, principalmente pelos custos dos mesmos.

A localização dos ventiladores depende do tipo de fluxo de ar desejado: podem ser colocados na parte superior do secador para produzir um fluxo vertical (CHUDNOFF **et alii**, 1966; PLUMPTRE, 1967, 1973; READ **et alii**, 1974; BOIS, 1977 ; TSCHERNITZ e SIMPSON, 1979; YANG, 1980), como tam bém podem ser instalados na altura do meio da pilha, para ge rar um fluxo de ar horizontal (SHARMA **et alii**, 1972; PLUMPTRE, 1979).

Muitos secadores foram equipados com motores reversíveis para inverter periodicamente o fluxo de ar (PLUMPTRE, 1967, 1973; TROXELL e MUELLER, 1968; SARMA **et alii**, 1972). Esse procedimento iguala o teor de umidade final nos dois lados da pilha de madeira.

CHUDNOFF **et alii** (1966) constataram que a velocidade do ar oscilou entre 0,3 e 0,5 m/s, ao passo que TROXELL e MUELLER (1968) encontraram valores entre 0,5 e 1,8 m/s.

LITTLE (1977), analisando diversos experimentos com secagem solar relata que o sistema de ventilação permanecia ligado apenas durante o dia, sendo que BANKS (1969) sugere que os ventiladores deveriam desligar-se automaticamente quando a umidade relativa dentro do secador atingisse um limite máximo ou mínimo e também quando não houvesse radiação solar.

SANTINI (1981), na secagem solar da madeira de Pinus elliottii utilizou termostatos para acionar o sistema de ventilação sempre que a temperatura interna fosse igual ou superior a 30°C. Tal mecanismo mostrou-se eficiente, pois segundo o autor, nenhuma retirada significativa de umidade é realizada abaixo dessa temperatura.

Um sistema destinado a conservar parte do calor captado durante o dia para possibilitar o funcionamento do secador à noite ou nos períodos sem sol aumentaria a eficiência do mesmo, fato que tem sido proposto por diversos pesquisadores (REHMAN e CHAWLA, 1961; BANKS, 1969; SHARMA, 1975).

WENGERT (1971c) calculou que somente 16% da energia solar incidente era usada efetivamente para a secagem. Os 84% perdidos são devidos principalmente a perdas por convecção (29%), por transmissão e reflexão (17%), por

ventilação (14%), por radiação de onda longa (13%) e por condução pelo chão (11%).

TROXELL e MUELLER (1968), com o uso de um pi-reliômetro, estimaram a partir da radiação solar que entra no secador e a partir do teor de umidade da madeira, que entre 25% e 45% da energia solar é empregada na secagem da ma-deira, sendo o restante perdido.

Apesar dessa observação, a secagem solar apresenta várias vantagens sobre a secagem ao ar.

Segundo PLUMPTRE (1967) e TROXELL e MUELLER (1968), nos primeiros estágios da secagem, o secador solar não apresenta superioridade substancial em relação à secagem ao ar, porém, abaixo dos 30% de umidade, a diferença na velocidade de secagem é bem evidente. SANTINI (1981) encontrou superioridade da secagem solar em relação à secagem ao ar mesmo acima dos 30% de umidade, sendo que a secagem solar demorou 59,4% menos tempo que a secagem ao ar até atingir os 30% de umidade. TROXELL e MUELLER (1968) verificaram que no verão praticamente não houve diferença entre os tempos de secagem solar e ao ar até o teor de 20% de umidade, porém a secagem até 12% no secador solar ocorreu em aproximadamente 65% do tempo dispendido ao ar. Nos meses de inverno por ou-tro lado, encontraram que a secagem solar até o teor de umi-dade de 19% ocorreu em aproximadamente 40% do tempo de seca-

gem ao ar. PECK (1962) verificou que a secagem solar foi realizada em 60% do tempo da secagem do ar; REHMAN e CHAWLA (1961) verificaram uma porcentagem de 54%, em igual sentido.

MALDONADO e PECK (1962), CHUDNOFF **et alii** (1966), YANG (1980), CHEN (1981), SANTINI (1981), OLIVEIRA **et alii** (1982), dentre outros, são unânimes ao afirmar que a secagem solar é mais rápida que a secagem natural.

Esse aumento na rapidez da secagem é consequência de uma redução na umidade relativa e uma elevação da temperatura, que ocorrem dentro do secador solar.

PECK (1962) e SANTINI (1981) verificaram que a umidade relativa dentro do secador foi geralmente menor do que a externa, apresentando uma tendência decrescente à medida que a secagem progrediu. Deste modo, à medida que diminuiu o teor de umidade da madeira decresceu também a umidade relativa no secador.

A temperatura dentro do secador é influenciada pelo teor de umidade da madeira (Troxell e Mueller, 1968; Sharma **et alii**, 1972; Bois, 1977; SANTINI, 1981). No início da secagem quando a madeira possui elevado teor de umidade, a diferença entre a temperatura interna e externa não é muito pronunciada, devido ao efeito de resfriamento exercido pela evaporação. Porém à medida que a madeira seca, esta dife-

rença torna-se progressivamente maior.

A umidade de equilíbrio depende da temperatura e da umidade relativa, e conseqüentemente, varia também com a umidade da madeira. À medida que a madeira seca, a umidade de equilíbrio no secador diminui, como mostrou SANTINI (1981).

A grande maioria das pesquisas realizadas mostrou que a qualidade da madeira sêca em secador solar foi superior à da secagem ao ar (TROXELL e MUELLER; 1968; YANG, 1980) e em alguns casos, igual ou melhor que a da secagem convencional (SANTINI, 1981).

Nos estudos conduzidos por PLUMPTRE (1967), a madeira sêca em secador solar sofreu em geral menos degradação que a madeira sêca ao ar e foi pelo menos tão boa quanto a da secagem em secador convencional. PECK (1962) encontrou no secador solar 11% menos rachaduras superficiais que na secagem ao ar. SHARMA **et alii** (1972), verificaram que a qualidade da madeira do secador solar foi semelhante ou melhor que a da secagem em secador convencional e que os defeitos de secagem podem ser melhor controlados do que na secagem ao ar.

Para PLUMPTRE (1979), a qualidade da madeira sêca no secador solar é superior aos outros métodos de seca-

gem, por causa das temperaturas nunca serem tão elevadas, as variações na umidade relativa serem menores que nos outros métodos e pelo fato da madeira sofrer um tratamento de condicionamento suave todas as noites (umidade relativa de 90% a 100%, fazendo com que a umidade interna e superficial das peças tendam a se igualar, evitando assim o surgimento de tensões).

Porém, para realmente poder competir com a secagem ao ar, é essencial que o investimento inicial do secador solar seja o mais baixo possível. Os secadores devem ser de fácil construção e a partir de materiais abundantes no local (PLUMPTRE, 1973).

BANKS (1969) cita que os custos de eletricidade para o ventilador do secador solar foram aproximadamente 33% dos custos totais da secagem solar.

SHARMA et alii (1972) lembram que além do consumo de energia elétrica pelo ventilador deve ser considerado também o custo de depreciação do secador, uma vez que a substituição do plástico poderá ser necessária a intervalos de dois anos aproximadamente.

Os custos de operação são limitados ao contrôle das janelas e do teor de umidade da madeira. SANTINI (1981) achou que os custos da secagem solar foram 60% meno-

res que os da secagem ao ar.

Para melhorar a eficiência da secagem solar, muitos autores recomendam uma pré-secagem ao ar até 30% de umidade e logo executar a secagem solar até a umidade final desejada (GUENEAU, 1970; BOIS, 1977; RYLEY, 1980; KYI, 1983). Outra alternativa seria a secagem solar até 25%-30% de umidade e logo uma secagem em secador convencional até a umidade final.

A secagem solar é uma alternativa eficiente e de baixo custo, particularmente em regiões que recebem abundante radiação solar o ano todo (REHMAN e CHAWLA, 1961; PECK, 1962; MALDONADO e PECK, 1962, CHUDNOFF **et alii**, 1966; TROXELL e MUELLER, 1968; JOHNSON, 1970).

Segundo KYI (1983), no mundo existem aproximadamente 250 secadores solares secando madeira, alguns a nível de pesquisa e outros funcionando em escala comercial.

YANG (1980) e KYI (1983), demonstraram que a utilização de um secador solar para secar madeira em altas latitudes (48° Norte, Ontário, Canadá, e 43° N, Madison, EUA), é tão viável quanto em baixas latitudes. Segundo os autores, durante o verão é possível secar a madeira até 10% de umidade em um período entre 15 e 30 dias.

2.5.3. Secagem em secadores convencionais

A secagem em secador convencional é o método comercial mais comum para a secagem controlada da madeira, de acordo com ROSEN **et alii** (1983). O princípio da secagem em secador é o seguinte: as pilhas de madeira, devidamente entabicadas, são colocadas dentro da câmara de secagem, cujas paredes são de material isolante que evitam perdas de energia por dissipação. Um combustível é usado para gerar o calor do aquecimento interno da câmara de secagem e um sistema de ventilação realiza a circulação interna do ar. Esse ar aquecido passa por dentro da pilha de madeira e provoca a evaporação da água, assim como sua posterior remoção do secador.

As condições de temperatura, umidade relativa e conseqüentemente, do potencial de secagem, são perfeitamente controladas dentro do secador, após terem sido previamente determinadas pelo programa selecionado.

Os programas de secagem constituem-se numa sequência estudada de temperaturas de termômetros seco e úmido, visando a rápida redução da umidade da madeira a um teor pré-determinado, com o menor número possível de defeitos (GALVÃO, 1976).

Quase todos os programas hoje utilizados não

sofreram modificação ou aperfeiçoamento desde a sua idealização. CECH e PFAFF (1978) citam que quando foram elaborados, os programas tradicionais já tinham uma certa deficiência. A maioria dos programas atualmente em utilização é conservadora, apesar de vários autores recomendarem mudanças baseadas em critérios diversos, como McMILLEN (1963) com o método das tensões; RIETZ (1970) com o conceito de umidade fraccional, TOMASELLI (1977), JANKOWSKY (1980) e JANKOWSKY e ZAPATA (1983), com a velocidade de circulação do ar variável em função do teor de umidade da madeira, entre outros.

A secagem em secador convencional tem como principal inconveniente o seu alto investimento inicial, referente ao equipamento e à sua instalação. Porém, quando a produção de madeira é significativa e constante, o investimento em um secador torna-se a melhor alternativa econômica.

COMSTOCK (1975) estimou que a secagem consome de 60% a 70% de toda a energia usada na indústria de produtos de madeira; daí a preocupação com as alternativas para baratear os custos.

Segundo AZEREDO (1983), o custo de secagem da madeira de Pinus comercializada no mercado interno tem a seguinte participação em relação aos valores totais de produção e comercialização:

- para madeira serrada bruta, a secagem representa 9,03% do custo total de produção e 5,62% do preço FOB para venda;
- para madeira serrada beneficiada, a secagem representa 6,48% do custo total de produção, e 4,03% do preço FOB para venda.

Um dos itens mais caros na secagem convencional é o custo com a energia. SANTINI (1981) encontrou que a energia representa 48% do custo da secagem. Deve-se usar, portanto, o combustível mais barato possível para a geração de calor dentro do secador. De acordo com McMILLEN (1964), o custo por m³ de tábua na secagem em secador foi maior que na secagem ao ar e pré-secagem; porém, SANTINI (1981) achou que foi a secagem ao ar quem apresentou o custo por m³ mais elevado em comparação com a secagem em secador e a solar. O referido autor considerou que os custos da secagem solar foram 42% menores que os da secagem convencional, e CHEN (1981) concluiu que a energia elétrica gasta na secagem solar foi 25% daquela usada na convencional.

Muitos pesquisadores esquecem-se do impacto que as condições climáticas podem ter no desempenho do secador, como perdas excessivas de calor pelas paredes durante o inverno, ou durante o verão úmido, quando a massa de vapor de água por unidade de volume do ar externo é maior que a do

ambiente do secador, como afirma LITTLE (1981).

Uma vez que o ar do verão úmido entrando no secador contém mais vapor de água que no inverno, sua capacidade de remover água do secador está prejudicada; assim, um maior fluxo de ar no verão úmido é usado para remover o mesmo teor de água que durante o inverno.

As perdas de calor podem ser, sob estas condições, maiores no verão que no inverno, como mostram ECKELMAN e BAKER (1976). Por outro lado, um dispositivo que permitisse a recuperação da energia do ar removido do secador poderia reduzir o total de energia usado na secagem, como provou CORDER (1980).

Partindo-se do fato que a secagem em secador convencional é mais drástica que a secagem ao ar e a solar, é óbvio que os cuidados com o entabicação da madeira, a colocação de pesos na parte superior das pilhas e o controle rigoroso da secagem, devem ser maiores, pois se estes fatos forem negligenciados, a ocorrência de defeitos sérios será maior na secagem convencional do que nos outros métodos.

Assim, além dos cuidados do operador, os equipamentos devem estar em perfeitas condições de funcionamento. O acompanhamento ou condução da secagem, ou seja, o preparo das amostras de controle, confecção das pilhas, contro-

le, da temperatura e da umidade relativa, acompanha mento da perda de umidade, mudança de fases do programa de secagem e uniformização e condicionamento, devem ser feitos rigorosamente de acordo com as recomendações da literatura específica: RASMUSSEN (1961), HILDEBRAND (1970), BRAMHALL e WELLWOOD (1976), GALVÃO e JANKOWSKY (1985).

Os defeitos como rachaduras, endurecimento superficial e colapso podem ser evitados controlando-se racionalmente o processo de secagem: mantendo a umidade relativa elevada e a temperatura baixa no começo da secagem, assim como adequada velocidade de circulação do ar.

Uma técnica para controlar os empenamentos consiste na colocação de pesos em cima da pilha de madeira, ou de cabos de aço e molas laterais, forçando as tábuas a permanecerem na horizontal, como foi mostrado por KOCH (1971, 1974), WENGERT e BALTES (1974), ARGANBRIGHT **et alii** (1978) e SIMPSON (1982a).

Mas SIMPSON (1982b), afirma que apesar dessas tentativas, dispositivos apropriados, práticos e realmente eficientes para reduzir os empenamentos, não foram desenvolvidos ainda.

O método mais antigo e comum para controlar

empenamento é o de superdimensionar a madeira na hora da secagem, para no processamento posterior jogar fora a madeira empenada, como relata SIMPSON (1982a). Porém, esse método desperdiça madeira, espaço no secador e gasta energia desnecessariamente.

Comparando-se a secagem em secadores convencionais com a secagem ao ar e a solar, pode-se dizer que a primeira possibilita obter teores de umidade mais baixos, o tempo de secagem é menor, o controle dos defeitos de secagem é mais efetivo, e não depende das condições climáticas.

Todas essas vantagens traduzem-se em benefícios consideráveis, como ganhos na estabilidade dimensional da madeira e melhoria na qualidade do produto final.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Preparação da madeira

No presente trabalho utilizou-se madeira de Pinus caribaea var. hondurensis, obtida de árvores com 22 anos de idade provenientes de uma floresta localizada na Fazenda Campininha, município de Pádua Sales-SP, de propriedade do Instituto Florestal do Estado de São Paulo.

Os talhões de onde as árvores foram retiradas tinham sido manejados comercialmente, estando, à data do trabalho, em ponto de corte final com aproximadamente 200 árvores por hectare.

Foi realizado um inventário florestal prévio para verificação da distribuição diametral dos indivíduos, e constatou-se que três classes diametraais englobavam 93,0% da população amostrada. Essas três classes são:

- 1a) CLASSE I - de 25,0 cm a 32,0 cm de DAP, com centro de classe em 28,5 cm e contendo 14,8% da população amostrada;
- 2a) CLASSE II - de 32,0 cm a 39,0 cm de DAP, com centro de classe em 35,5 cm e contendo 54,8% da população amostrada;
- 3a) CLASSE III - de 39,0 cm a 46,0 cm de DAP; com centro de classe em 42,5 cm e contendo 23,4% da população amostrada.

Foram utilizadas dezesseis árvores ao todo, sendo oito árvores da classe diametral I, quatro da classe II e quatro da classe III. Cada ensaio de secagem continha material proveniente de duas árvores da classe I, uma da classe II e uma da classe III, de modo a se obter volumes semelhantes para cada uma das classes diametraais.

De cada árvore derrubada eram obtidas três toras consecutivas de 3,0 m de comprimento cada uma. Logo após o corte, foi realizado um pré-tratamento superficial com solução preservativa de pentaclorofenato de sódio a 5%, para evitar o aparecimento de fungo manchador (azulão). Posteriormente as toras foram transportadas até a serraria do Departamento de Ciências Florestais, ESALQ/USP, em Piracicaba, onde foram desdobradas em tábuas com 2,5 cm de espessura.

Das primeiras toras transportadas a Piracicaba foram retirados discos das suas extremidades, para a obtenção da densidade básica pelo método da balança hidrostática (ABCP M-14/70).

Durante o corte e o desdobro, as toras e as tábuas foram devidamente identificadas, codificando-se:

- classe diametral (I, II ou III);
- número da árvore (1 a 16);
- posição da tora na árvore, (baçal, mediana ou superior);
- tipo de madeira (predominantemente adulta ou juvenil) (Baseado em BARRICHELO, 1979); e
- número da tábua na sequência do desdobramento.

Tal esquema permitiu saber a origem (posição da tora e classe diametral) e o tipo de madeira (juvenil ou adulta), de cada tábua, no decorrer dos ensaios.

As tábuas foram canteadas lateralmente e des-
topadas para 2,5 m de comprimento, tratadas superficialmente por imersão durante 20 segundos em solução preservativa de pentaclorofenato de sódio a 5%, e empilhadas face a face durante 24 horas (para melhorar a penetração e fixação do preservativo), estando então prontas para serem utilizadas nos

ensaios de secagem.

3.2. Métodos de secagem

Foram realizados quatro ensaios de secagem, a saber:

- secagem ao ar, realizada em dois locais distintos (São Paulo e Piracicaba);
- secagem solar, utilizando um secador com coletor no teto; e
- secagem convencional, utilizando um secador convencional e adotando-se um programa tradicional de secagem.

3.2.1. Secagem ao ar

Em Piracicaba a secagem ao ar foi conduzida nas dependências do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ-USP.

Foram montadas duas pilhas com 1,0 m de largura, 1,0 m de altura e 2,5 m de comprimento. Cada pilha era composta de vinte camadas separadas entre si por tabiques com 2,5 cm de espessura. A distância entre tabiques de uma mes-

ma camada foi de 50,0 cm.

Foi confeccionada uma cobertura plástica para proteger as pilhas em secagem da precipitação e da incidência direta dos raios solares. Esta cobertura foi colocada sobre a última camada da pilha, com um declividade de 30° e 12 cm sobressalentes à pilha.

Para controlar a perda de umidade da madeira em secagem foram utilizadas de quatro a seis amostras de controle por pilha, cuja preparação seguiu o procedimento tradicional amplamente descrito em literatura (RASMUSSEN, 1968; HILDEBRAND, 1970; PRATT, 1974; GALVÃO e JANKOWSKY, 1985). As amostras foram colocadas em locais de fácil remoção (nas laterais das pilhas), de forma a facilitar as retiradas e pesagens periódicas das mesmas.

Após o término da secagem, cada amostra de controle teve determinada sua massa final e em seguida foi seccionada em vinte sub-amostras de 10,0 cm de comprimento, das quais determinaram-se as massas úmida e seca a $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$, permitindo o cálculo das umidades finais reais (UFR) de cada sub-amostra. Com as UFR, foram corrigidas as curvas de secagem inicialmente obtidas, permitindo assim curvas baseadas na massa seca real e não somente na massa seca estimada.

Ao final da secagem, as pilhas foram divididas em cinco partes, conforme a Figura 1, procedendo-se então a:

- a. avaliação da ocorrência de defeitos de secagem em todas as tábuas de cada parte das pilhas;
- b. determinação do teor final de umidade em 50% das tábuas da primeira pilha e em 25% das tábuas da segunda pilha. O procedimento para determinação da umidade foi o mesmo adotado para as amostras de controle.

O fato de se dividir as pilhas em cinco partes (Figura 1) permitiu avaliar a variação da umidade final e a ocorrência de defeitos dentro da pilha.

FIGURA 1. Esquema de divisão das pilhas de madeira na secagem ao ar, para análise da distribuição da umidade final.

Os dados de temperatura, precipitação e umidade relativa referentes ao período de secagem, em Piracicaba , foram coletados na estação meteorológica da ESALQ/USP.

Em São Paulo, a secagem ao ar foi conduzida nas dependências do Agrupamento de Produção Industrial da Divisão de Madeiras do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, no bairro do Jaguaré, capital.

Foram montadas duas pilhas de madeira; sendo que os procedimentos para montagem, acompanhamento da secagem, avaliação de defeitos e distribuição da umidade final foram idênticos aos adotados para a secagem ao ar em Piracicaba.

As variações de temperatura e umidade relativa referentes ao período de secagem foram coletados no local, mediante a utilização de um higrôtermôgrafo.

3.2.2. Secagem solar

O secador solar utilizado no ensaio tinha capacidade bruta para 6,0 m³ de madeira e era do tipo com coletor no teto, conforme pode ser observado nas Figuras 2 e 3. O equipamento é constituído de duas partes:

- a câmara de secagem, e
- o conjunto coletor-ventilador.

1. Teto inclinado e translúcido	6. Porta de acesso (parede norte)
2. Janelas superiores	7. Pilha de madeira
3. Ventilador	8. Janelas inferiores
4. Falso teto e coletor solar	9. Piso do secador
5. Defletor	10. Chão

FIGURA 2 . Esquema do secador solar utilizado para secar ma
deira de Pinus caribaea var. hondurensis.

FIGURA 3. Fotografia do secador solar utilizado no ensaio.

As estruturas da câmara foram fabricadas com madeira de Pinus tratada com preservativo hidrossolúvel tipo CCA, e pintadas com tinta preta fosca para melhor captação da energia solar. Na união das peças estruturais foram utilizados elementos de ligação do tipo "gang-nail".

Com o objetivo de coletar o máximo possível de energia solar utilizou-se uma cobertura plástica (cloreto de polivinila, tratada com radiação ultra-violeta, em camada única), em todas as paredes da câmara. A estrutura do falso teto, cuja função era direcionar o fluxo de ar, recebeu o coletor solar, uma chapa de fibra dura com aproximadamente 4,6 m² de área, pintada de tinta preta fôska.

O piso do secador foi construído com madeira de Eucalyptus e montado sobre uma plataforma portátil, para facilitar o transporte com empilhadeira. A altura do piso era de 30,0 cm com relação ao solo.

A face sul possuía duas janelas de 20,0 cm x 20,0 cm, superiores, para permitir a entrada do ar ambiente, e três janelas de 20,0 cm x 20,0 cm, inferiores, para permitir a saída do ar saturado.

A parede norte possuía as portas de acesso à carga e a parede sul possuía uma camada de plástico preto, atrás dos ventiladores.

Sobre o falso teto e na frente das janelas superiores, encontravam-se os dois ventiladores com 48,0 cm de diâmetro e seus motores, de 0,33 HP e 1750 rpm.

A circulação do ar era no sentido horizontal e sem reversão, com os ventiladores funcionando ininterruptamente durante todo o processo de secagem. As aberturas para troca de ar com o exterior foram mantidas abertas das 8:00 às 18:00 horas e fechadas no período restante.

Os dados de temperatura, umidade relativa e velocidade de circulação do ar foram medidos com o auxílio de três pares termoeletricos, um higrotermógrafo e um anemômetro.

Os pares termoeletricos, registraram ininterruptamente as temperaturas do fluxo de ar ao entrar (ar seco) e ao sair da pilha (ar saturado), dentro do secador, bem como a temperatura do ar fora do secador (ambiental).

Foram realizadas duas secagem consecutivas, sendo que a carga de madeira em cada secagem era uma pilha com 1,0 m de largura, 1,0 m de altura e 2,5 m de comprimento.

Os procedimentos para montagem das pilhas, preparação das amostras de controle e acompanhamento da perda de umidade foram os mesmos adotados na secagem ao ar e já

descritos anteriormente.

Após a secagem, as pilhas foram divididas em duas partes (Figura 4), procedendo-se à avaliação dos defeitos e da variação da umidade final, utilizando-se a mesma metodologia adotada para a secagem ao ar.

A divisão das pilhas em apenas duas partes teve como objetivo avaliar as condições da madeira após a secagem em função da circulação do ar, ou seja, a avaliação foi feita nos locais de entrada e de saída do ar circulante.

3.2.3. Secagem convencional

Foi utilizado um secador metálico Hildebrand modelo HD-75, com capacidade bruta de 6,0 m³, pertencente ao Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP. A Figura 5 apresenta um esquema do secador mencionado.

O secador possui controles de temperatura, umidade relativa e acionamento dos ventiladores, permitindo também o registro dos dados relativos ao processo. A circulação do ar foi ininterrupta, sendo que o sentido da circulação era invertido a cada 72 horas de processo.

FIGURA 4 . Esquema de divisão das pilhas de madeira nas secagens solar e convencional, para análise da distribuição da umidade final.

1. Saida de ar	7. Pilha de madeira
2. Entrada de ar	8. Termômetros de bulbos seco e úmido
3. Ventilador centrífugo	9. Válvula de vapor d'água
4. Defletor principal	10. Carrinho
5. Resistências elétricas	11. Defletores secundários
6. Falso teto	

FIGURA 5 . Esquema do secador convencional utilizado para se
car madeira de Pinus caribaea var. hondurensis.

O programa de secagem utilizado foi o sugerido por PRATT (1974), para Pinus caribaea e Pinus oocarpa, e descrito na Tabela 1.

Foram realizadas duas secagens, com um pilha por secagem. As dimensões da carga, o empilhamento da madeira, a preparação das amostras de controle, o acompanhamento da perda de umidade, a avaliação dos defeitos e a verificação da distribuição da umidade final, foram feitos adotando-se a mesma metodologia empregada no ensaio da secagem solar.

3.3. Avaliação das tensões de secagem

Embora o conhecimento sobre as tensões internas que se desenvolvem durante a secagem seja de primordial importância para o aprimoramento dos programas de secagem artificial, a metodologia disponível para sua avaliação é subjetiva e de difícil execução.

No presente trabalho adotou-se a metodologia do fatiamento, proposta por McMILLEN (1955a, 1955b, 1963, 1968). Essa metodologia consiste em quantificar a deformação apresentada por secções retiradas de uma tábua em secagem, deformações essas que são uma resposta à liberação das tensões internas.

TABELA 1. Programa de secagem utilizado neste estudo, para madeira de Pinus caribaea var. hondurensis.

U (%)	TS (°C)	TU (°C)	UR (%)	UE (%)	P.S.
Aquecimento	60	59	95	20	-
Verde	60	55,5	80	13,1	4,5
50	60	54,5	75	12	4,2
40	60	52	65	9,8	4,1
30	65	53	55	7,7	3,9
20	75	57,5	40	5,5	3,6
Uniformização	75	69	76	11	-
Condicionamento	75	73	92	16	-

Onde:

U = umidade da madeira

TS = temperatura de bulbo seco

TU = temperatura de bulbo úmido

UR = umidade relativa

UE = umidade de equilíbrio estimada

P.S. = potencial de secagem: relação entre a umidade corrente da madeira e a umidade de equilíbrio do meio.

FONTE: PRATT (1974).

A tábua selecionada para avaliação das tensões era previamente demarcada em secções a espaços regulares, e cada secção demarcada em fatias, conforme o esquema das Figuras 6 e 7.

As secções eram cortadas das tábuas a intervalos regulares durante o período de secagem e eram embrulhadas em papel alumínio para evitar que entrassem em equilíbrio com o meio. As tábuas de onde foram retiradas as secções eram impermeabilizadas no local do corte para evitar a perda preferencial de umidade e, então, devolvidas à pilha em secagem.

As secções assim cortadas eram pesadas e medidas no seu comprimento; depois, as fatias eram cortadas individualmente, pesadas e medidas. Estas fatias contraíam-se ou alongavam-se após o corte, de acordo com o tipo de tensão que existia: se havia contração, era indicativa de uma tensão de tração.

Depois as fatias eram devidamente empilhadas (como mostra a Figura 8) e passavam por uma sequência programada para secá-las até 0% de umidade, sem porém, causar nenhum aparecimento ou fixação adicional de tensões, a não ser a eventual tensão existente por ocasião do corte inicial.

FIGURA 6 . Esquema de preparação das amostras a serem utilizadas na determinação do gradiente de umidade e do padrão de tensões.

FIGURA 7 . Fotografia das fatias utilizadas na determinação do gradiente de umidade e do padrão de tensões.

FIGURA 8 . Fotografia das fatias utilizadas, prontas para " passar por sequência programada de secagem, até 0% de umidade.

Esta sequência programada era a seguinte:

- 24 horas em câmara a 35°C e 85% ou mais de umidade relativa;
- 24 horas à temperatura ambiente;
- 24 horas à $103 (\pm 2)^{\circ}\text{C}$, até massa constante;
- 0,25 horas em dissecador, até esfriar.

Após isso, eram obtidas as massas e dimensões das fatias secas, para cálculo da umidade e da contração final da madeira.

A diferença entre a medida verde "V" (ou na tábua) e a medida da fatia seca ("S"), com base na medida seca, é chamada "contração final da madeira". A diferença entre a medida antes do corte "AC" (na secção) e a medida depois do corte "DC" (nas fatias), é chamada "deformação da madeira", tida como devida ao efeito das tensões internas de secagem. Ainda, a diferença entre as medidas da tábua (ou verdes) e as medidas da secção, com base na secção, é considerada como uma indicação da contração da tábua como um todo.

Sem um método para medir as tensões diretamente, o artifício de avaliar a movimentação da madeira torna-se de grande utilidade na obtenção de informações.

Em cada uma das pilhas de todos os ensaios de

secagem foram colocadas seis amostras para avaliação de tensões, procurando-se representar as três classes diamétrais e os dois tipos de madeira.

As amostras de madeira adulta, justamente por terem sido retiradas o mais afastadas possíveis da medula, eram tábuas tangenciais; e as amostras de madeira juvenil, por sua vez, foram retiradas da própria medula da árvore, constituindo-se assim em tábuas radiais.

As amostras foram colocadas em lugar de fácil remoção, nas laterais das pilhas, para facilitar a retirada periódica das secções a serem fatiadas.

O objetivo desta avaliação foi a tentativa de se determinar o padrão do desenvolvimento de tensões de secagem para madeira de Pinus caribaea var. hondurensis, procurando verificar possíveis influências do ritmo de crescimento e do tipo de madeira.

3.4. Avaliação dos métodos de secagem

Para avaliar os diferentes métodos de secagem e poder estabelecer uma relação comparativa entre eles, foram analisados quatro aspectos básicos:

- a taxa de secagem;
- a distribuição da umidade na pilha ao final da secagem;
- a ocorrência de defeitos;
- as contrações da madeira em secagem.

A taxa de secagem foi definida como sendo a porcentagem de umidade retirada por unidade de tempo.

Com a obtenção das taxas de secagem foi possível elaborar as curvas de secagem, onde se representa a remoção da umidade em função do tempo.

Ao final da secagem foi feita a análise da distribuição da umidade na pilha, seguindo-se a metodologia já descrita. Esta avaliação visou verificar se haviam diferenças de umidade em função da localização da tábua na pilha em secagem.

Todas as tábuas submetidas aos diferentes métodos de secagem foram avaliadas quanto à ocorrência de defeitos, os quais foram qualificados e quantificados por pilha e por método.

A partir das medições que visavam quantificar as tensões de secagem foi possível avaliar a retração das tábuas em função do teor de umidade, do método de secagem e do tipo de madeira.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para melhor avaliar os resultados obtidos, decidiu-se pela discussão inicial dos métodos de secagem, para posterior comparação entre eles. A densidade básica, por ser um índice de qualidade da madeira indiretamente utilizado na discussão global dos resultados, tem seus valores apresentados isoladamente na Tabela 2.

4.1. Avaliação dos métodos de secagem

4.1.1. Secagem ao ar

Na Tabela 3 são apresentados os valores da perda de umidade em função do tempo de secagem para as qua-

tro pilhas sob estudo. A secagem propriamente dita foi conduzida em 34 dias para Piracicaba e 52 dias para São Paulo (momentos em que foram obtidas umidades correntes mínimas, respectivamente), sendo que o material permaneceu empilhado por um período adicional para que fosse possível estimar a variação na umidade em função do tempo, após a madeira já estar seca. As pilhas I e II, em Piracicaba, foram desmontadas após 137 e 144 dias, respectivamente. Em São Paulo, o encerramento foi realizado após 63 e 125 dias, na mesma ordem. Essas diferenças foram devidas única e exclusivamente a fatores de ordem técnica, envolvendo disponibilidade de locomoção aos locais das pilhas.

A perda de umidade em função do tempo de secagem para os diferentes tipos de madeira (juvenil e adulta) e classes de diâmetro é apresentada nas Tabelas 4, 4A, 5 e 5A.

Conforme pode ser observado na Tabela 3, após 12/13 dias de secagem, a madeira alcançou um teor médio de 22,9% de umidade, com as pilhas de Piracicaba ligeiramente mais secas que as de São Paulo (diferença de 3% na umidade média). Após 34 dias, o teor médio de umidade foi de 16,4%, que pode ser considerado como um bom resultado para a secagem ao ar.

TABELA 2. Densidades básicas em função da altura da árvore, para madeira adulta e juvenil de P. caribaea var. hondurensis de 21 anos de idade.

Altura (MTS)	Classe I		Classe II		Classe III	
	A	J	A	J	A	J
0	0,516	0,501	0,565	0,438	0,473	0,442
	0,654	0,541	0,526	0,453	0,476	0,415
3	0,628	0,486	0,554	0,398	0,431	0,364
	0,624	0,496	0,565	0,426	0,448	0,396
6	0,588	0,575	0,571	0,426	0,478	0,416
	0,644	0,556	0,519	0,419	0,446	0,376
9	0,565	0,473	0,521	0,368	0,431	0,356
	0,586	0,487	0,531	0,409	0,418	0,361

Até o 34º dia, observou-se um comportamento similar da secagem nos dois locais. Posteriormente, as pilhas de Piracicaba acusaram um aumento na umidade média, ao passo que as pilhas de São Paulo continuaram secando, atingindo um teor mínimo de 14,0%, na média. Essa diferença po-

TABELA 3. Perda de umidade em função do tempo, para madeira submetida a secagem ao ar em Piracicaba e São Paulo

Tempo de secagem (dias)	Umidade (%)						
	Piracicaba			São Paulo			
	Pilha I	Pilha II	$\bar{M}$	Pilha I	Pilha II	$\bar{M}$	Média Geral
0	122,5	123,0	122,8	122,2	126,5	124,4	123,6
4	84,0	83,6	83,8	86,9	88,5	87,7	85,8
6	68,7	65,0	66,9	66,6	64,7	65,7	66,3
7	62,1	57,2	59,7	53,7	57,1	55,4	57,6
10/11	31,8	26,4	29,1	26,6	27,7	27,2	28,2
12/13	22,6	20,2	21,4	24,5	24,3	24,4	22,9
14	20,4	18,9	19,7	23,5	23,1	23,3	21,5
26/27	18,3	17,5	17,9	20,5	19,4	20,0	19,0
31	17,7	17,1	17,4	17,7	16,7	17,2	17,3
32	17,4	17,0	17,2	17,5	16,6	17,1	17,2
33	17,3	16,8	17,1	17,4	16,4	16,9	17,0
34	16,5	15,9	16,2	17,0	16,0	16,5	16,4
40	19,1	20,7	19,9	15,5	14,6	15,1	17,5
41/42	18,6	19,2	18,9	15,5	14,5	15,0	17,0
47	19,4	20,3	19,9	15,1	13,7	14,4	17,2
52	18,2	18,5	18,4	14,6	13,4	14,0	16,2
63	-	-	-	16,6	-	-	-
125	-	-	-	-	25,7	-	-
137	18,5	-	-	-	-	-	-
144	-	16,8	-	-	-	-	-

TABELA 4. Redução da massa de água durante a secagem ao ar, para os diferentes tipos de madeira (Juvenil e Adulta).

Tempo de Secagem (dias)	Massa de água (g)							
	Piracicaba				São Paulo			
	Juvenil	Adulta	M	Juvenil	Adulta	M	Geral	Juvenil Adulta
0	5.115,4	4.654,7	4.885,1	4.832,7	6.351,4	5.592,1	5.238,6	4.974,1 5.503,1
4	3.244,1	3.189,1	3.361,2	3.562,9	4.424,2	3.993,6	3.677,4	3.548,1 3.806,7
6	2.852,0	2.546,2	2.699,3	2.752,4	3.259,1	3.005,8	2.852,6	2.802,4 2.902,7
7	2.568,2	2.267,6	2.418,1	2.193,0	2.855,4	2.524,2	2.471,2	2.380,8 2.561,5
10/11	1.167,4	1.180,6	1.174,2	976,9	1.449,5	1.213,2	1.193,7	1.072,3 1.315,1
12/13	849,8	878,6	864,2	912,4	1.275,5	1.094,0	979,1	881,1 1.077,1
14	776,8	806,8	791,8	878,3	1.208,7	1.043,5	917,7	827,6 1.007,8
26/27	674,5	748,8	711,7	777,5	1.019,0	898,3	805,0	726,0 883,9
31	655,5	731,9	693,7	673,0	878,6	775,8	734,8	664,3 805,3
32	652,2	720,9	686,6	673,8	866,6	770,2	728,4	663,0 793,8
33	645,8	713,2	679,5	668,5	858,5	763,5	721,6	657,2 785,9
34	615,7	677,3	646,5	653,3	837,9	745,6	696,1	634,5 757,6
40	741,4	835,3	788,4	577,9	767,8	672,9	730,7	659,7 801,6
41/42	708,6	792,2	750,4	583,2	765,8	674,5	712,5	645,9 779,0
47	744,9	829,1	787,0	582,0	723,1	652,6	719,8	663,5 776,1
52	696,3	765,1	730,7	557,8	709,0	633,4	682,1	627,1 737,1
63	-	-	-	627,9	735,4	681,7	-	- -
125	-	-	-	-	1.407,1	-	-	- -
137	816,7	760,3	788,5	-	-	-	-	- -
144	505,9	695,2	600,6	-	-	-	-	- -

TABELA 4A. Perda de umidade durante a secagem ao ar, para os diferentes tipos de madeira (juvenil e adulta).

Tempo de secagem (dias)	Umidade (%)									
	Piracicaba					São Paulo				
	Juvenil	Adulta	M	Juvenil	Adulta	M	Juvenil	Adulta	Geral	Médias
0	134,2	114,6	124,4	129,0	122,8	125,9	125,2	131,6	125,2	131,6
4	91,6	78,3	85,0	94,7	85,4	90,1	87,6	93,2	87,6	93,2
6	73,4	62,2	67,8	73,1	63,1	68,1	68,0	73,3	68,0	73,3
7	65,8	55,3	60,6	58,3	54,4	56,4	58,5	62,1	58,5	62,1
10/11	29,4	28,9	29,2	26,0	27,5	26,8	28,0	27,7	28,0	27,7
12/13	21,5	21,3	21,4	24,4	24,5	24,5	23,0	23,0	23,0	23,0
14	19,8	19,6	19,7	23,5	23,2	23,4	21,6	21,7	21,6	21,7
26/27	17,3	18,2	17,8	20,8	19,7	20,3	19,1	19,1	19,1	19,1
31	16,8	17,8	17,3	18,0	17,0	17,5	17,4	17,4	17,4	17,4
32	16,8	17,5	17,2	18,0	16,7	17,4	17,3	17,4	17,3	17,4
33	16,6	17,3	17,0	17,9	16,6	17,3	17,2	17,3	17,2	17,3
34	15,8	16,4	16,1	17,5	16,2	16,9	16,5	16,7	16,5	16,7
40	19,3	20,3	19,8	15,5	14,9	15,2	17,5	17,4	17,5	17,4
41/42	18,3	19,3	18,8	15,6	14,8	15,2	17,0	17,0	17,0	17,0
47	19,3	20,2	19,8	15,6	14,0	14,8	17,3	17,5	17,3	17,5
52	18,0	18,6	18,3	14,9	13,7	14,3	16,3	16,5	16,3	16,5
63	-	-	-	16,8	16,5	16,7	-	-	-	-
125	-	-	-	-	25,7	-	-	-	-	-
137	18,9	18,0	18,5	-	-	-	-	-	-	-
144	16,0	17,3	16,7	-	-	-	-	-	-	-

ABELA 5. Redução na massa de água durante a secagem ao ar, para as diferentes classes diamétrais.

Tempo de secagem (dias)	Massa de água (g)										Médias			
	Piracicaba					São Paulo								
	I	II	III	M		I	II	III	M	Geral	I	II	III	
0	4.662,6	5.221,6	4.634,9	4.839,7		4.997,4	-	6.946,0	5.971,7	5.310,3	4.830,0	-	5.790,5	
4	3.288,4	3.458,6	3.139,8	3.295,6		3.551,7	-	4.866,1	4.208,9	3.711,6	3.420,1	-	4.003,0	
6	2.678,0	2.661,0	2.697,8	2.678,9		2.721,7	-	3.543,6	3.132,7	2.910,3	2.699,9	-	3.120,7	
7	2.403,9	2.348,0	2.495,8	2.415,9		2.199,2	-	3.181,1	2.690,2	2.570,1	2.301,6	-	2.838,5	
10/11	1.224,0	1.002,0	1.525,8	1.250,6		1.099,2	-	1.563,6	1.331,4	1.353,2	1.161,6	-	1.544,7	
12/13	900,0	777,3	991,8	899,7		1.009,2	-	1.361,1	1.185,2	1.065,6	954,6	-	1.176,5	
14	822,0	734,5	844,8	800,4		966,7	-	1.286,1	1.126,4	980,0	894,4	-	1.065,5	
16/27	719,1	711,3	738,8	723,1		841,7	-	1.076,1	958,9	844,0	780,4	-	907,5	
31	706,4	688,5	707,8	700,9		726,7	-	928,6	827,7	767,4	716,6	-	818,2	
32	701,0	676,3	695,8	691,0		716,7	-	921,1	818,9	758,7	708,9	-	808,5	
33	692,9	669,8	693,8	685,5		711,7	-	911,1	811,4	752,4	702,3	-	802,5	
34	661,4	634,0	650,8	648,7		694,2	-	888,6	791,4	723,8	677,8	-	769,7	
40	819,4	766,8	747,8	778,0		634,2	-	806,1	720,2	751,9	726,8	-	777,0	
1/42	769,9	736,5	752,8	753,1		636,7	-	803,6	720,2	740,8	703,3	-	778,2	
47	799,1	794,0	755,8	783,0		616,7	-	758,6	687,7	732,6	707,9	-	757,2	
52	739,6	734,8	723,8	732,7		596,7	-	746,1	671,4	701,6	668,2	-	735,0	
63	-	-	-	-		681,7	-	-	-	-	-	-	-	
125	-	-	-	-		-	-	1.396,1	-	-	-	-	-	
137	891,5	672,4	711,8	758,6		-	-	-	-	-	-	-	-	
144	568,1	760,1	-	664,1		-	-	-	-	-	-	-	-	

TABELA 5A. Perda de umidade durante a secagem ao ar, para as diferentes classes diametrais.

Tempo de secagem (dias)	Umidade (%)											
	Piracicaba						São Paulo					
	I	II	III	M	I	II	I	II	III	M	Geral	Médias I II III
0	120,2	127,1	123,1	123,5	122,2	-	126,5	124,4	124,0	121,2	-	124,8
4	84,3	83,0	83,4	83,6	86,9	-	88,5	87,7	85,7	85,6	-	86,0
6	68,3	63,1	71,6	67,7	66,6	-	64,7	65,7	66,7	67,5	-	68,2
7	61,2	55,3	66,3	60,9	53,7	-	57,1	55,4	58,2	57,5	-	61,7
10/11	30,2	24,3	40,5	31,7	26,6	-	27,7	27,2	29,5	28,4	-	34,1
12/13	22,0	19,0	26,3	22,4	24,5	-	24,3	24,4	23,4	23,3	-	25,3
14	20,2	18,0	22,4	20,2	23,5	-	23,0	23,3	21,8	21,9	-	22,7
26/27	17,7	17,7	19,6	18,3	20,5	-	19,4	20,0	19,2	19,1	-	19,5
31	17,4	17,1	18,8	17,8	17,7	-	16,7	17,2	17,5	17,6	-	17,8
32	17,3	16,8	18,5	17,5	17,5	-	16,6	17,1	17,3	17,4	-	17,6
33	17,1	16,6	18,4	17,4	17,4	-	16,4	16,9	17,2	17,3	-	17,4
34	16,3	15,7	17,3	16,4	17,0	-	16,0	16,5	16,5	16,7	-	16,7
40	20,4	19,0	19,9	19,8	15,5	-	14,6	15,1	17,5	18,0	-	17,3
41/42	19,1	18,3	20,0	19,1	15,5	-	14,5	15,0	17,1	17,3	-	17,3
47	19,9	19,7	20,1	19,9	15,1	-	13,7	14,4	17,2	17,5	-	16,9
52	18,3	18,2	19,2	18,6	14,6	-	13,4	14,0	16,3	16,5	-	16,3
63	-	-	-	-	16,6	-	-	-	-	-	-	-
125	-	-	-	-	-	-	25,7	-	-	-	-	-
137	18,9	17,6	18,9	18,5	-	-	-	-	-	-	-	-
144	16,3	17,9	-	17,1	-	-	-	-	-	-	-	-

classe I : diâmetro médio = 28,5 cm

classe II : diâmetro médio = 35,5 cm

classe III : diâmetro médio = 42,5 cm

de ser atribuída à maior pluviosidade em Piracicaba na época do experimento, conforme pode ser comprovado na Figura 9.

Esse fato ressalta ser a secagem ao ar dependente das condições climáticas, principalmente quando o teor de umidade é inferior ao ponto de saturação das fibras. A variação da taxa de secagem, que expressa a perda de umidade (em %) por unidade de tempo (em dias), também é uma forma de se verificar a influência das condições ambientais no processo de secagem natural.

Na Tabela 6 observa-se que as maiores taxas ocorreram nos primeiros dias de secagem, quando o teor de umidade da madeira era elevado, evidenciando-se uma queda acentuada a partir do 12º dia, ocasião em que a umidade média era inferior a 28,0%.

Essa taxa de secagem, elevada no início do processo, é decorrente da retirada da água capilar, cuja remoção está mais relacionada com a circulação do ar, segundo HILDEBRAND (1970), JANKOWSKY (1980) e JANKOWSKY e ZAPATA (1983).

A energia requerida para retirar a água capilar da madeira corresponde, basicamente, ao calor de vaporização da água no estado líquido, uma vez que a água contida no interior da peça desloca-se até a superfície por capilari

PRECIPITAÇÃO (mm)

FIGURA 9. Pluviosidade diária para as cidades de Piracicaba e São Paulo, referente ao período do ensaio de secagem ao ar.

dade. Já a água higroscópica irá requerer um adicional de energia para quebrar as pontes de hidrogênio, adicional esse que está inversamente relacionado com a umidade da madeira (SKAAR, 1972).

TABELA 6. Variação da taxa de secagem, em função do tempo de secagem ao ar e do teor de umidade da madeira. O valor entre parênteses é o erro padrão do valor médio.

Tempo de secagem (dias)	Teor de umidade (%)		Taxa de secagem (%/dia)	
	Média	(s $\bar{m}$)	Média	(s $\bar{m}$)
04	85,4	(12,8)	10,5	(3,0)
06	66,4	(12,3)	8,8	(3,0)
07	57,9	(12,2)	8,4	(4,6)
10-11	28,3	(6,2)	8,4	(2,5)
12	23,2	(3,5)	2,9	(2,2)
14	21,1	(2,9)	1,3	(1,0)
33	17,0	(1,1)	0,2	(0,2)
34	16,3	(1,1)	0,7	(0,3)

Os resultados médios demonstraram que, para a madeira de Pinus caribaea var. hondurensis, a secagem ao ar

é eficiente na retirada da água capilar. Quando o teor de umidade está abaixo do ponto de saturação das fibras verifica-se uma estagnação na velocidade do processo, ocorrendo inclusive a adsorção de umidade se a pluviosidade for acentuada.

Analisando-se o comportamento dos diferentes tipos de madeiras, nota-se que a madeira juvenil continha menor massa de água do que a madeira adulta (Tabela 4), e que a taxa de secagem, quando expressa em g/dia, também manteve-se inferior durante a retirada da água capilar (Tabela 7). Se tal análise tivesse como base a umidade expressa em porcentagem (Tabela 4A e 7A), o resultado seria diferente em função da variação da densidade básica das madeiras juvenil e adulta, levando a interpretações que contrariam as informações da literatura.

A utilização da umidade em porcentagem pode mascarar a real quantidade de água presente na madeira, principalmente com madeiras de diferentes densidades.

A mesma quantidade de água representará maior umidade percentual na madeira juvenil (menos densa) e menor teor na madeira adulta (mais densa).

Neste ensaio, mesmo contendo menor massa de água, a madeira juvenil (mais leve) apresenta umidade percentual maior que a madeira adulta.

TABELA 7. Variação da taxa de secagem (expressa em g de água perdidas por dia de secagem) em função do tempo de secagem ao ar e do teor médio de umidade para as madeiras juvenil e adulta.

Tempo de secagem (dias)	Teor de água (g)		Taxa de secagem (g/dia)	
	Juvenil	Adulta	Juvenil	Adulta
4	3.548,1	3.806,7	356,5	424,1
6	2.802,4	2.902,7	372,9	452,0
7	2.380,8	2.561,5	421,6	341,2
10/11	1.072,3	1.315,1	436,2	415,5
14	827,6	1.007,8	61,2	76,8
31	664,3	805,3	9,6	11,9
32	663,0	793,8	1,3	11,5
33	657,2	785,9	5,8	7,9
34	634,5	757,6	22,7	28,3
40	659,7	801,6	-4,2	-7,3
47	663,5	776,1	-0,5	3,6
52	627,1	737,1	7,3	7,8

TABELA 7A. Variação da taxa de secagem em função do tempo de secagem ao ar e do teor médio de umidade para as madeiras juvenil e adulta. O valor entre parênteses é o erro padrão ($\bar{m}$) do valor médio ($\bar{m}$).

Tempo de secagem (dias)	Teor de umidade (%)				Tasa de secagem (%/dia)			
	Juvenil		Adulta		Juvenil		Adulta	
	$\bar{m}$	$\bar{m}$	$\bar{m}$	$\bar{m}$	$\bar{m}$	$\bar{m}$	$\bar{m}$	$\bar{m}$
4	93,2	(13,4)	81,9	(11,1)	11,4	(3,2)	10,0	(2,9)
6	73,3	(13,7)	62,7	(10,2)	9,8	(1,8)	8,3	(3,4)
7	62,1	(13,9)	54,9	(10,4)	9,7	(4,1)	7,7	(4,9)
10/11	27,7	(6,3)	28,2	(5,4)	6,3	(4,2)	5,2	(3,3)
14	21,7	(3,4)	21,4	(2,7)	1,3	(1,1)	1,2	(1,1)
31	17,4	(1,2)	17,4	(1,2)	0,3	(0,5)	0,4	(0,4)
32	17,4	(1,2)	17,1	(1,1)	-	-	0,2	(0,2)
33	17,3	(1,2)	17,0	(1,1)	0,2	(0,1)	0,2	(0,2)
34	16,7	(1,3)	16,3	(1,0)	0,7	(0,2)	0,7	(0,4)
40	17,4	(2,3)	17,6	(3,3)	-0,4	(0,4)	-0,3	(0,4)
47	17,5	(1,9)	17,1	(3,4)	-0,1	(0,3)	0,1	(0,4)
52	16,5	(1,6)	16,2	(2,7)	0,2	(0,1)	0,2	(0,2)

Sabe-se que a velocidade de movimentação da água na madeira é maior no sentido radial do que no tangencial (KOLLMANN & CÔTÊ, 1968; SIAU, 1971). Em peças cortadas tangencialmente, a menor distância entre o centro da tábua e a sua superfície acompanha o sentido radial da madeira, ocorrendo o inverso em peças cortadas radialmente. Assim, tem-se que tábuas tangenciais tendem a secar mais rapidamente do que tábuas radiais.

Uma vez que as amostras de controle com madeira predominantemente juvenil eram peças radiais, e as de madeira adulta eram tangenciais, pode-se supor que essa diferenciação também refletiu-se na taxa de secagem, com a madeira adulta perdendo água mais rápido do que a madeira juvenil (Tabela 7).

Verificou-se também que os dois tipos de madeira tendem a atingir teores de umidade semelhantes quando a umidade média está atingindo o ponto de saturação das fibras. Dessa forma, a análise conjunta dos resultados indica que o tipo de madeira (juvenil ou adulta) não influencia a secagem ao ar da madeira de Pinus caribaea var. hondurensis.

O efeito do ritmo de crescimento não pode ser corretamente avaliado pelo fato da secagem em São Paulo não conter amostras correspondentes à classe diametral II. Ana-

lisando-se apenas a secagem conduzida em Piracicaba (Tabelas 4 e 4A), não se verifica qualquer tendência de correlação entre a rapidez de secagem e o diâmetro das árvores; ou seja, não ficou evidente um efeito do ritmo de crescimento na taxa de secagem.

Analisando-se as Tabelas 5 e 5A, nota-se que a classe diametral I (mais densa), apresenta menor quantidade de água (em percentagem e em gramas) que a classe diametral III (menos densa). Até o 40º dia, a classe diametral I perdeu menos água (em gramas) que a classe III.

A distribuição da umidade dentro da pilha pode ser examinada na Tabela 8. Como era esperado, as tábuas localizadas no terço superior das pilhas estavam, ao final da secagem, com um teor de umidade mais reduzido e com menor variação entre as peças. As duas pilhas de Piracicaba, por terem sido encerradas praticamente ao mesmo tempo, apresentaram distribuição semelhante de umidade. Em São Paulo, onde as amostras finais foram feitas com dois meses de intervalo entre as pilhas, nota-se claramente que a pilha I estava com madeira mais seca e homogênea. A pilha II, que permaneceu exposta a pluviosidade mais acentuada (Figura 9), readsorveu umidade, e de forma diferenciada, no corpo da pilha.

TABELA 8. Distribuição da umidade ao final da secagem ao ar.

Posição da madeira	Umidade (%)						Média	Erro padrão
	Piracicaba			São Paulo				
	I	II	M	I	II	M		
A	17,4	16,8	17,1	14,1	22,7	18,4	17,8	3,6
B	17,4	16,6	17,0	15,6	22,1	18,9	17,9	2,9
C	16,6	16,8	16,7	15,8	30,9	23,4	20,0	7,3
D	21,2	18,6	19,9	16,5	28,6	22,6	21,2	5,3
E	15,6	17,0	16,3	16,0	26,3	21,2	18,7	5,1
Média	17,6	17,2	17,4	15,6	26,1	20,9	19,1	3,8
Erro padrão	2,1	0,8	1,4	0,9	3,8	2,2	1,5	

I = pilha I; II = pilha II; M = valor médio para as duas pilhas.

Esse comportamento reforça a observação anterior de que a madeira de Pinus caribaea var. hondurensis, quando submetida a secagem natural, deve ser utilizada ou armazenada assim que atingir a umidade desejada, evitando-se dessa forma o efeito prejudicial da pluviosidade.

A distribuição de umidade em função do tipo de madeira e da classe diametral das árvores consta, respectivamente, das Tabelas 9 e 10. As diferenças observadas podem ser atribuídas as variações climáticas, pois não há uma

tendência que diferencia um determinado tipo de madeira.

TABELA 9. Distribuição de umidade ao final da secagem ao ar, para as madeiras juvenil e adulta.

	Umidade (%)							
	Piracicaba			São Paulo			Médias	
	juve nil	adul ta	$\bar{M}$	juve nil	adul ta	$\bar{M}$	juve nil	adul ta
Mínima	11,3	12,6	12,0	12,2	12,4	12,3	11,8	12,5
Máxima	21,2	29,1	25,2	34,7	35,7	35,2	28,0	32,4
Média	17,1	17,7	17,4	17,4	19,7	18,6	17,3	18,7
s (m^{-})	2,3	2,3	2,3	4,7	6,1	5,4	3,5	4,2

Esses resultados permitem concluir que o tipo de madeira (juvenil ou adulta) e o ritmo de crescimento não afetam o comportamento da madeira de Pinus caribaea var. hon
durensis quando submetida a secagem ao ar.

TABELA 10. Distribuição de umidade ao final da secagem ao ar, em função da classe diametral das árvores ensaiadas.

	Umidade (%)										
	Piracicaba				São Paulo				Médias		
	I	II	III	$\bar{M}$	I	II	III	$\bar{M}$	I	II	III
Mínima	11,3	14,2	16,2	13,9	12,2	13,4	13,4	13,0	11,8	13,8	14,8
Máxima	22,4	29,1	20,9	24,1	34,7	31,5	35,7	34,0	28,6	30,3	28,3
Média	17,4	17,5	17,7	17,5	17,2	18,9	20,7	18,9	17,3	18,2	19,2
s ($\bar{m}$)	2,5	2,5	1,4	2,1	4,4	5,7	6,7	5,6	3,5	4,1	4,1

Classe I : diâmetro médio = 28,5 cm

Classe II : diâmetro médio = 35,5 cm

Classe III : diâmetro médio = 42,5 cm

4.1.2. Secagem solar

A perda de umidade em função do tempo de secagem é apresentada na Tabela 11, para as duas pilhas sob estudo. A primeira secagem demandou 18 dias para atingir uma umidade média de 14,1%, enquanto que a segunda demorou 38 dias para atingir 16,1%.

Conforme pode ser observado na Tabela 12, a temperatura média no interior do secador sempre foi maior durante a primeira secagem, decorrente da mesma ter sido efetuada durante um período de insolação mais intensa.

Observando-se as temperaturas do ar fora do secador para as duas secagens, verifica-se que foram semelhantes, sendo que a diferença máxima foi de 4,5°C no 17º dia de secagem.

Para a temperatura na entrada da pilha, a diferença máxima chegou aos 8,0°C, também no 17º dia de secagem. Esse fato comprova que a secagem solar também depende das condições climáticas ambientais, mas que o fator mais importante passa a ser a radiação solar direta.

Embora a segunda secagem tenha demorado o dobro do tempo em relação à primeira, nota-se que a madeira atingiu o ponto de saturação das fibras em aproximadamente duas semanas, resultado que pode ser considerado satisfató-

rio para a secagem solar.

TABELA 11. Perda de umidade em função do tempo, para madeira submetida a secagem solar.

Tempo de secagem (dias)	Umidade (%)		
	Primeira secagem	Segunda secagem	Média
0	120,5	120,6	120,6
1	99,3	116,3	107,8
2	96,9	107,2	102,1
3	82,8	96,2	89,5
5	64,2	77,3	70,8
7	44,3	62,2	53,3
8	39,0	55,2	47,1
16	17,7	26,2	22,0
17	15,7	23,0	19,4
18	14,1**	- *	-
23	-	19,2	-
25	-	18,9	-
30	-	18,5	-
38	-	16,1	-

* : Falta de medição por problemas de ordem técnica.

** : Final da primeira secagem solar.

TABELA 12. Temperaturas médias durante a secagem solar.

Tempo de secagem (dias)	Temperaturas médias °C					
	1ª secagem			2ª secagem		
	A	F	T	A	F	T
1	21,0	26,3	24,0	21,5	26,5	24,5
2	23,5	28,5	25,3	22,8	27,0	26,3
3	23,5	27,0	25,8	21,5	25,8	25,8
4	22,8	27,0	27,5	-	-	-
6	-	-	-	23,3	25,8	25,8
7	23,5	28,8	27,0	23,5	25,8	27,3
8	24,5	32,5	30,8	25,0	25,8	25,8
9	25,0	28,8	27,8	21,8	23,2	22,5
11	18,5	24,5	23,3	-	-	-
12	21,5	28,3	27,5	-	-	-
13	22,8	29,3	27,5	24,5	28,8	26,3
15	-	-	-	22,3	29,3	25,3
16	20,0	27,0	26,3	22,0	26,8	25,8
17	23,8	32,3	31,5	19,3	24,3	23,5
18	23,3	33,5	30,8	-	-	-
22	-	-	-	17,8	25,5	23,0

A = temperatura do ar fora do secador;

F = temperatura interna, na entrada do ar na pilha em secagem;

T = temperatura interna, na saída do ar na pilha em secagem.

- = não obtidas devido a problemas de ordem técnica.

Na Tabela 13. observa-se que a taxa de secagem é elevada enquanto a madeira está acima do ponto de saturação das fibras, diminuindo acentuadamente (de 6,3%/dia para 1,9%/dia) quando a umidade está abaixo de 30%. Esse comportamento é lógico, devido aos diferentes fenômenos físicos envolvidos na retirada da água capilar e da água higroscópica, já discutidos anteriormente.

A temperatura média interna do secador variou muito pouco (de 24,8 a 27,4). No início da secagem, quando o teor de umidade da madeira é alto, o consumo de energia na forma de calor para evaporar esta água é relativamente grande, fato este que restringe o aumento da temperatura interna (25,8°C). Quando a secagem aproxima-se do seu final, a temperatura interna do secador aumenta, porque a saída de água higroscópica é lenta e a energia total consumida nestes estágios é menor.

Os valores da Tabela 13 não permitem afirmar que existiu uma correlação entre a temperatura no interior do secador e a umidade da madeira, embora se verificasse uma tendência do aumento da temperatura a medida em que a madeira torna-se mais seca.

TABELA 13. Variação da taxa de secagem em função: 1. da umidade da madeira; 2. do tempo de secagem solar, relacionada com 3. temperatura média no interior do secador. O valor entre parênteses é o erro do valor médio.

Dias	Umidade (%)		Taxa de secagem (%/dia)		Temperatura média (°C)	
01	109,5	(20,9)	11,1	(10,4)	25,8	(2,5)
02	103,0	(18,3)	6,5	(4,9)	24,8	(2,1)
03	90,8	(17,5)	12,2	(5,5)	25,4	(2,0)
07	55,0	(19,4)	8,3	(3,0)	27,1	(3,7)
08	48,7	(19,6)	6,3	(2,9)	26,4	(2,0)
16	22,8	(9,2)	1,9	(1,8)	27,4	(4,2)
17	20,0	(7,8)	2,7	(1,5)	27,0	(4,4)
18	14,1	(0,7)	1,6	(0,4)	final 1ª se cagem	
38	16,1	(2,0)	0,3	(0,1)	final 2ª se cagem	

Os trabalhos de TROXELL e MULLER (1968), SHARMA et alii (1972), BOIS (1977) e GOUGH (1980), mostram que a temperatura interna independe da umidade da madeira, ao passo que SANTINI (1981), encontrou uma relação inversamente proporcional entre os dois fatores.

A perda de umidade e a variação na taxa de secagem para as madeiras juvenil e adulta, quando submetidas a secagem solar, constam das Tabelas 14, 14A e 15.

TABELA 14. Redução da massa de água durante a secagem solar para os diferentes tipos de madeira (juvenil e adulta).

Tempo de Secagem (dias)	Massa de água (g)		Média	Taxa de secagem (g/dia)	
	juvenil	adulta		juvenil	adulta
0	4.653,2	3.984,5	4.318,9	-	-
1	4.310,7	3.578,0	3.944,4	342,5	406,5
2	3.985,1	3.401,4	3.693,3	325,6	176,6
3	3.450,5	3.031,2	3.240,9	534,6	370,2
5	2.631,2	2.452,7	2.542,0	409,7	289,3
7	1.925,7	1.924,8	1.925,3	352,8	264,0
8	1.650,9	1.737,8	1.694,4	274,8	187,0
16	729,7	841,2	785,5	115,2	112,1
17	646,4	741,5	694,0	83,3	99,7
18*	423,4	500,7	462,1	223,0*	240,8*
23	674,0	705,7	689,9	-	-
25	642,6	711,8	677,2	15,7	-3,1
30	663,1	671,1	667,1	-4,1	8,1
38**	593,2	575,0	584,1	8,7	12,0

* : Final da primeira secagem solar

** : Final de segunda secagem solar.

TABELA 14A. Perda de umidade durante a secagem solar para os diferentes tipos de madeira (juvenil e adulta).

Tempo de secagem (dias)	Umidade (%)		média
	juvenil	adulta	
0	123,5	118,6	121,1
1	113,2	107,1	110,2
2	104,9	101,8	103,4
3	90,6	91,0	90,8
5	68,9	74,1	71,5
7	49,8	58,5	54,2
8	42,6	52,8	47,7
16	19,1	25,2	22,2
17	16,9	22,1	19,5
18	13,5*	14,3*	13,9*
23	16,8	21,5	19,2
25	16,0	21,7	18,9
30	16,6	20,4	18,5
38	14,8**	17,5**	16,2**

* : Final da primeira secagem solar.

** : Final da segunda secagem solar.

TABELA 15. Variação da taxa de secagem em função do tempo de secagem solar e do teor médio de umidade, para as madeiras juvenil e adulta. Entre parênteses encontra-se o erro padrão ($\bar{s}$) do valor médio ($\bar{m}$).

Tempo de secagem (dias)	Teor de umidade (%)				Taxa de secagem (%/dia)			
	juvenil		adulta		juvenil		adulta	
	$\bar{m}$	s ($\bar{m}$)	$\bar{m}$	s ($\bar{m}$)	$\bar{m}$	s ($\bar{m}$)	$\bar{m}$	s ($\bar{m}$)
01	113,2	(14,6)	107,1	(25,3)	10,3	(13,2)	11,6	(9,4)
02	104,9	(11,6)	101,8	(22,7)	8,3	(4,3)	5,3	(5,2)
03	90,6	(10,5)	91,0	(22,0)	14,3	(4,7)	10,8	(5,9)
05	68,9	(7,8)	74,1	(22,7)	11,4	(2,6)	8,5	(4,5)
07	49,8	(10,4)	58,5	(24,0)	9,3	(2,4)	7,7	(3,4)
08	42,6	(9,2)	52,8	(24,2)	7,2	(1,8)	5,7	(3,5)
16	19,1	(2,5)	25,2	(11,4)	0,6	(0,7)	2,8	(1,8)
17	16,9	(1,6)	22,1	(9,8)	2,2	(1,0)	3,1	(1,8)
18 *	13,5	(-)	14,3	(0,7)	1,3	(-)	1,7	(0,4)
38 **	14,8	(0,5)	17,5	(2,0)	0,2	(0,1)	0,4	(0,2)

* final da primeira secagem

** final da segunda secagem

Até o 7º dia de secagem a madeira juvenil continha massa de água ligeiramente superior ao da madeira adulta, sendo que em termos percentuais, a partir do 2º dia a madeira adulta apresentou maior teor de umidade. Verifica-se também, na análise geral, que as taxas de secagem da madeira juvenil sempre foram superiores às da madeira adulta.

Esses resultados são exatamente o contrário dos obtidos na secagem ao ar, reforçando a indicação de que o tipo de madeira não afeta o seu comportamento durante a secagem.

Em relação ao ritmo de crescimento, cujo efeito na perda de umidade em função do tempo pode ser examinado na Tabela 16, nota-se que não existe uma tendência para um determinado tipo de madeira secar mais rapidamente. As variações encontradas podem ser atribuídas mais à distribuição das amostras na pilha do que a um efeito da classe diametral das árvores.

A distribuição da umidade ao final da secagem consta das Tabelas 17 e 19. Nota-se que a parte da pilha correspondente a entrada do ar circulante continha, ao final da secagem, madeira ligeiramente mais seca (umidade média 1,4% inferior) e mais homogênea. Esse resultado pode ser considerado normal, pois ao atravessar a pilha o ar re-

tira a umidade da madeira, tornando-se mais frio e úmido. Consequentemente, a parte final da pilha, correspondente à saída do ar, irá secar menos e de forma mais desuniforme.

Na Tabela 18 nota-se que madeira juvenil estava mais seca percentualmente ao final do processo.

As peças provenientes das árvores de maior diâmetro médio também estavam mais secas ao final da secagem (Tabela 19), com as outras duas classes apresentando resultados semelhantes entre si. Na Tabela 16 observa-se que as peças da classe III começaram a secar mais rapidamente do que as outras, quando o teor médio de umidade era inferior ao ponto de saturação das fibras. Esse comportamento pode ter sido causado tanto por um efeito anatômico decorrente do crescimento mais rápido, como da distribuição das peças na pilha. Uma vez que as outras duas classes apresentaram comportamento extremamente similar entre si, é bastante provável que a segunda hipótese (distribuição aleatórias das tábuas na pilha) seja mais válida.

Assim, os resultados obtidos permitem concluir que, da mesma forma que para a secagem ao ar, o tipo de madeira e o ritmo de crescimento não afetam o comportamento da madeira de Pinus caribaea var. hondurensis, quando submetida a secagem solar.

TABELA 16. Perda de umidade durante a secagem solar, para as diferentes classes, expressa em massa de água (g) e em umidade percentual (%)

Tempo de secagem (dias)	Umidade							
	I		II		III		Média	
	g	%	g	%	g	%	g	%
0	3.870,4	112,5	4.364,6	123,9	4.648,2	127,9	4.294,4	121,4
1	3.320,4	96,6	4.101,3	116,8	4.374,8	119,4	3.932,2	110,9
2	3.160,4	91,9	3.858,0	110,1	4.044,8	110,7	3.687,7	104,2
3	2.727,9	79,3	3.481,3	99,8	3.544,8	97,2	3.251,3	92,1
5	2.120,4	61,7	2.821,3	81,6	2.764,8	76,2	2.568,8	73,2
7	1.582,9	45,9	2.238,0	65,5	2.068,2	56,7	1.963,0	56,0
8	1.420,4	41,1	2.024,6	59,6	1.758,2	48,0	1.734,4	49,6
16	777,9	22,4	901,3	26,7	718,2	19,3	799,1	22,8
17	695,4	20,0	784,6	23,3	631,5	16,9	703,8	20,1
18*	474,4	13,6	546,2	14,1	430,4	15,0	483,7	14,2
23	701,4	20,4	688,9	20,8	677,1	16,4	689,1	19,2
25	686,4	19,9	673,9	20,4	672,1	16,4	677,5	18,9
30	681,4	19,7	658,9	19,8	662,1	16,0	667,5	18,5
38**	576,4	16,7	568,9	17,0	607,1	14,7	584,1	16,1

Classe I : diâmetro médio: 28,5 cm

Classe II : diâmetro médio: 35,5 cm

Classe III: diâmetro médio: 42,5 cm

* : final da primeira secagem;

** : final da segunda secagem.

TABELA 17. Distribuição da umidade ao final da secagem solar.

Posição da madeira	Umidade (%)				Média geral	Erro padrão
	1ª secagem		2ª secagem			
	$\bar{m}$	s ($\bar{m}$)	$\bar{m}$	s ($\bar{m}$)		
A	13,7	0,8	15,6	0,5	14,7	1,3
B	14,6	1,4	17,5	0,9	16,1	2,1
Mínima	12,4	-	14,2	-	13,3	-
Máxima	16,4	-	18,7	-	17,6	-
Média	14,2	0,6	16,6	1,3	15,4	1,7

A = lado da pilha correspondente à entrada do ar

B = lado da pilha correspondente à saída do ar

$\bar{m}$ = média

$s(\bar{m})$ = erro padrão da média

TABELA 18. Distribuição da umidade ao final da secagem solar para as madeiras juvenil e adulta.

	Umidade (%)		média
	juvenil	adulta	
Mínima	12,4	12,8	12,6
Máxima	15,7	18,7	17,2
Média	14,3	15,4	14,9
s ($\bar{m}$)	0,9	1,8	1,4

TABELA 19. Distribuição da umidade ao final da secagem solar, em função da classe diametral das árvores en saídas.

	Umidade (%)			Média
	I	II	III	
Mínima	13,2	13,3	12,4	13,0
Máxima	18,6	18,7	15,6	17,6
Média	15,4	15,4	14,1	15,0
s ($\bar{m}$)	1,8	1,4	1,1	1,4

4.1.3. Secagem convencional

A secagem convencional, seguindo o programa da Tabela 1, foi rápida, com a madeira atingindo um teor médio de 4,9% de umidade em sete dias (Tabela 20). Deve-se esclarecer que durante a segunda secagem ocorreu um defeito no gerador de vapor (que fornece o vapor para controle da umidade relativa no secador), provocando uma secagem excessiva e que requereu um tempo maior para a uniformização e o condicionamento.

TABELA 20. Perda de umidade em função do tempo, para madeira submetida a secagem convencional.

Tempo de secagem (dias)	Umidade (%)		
	1ª secagem	2ª secagem	Média
0	141,6	128,4	135,0
1	116,5	74,8	95,7
2	82,8	52,8	67,8
3	50,8	12,6	31,7
4	27,7	4,2	16,0
5	17,7	3,1	10,4
6	10,8	2,4	6,6
7	7,0	2,8	4,9
9	-	7,6	-
10	-	8,6	-

Como nos outros dois métodos, a taxa de secagem durante a remoção da água capilar foi bastante elevada (Tabela 21), atingindo valores de 39,3%/dia ou 1,64%/h. Abaixo do ponto de saturação das fibras, a taxa diminuiu gradativamente desde 5,6%/dia até 1,7%/dia. Esse comportamento é natural e decorrente das diferenças na movimentação da água capilar e da água higroscópica.

TABELA 21. Variação da taxa de secagem em função da umidade da madeira e do tempo de secagem convencional, relacionada com a temperatura do secador. O valor entre parênteses é o erro padrão ($s\bar{m}$) do valor médio ($\bar{m}$).

Dias	Umidade (%)		Taxa de secagem		Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
	$\bar{m}$	($s\bar{m}$)	$\bar{m}$	($s\bar{m}$)	
01	95,7	(31,0)	39,3	(27,0)	60
02	67,8	(29,1)	27,8	(11,0)	60
03	31,7	(26,5)	36,1	(17,5)	65
04	16,0	(17,9)	15,7	(11,0)	75
05	10,4	(9,5)	5,6	(8,9)	75
06	6,6	(4,5)	3,8	(5,8)	75
07	4,9	(2,2)	1,7	(2,3)	75
10	8,6	(0,2)	-1,0	(0,1)	75

Nas Tabelas 22, 22A e 23, verifica-se que a madeira juvenil continha mais umidade do que a madeira adulta, situação semelhante à encontrada para a secagem solar, e contrária para a secagem ao ar.

TABELA 22. Redução da massa de água em função do tempo de secagem convencional, para as madeiras juvenil e adulta.

Tempo de secagem (dias)	Massa de água (g)			Taxa de Secagem (g/dia)	
	Juvenil	Adulta	Média	Juvenil	Adulta
0	6.134,4	5.813,8	5.974,1	-	-
1	5.014,9	3.782,6	4.398,8	1.119,5	2.031,2
2	3.636,8	2.679,4	3.158,1	1.378,1	1.103,2
3	1.451,5	1.454,3	1.452,9	2.185,3	1.225,1
4	612,6	845,3	729,0	838,9	609,0
5	436,9	510,8	473,9	175,7	334,5
6	321,5	281,8	301,7	115,4	229,0
7*	239,9	203,3	221,6	81,6*	78,5*
9	343,6	315,1	329,4	-	-
10**	395,2	356,1	375,7	-51,6**	-41,0**

* - Final da primeira secagem

** - Final da segunda secagem

TABELA 22A. Perda de umidade em função do tempo de secagem convencional, para as madeiras juvenil e adulta.

Tempo de secagem (dias)	Umidade (%)		
	juvenil	adulta	média geral
0	136,8	133,7	135,3
1	111,6	84,3	98,0
2	80,2	59,0	69,6
3	32,7	31,0	31,9
4	13,9	17,5	15,7
5	9,9	10,7	10,3
6	7,3	6,1	6,7
7	5,4	4,5	5,0
9	7,4	7,7	7,6
10	8,5	8,7	8,6

TABELA 23. Variação da taxa de secagem em função do tempo de secagem convencional e do teor de umidade, para as madeiras juvenil e adulta. Entre parênteses encontra-se o erro padrão ($\bar{m}$) do valor médio ($\bar{m}$).

Tempo de secagem (dias)	Teor de umidade (%)				Taxa de secagem (%/dia)			
	juvenil		adulta		juvenil		adulta	
	$\bar{m}$	($\bar{m}$)	$\bar{m}$	($\bar{m}$)	$\bar{m}$	($\bar{m}$)	$\bar{m}$	($\bar{m}$)
01	111,6	(21,2)	84,3	(33,2)	25,2	(7,9)	49,4	(31,8)
02	80,2	(12,5)	59,0	(35,0)	31,3	(13,7)	25,3	(8,8)
03	32,7	(16,1)	31,0	(33,3)	47,5	(14,0)	28,0	(15,6)
04	13,9	(7,4)	17,5	(23,4)	18,8	(8,9)	13,5	(12,4)
05	9,9	(5,6)	10,7	(12,0)	3,9	(2,2)	6,8	(11,7)
06	7,3	(4,0)	6,1	(5,0)	2,6	(1,6)	4,6	(7,6)
07*	5,4	(2,3)	4,5	(2,3)	1,9	(1,7)	1,6	(2,7)
08	-	-	-	-	-	-	-	-
09	7,4	(0,2)	7,7	(0,2)	-2,2	(0,1)	-2,6	(0,1)
10**	8,5	(0,2)	8,7	(0,2)	-1,1	(0,0)	-1,0	(0,1)

* Final da primeira secagem

** Final da segunda secagem

Na Tabela 24, que contém a perda de umidade em função do tempo de secagem para as tábuas das diferentes classes diametrais, nota-se que as peças da classe I (mais densa), apresentaram menor quantidade de água que a classe diametral III, semelhante ao que ocorreu durante a secagem ao ar.

Em relação à distribuição da umidade ao final do processo, nota-se que a madeira estava homogeneamente seca em toda a pilha (Tabela 25), resultado decorrente de ser a secagem artificial um processo controlável. Como as condições internas (principalmente temperatura e umidade relativa) estão sob controle do operador, e ao final da secagem a madeira é submetida a uniformização e condicionamento, é evidente que a madeira estará homogeneamente seca ao final do processo.

A madeira juvenil estava, ao final da secagem, com um teor de umidade apenas 0,4% inferior ao da madeira adulta (Tabela 26), confirmando a homogeneidade da distribuição da umidade.

Em relação ao ritmo de crescimento as tábuas da classe II (diâmetro médio de 35,5 cm) estavam mais secas (Tabela 27). As tábuas da classe I (diâmetro médio de 28,5 cm) eram as mais úmidas, apesar de terem apresentado menor teor de umidade durante a secagem. Este resultado mostra que

TABELA 24. Perda de umidade durante a secagem convencional, para as diferentes classes diamétrais, expressa em massa de água (g) e em umidade percentual (%).

Tempo de secagem (dias)	Umidade						Média	
	I		II		III			
	g	%	g	%	g	%	g	%
0	4.409,3	128,0	6.155,3	135,1	6.355,2	137,7	5.639,9	133,6
1	2.276,3	64,2	4.698,3	102,5	4.701,2	101,4	3.891,9	89,4
2	1.456,3	40,6	3.553,7	77,1	3.251,6	69,5	2.753,9	62,4
3	386,3	10,9	1.710,7	38,6	1.623,2	33,2	1.240,1	27,6
4	145,3	4,1	716,9	16,3	1.020,0	20,4	627,4	13,6
5	106,3	3,1	467,7	10,6	641,4	13,1	405,1	8,9
6	83,8	2,4	327,3	7,4	354,6	7,5	255,2	5,8
7*	93,8	2,7	238,5	5,4	247,4	5,3	193,2	4,5
9	263,3	7,6	372,6	7,6	340,2	7,7	325,4	7,6
10**	297,8	8,6	423,6	8,7	386,2	8,7	369,2	8,7

Classe I : diâmetro médio: 28,5 cm

Classe II : diâmetro médio: 35,5 cm

Classe III : diâmetro médio: 42,5 cm

* Final da primeira secagem

** Final da segunda secagem

TABELA 25. Distribuição da umidade ao final da secagem convencional.

Posição da madeira	Umidade (%)				Média geral	Erro padrão
	1ª secagem		2ª secagem			
	$\bar{m}$	s ($\bar{m}$)	$\bar{m}$	s ($\bar{m}$)		
A	7,1	0,6	8,7	0,4	7,9	0,9
B	7,2	0,7	9,0	0,4	8,1	1,0
Mínima	6,1	-	8,3	-	7,2	-
Máxima	8,0	-	9,7	-	8,9	-
Média	7,2	0,5	8,9	0,3	8,1	0,4

A = lado da pilha correspondente à entrada do ar

B = lado da pilha correspondente à saída do ar

$\bar{m}$ = média

s($\bar{m}$) = Erro padrão da média

TABELA 26. Distribuição da umidade ao final da secagem convencional, para as madeiras juvenil e adulta.

	Umidade (%)		
	juvenil	adulta	média
Mínima	6,4	6,1	6,3
Máxima	9,0	9,7	9,4
Média	7,4	7,8	7,6
s($\bar{m}$)	0,9	0,9	0,9

a distribuição das tábuas na pilha afeta a umidade final com maior intensidade do que o ritmo de crescimento.

TABELA 27. Distribuição da umidade ao final da secagem convencional, em função da classe diametral das árvores ensaiadas.

	Umidade (%)			
	I	II	III	Média
Mínima	7,1	6,3	6,1	6,5
Máxima	9,7	9,0	9,0	9,2
Média	8,4	7,1	7,8	7,8
s ($\bar{m}$)	0,7	0,6	0,9	0,7

Classe I : diâmetro médio: 28,5 cm

Classe II : diâmetro médio: 35,5 cm

Classe III : diâmetro médio: 42,5 cm

A análise global dos resultados obtidos na secagem convencional também leva à conclusão de que o tipo de madeira e o ritmo de crescimento não influem no comportamento em secagem da madeira de Pinus caribaea var. hondurensis.

4.2. Comparação entre os métodos de secagem

4.2.1. Velocidade de secagem

A perda de umidade em função do tempo de secagem para os diferentes métodos estudados, encontra-se na Figura 10.

Comparando-se a secagem solar com a secagem ao ar nota-se que a velocidade de remoção da água capilar é praticamente a mesma, e que a vantagem da secagem solar é acentuada durante a remoção da água higroscópica (PLUMPTRE, 1967; TROXELL e MUELLER, 1968; JANKOWSKY e ZAPATA, 1983).

Considerando-se as umidades finais médias atingidas com as secagens ao ar e solar, pode-se concluir que apesar de não serem umidades suficientemente baixas para a maioria das utilizações industriais da madeira, estes métodos funcionam eficientemente como uma pré-secagem que pode ser completada, até a umidade final recomendada, em um secador convencional.

Isto possibilita uma economia de energia no secador convencional, pois menor quantidade de água deverá ser removida da madeira, diminuindo assim os custos do processo.

FIGURA 10. Perda de umidade em função do tempo de secagem, para os métodos estudados.

As taxas de secagem obtidas para os métodos estudados encontram-se na Tabela 28, onde se pode observar novamente a superioridade da secagem solar em comparação com a secagem ao ar, na retirada da água higroscópica.

TABELA 28. Taxas de secagem obtidas para os métodos estudados.

Taxa de secagem (%/h)	Método			
	Ao ar (Pir.)	Ao ar (SP)	solar	convencional
Até PSF	0,360	0,410	0,320	1,160
Abaixo do PSF	0,023	0,017	0,100	0,320
Média	0,192	0,214	0,210	0,740

Também se pode verificar que a taxa de secagem diminui com a redução da umidade da madeira (Tabela 28).

4.2.2. Distribuição da umidade final

Das Tabelas 8, 17 e 25, pode-se elaborar a Tabela 29, na qual verifica-se que a maior homogeneidade na dis

tribuição da umidade final foi obtida pela secagem convencional, seguida pela secagem solar e em último, pela secagem ao ar.

Isto, como já foi discutido anteriormente, é devido ao controle permitido pela secagem convencional em termos de temperatura e umidade relativa, e pela realização da uniformização e do condicionamento no final do processo.

TABELA 29. Umidade média ao final da secagem, para os três métodos estudados.

	Ao ar	Solar	Convencional
Umidade (%) média	19,1	15,4	8,0
Erro padrão	3,8	1,7	1,0

4.2.3. Qualidade da madeira

Em nenhum dos três métodos de secagem estudados, a madeira apresentou defeitos que chegassem a comprometer suas propriedades físico-mecânicas.

A ocorrência de defeitos encontra-se na Tabela 30, onde verifica-se que a quantidade de rachaduras de topo na secagem ao ar foi maior que nas outras duas secagens. Isto também foi observado por outros pesquisadores, como MALDONADO (1962), SHARMA *et alii* (1972), YANG (1980), SANTINI (1981).

TABELA 30. Ocorrência de defeitos nos métodos de secagem estudados. A porcentagem refere-se ao número de peças defeituosas em relação ao total de peças da pilha.

Tipo de defeito (%)	Método			
	Ao ar (Pirac.)	Ao ar (SP)	Solar	Convencional
Empenamento torcido	7,0	7,0	5,0	6,0
Rachaduras de topo	2,0	2,0	0,5	0,75
Rachaduras superficiais	0,9	0,8	-	-
Encanoamento	1,0	1,0	-	-

O tipo de defeito mais comum foi o empenamento torcido, sempre ocorrendo em peças localizadas nas camadas superiores das pilhas. Este fato está mais relacionado com as características anatômicas da madeira que com a secagem propriamente dita, e poderia ser atenuado com a colocação de pesos na parte de cima das pilhas.

Porém, estas diferenças estão mais relacionadas com o tipo de corte das tábuas na tora, que com o tipo de madeira propriamente dito, como foi discutido previamente.

Em resumo, os três métodos aqui estudados são apropriados para secagem de madeira de Pinus caribaea var. hondurensis.

A secagem ao ar se mostrou eficiente para usos que não requerem madeira com teores de umidade baixos (menor que 15%-18% de umidade).

A secagem solar foi superior a secagem ao ar, tanto em qualidade do produto final quanto em tempo de secagem, principalmente abaixo do PSF.

A secagem utilizando secador convencional mostrou-se como o melhor método, pois foi mais rápido, apresentou um produto final de melhor qualidade e umidades finais mais baixas, prestando-se, portanto, para usos mais nobres da madeira.

Porém, existe a alternativa da associação de métodos de secagem: uma pré-secagem ao ar, forçada ou não, ou solar, para completar-se posteriormente em secador convencional.

Entretanto, para se obter eficiência máxima do secador convencional, todos os seus instrumentos de controle e componentes devem estar em perfeitas condições de operação e funcionamento, sob os cuidados de técnicos qualificados.

Com relação às tensões de secagem, não foi possível determinar um padrão característico para a madeira de Pinus caribaea var. hondurensis, devido à variação no comportamento durante a secagem, como mostram as Figuras 11 a 18.

Embora já tenha sido relatado comportamento semelhante para outras coníferas (McMILLEN, 1963), existe também a possibilidade de que a metodologia adotada não seja a mais adequada para a constatação das tensões durante a secagem.

FIGURA 11. Tensão de secagem: Pilha "B" da secagem convencional, classe dia metral II e madeira adulta.

FIGURA 12. Tensão de secagem: Pilha "B" da secagem convencional, classe diametral II e madeira juvenil.

FIGURA 13. Tensão de secagem: Pilha "B" da secagem solar, classe diametral I e madeira adulta.

FIGURA 14. Tensão de secagem: Pilha "B" da secagem solar, classe diametral I e madeira juvenil.

FIGURA 15. Tensão de secagem: Pilha "A" da secagem ao ar em São Paulo, classe diametral III e ma deira adulta.

FIGURA 16. Tensão de secagem: Pilha "A" da secagem ao ar em São Paulo, Classe diametral III e madeira juvenil.

FIGURA 17. Tensão de secagem: Pilha "B" da secagem ao ar em Piracicaba, Classe diametral III e madeira adulta.

FIGURA 18. Tensão de secagem: Pilha "B" da secagem ao ar em Piracicaba, classe diametral III e madeira juvenil.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, e na discussão dos mesmos, é possível concluir que:

1. Os três métodos de secagem estudados podem ser perfeitamente utilizados para secagem de tábuas de Pinus caribaea var. hondurensis.
2. A secagem ao ar se mostrou eficiente para usos de madeira que não requerem baixas umidades (menos que 15%-18%).
3. A secagem solar foi superior à secagem ao ar, principalmente em qualidade do produto final e em velocidade de remoção da água higroscópica, já que não houve diferenças significativas durante a remoção da água capilar.
4. A secagem convencional foi o melhor método, tanto em qualidade quanto em tempo de secagem.

5. Como era esperado, a madeira menos densa tem a tendência de conter menor teor de umidade em relação a madeira de maior densidade.
6. Observou-se, nos três métodos de secagem estudados, grande variabilidade na umidade inicial e na taxa de secagem, quando expressas tanto em massa de água ou como porcentagem em base seca, para os diferentes tipos de madeira e ritmos de crescimento; levando à conclusão de que essas variáveis não afetam o comportamento da madeira de Pinus caribaea var. hondurensis durante o processo de secagem.
7. Nos três métodos sob ensaio, o defeito mais frequente foi o empenamento torcido, verificando-se maior incidência nas camadas superiores das pilhas.

5.1. Recomendações

1. Para reduzir os custos do processo de secagem deve-se estudar a associação de métodos: uma pré-secagem ao ar ou solar, completadas posteriormente por uma secagem convencional.
2. Com a metodologia aqui empregada, não foi possível detec-

tar o padrão característico da espécie para o desenvolvimento de tensões durante o processo de secagem. Recomenda-se um estudo mais específico visando adaptar essa metodologia para aplicação em madeiras de coníferas.

3. Uma vez que a utilização da umidade como porcentagem em base seca pode mascarar a quantificação da água existente na madeira, recomenda-se como alternativa complementar o emprego da umidade expressa em termos da massa de água.

6. LITERATURA CITADA

ARGANBRIGHT, D.G. e J.A. VENTURINO e M. GORVAD, 1978. Warp Reduction in young-growth ponderosa pine studs dried by different methods with top-load restraint. Forest Products Journal. 28(8): 47-52.

ARGANBRIGHT, D.G., 1979. Development in applied drying technology, 1971-1977. State of the art report. Forest Products Journal. 29(12): 14-20.

AZEVEDO, N.R.S., 1982. Analise do setor madeireiro, 1978/1982. São Paulo. Associação Brasileira de Produtores de madeiras. 5 p.

AZEVEDO, N.R.S., 1983. Madeiras de reflorestamento - Pinus. Aspectos gerais de mercado e comercialização. Curitiba. Palestra proferida no I Seminário Sobre Processamento e Utilização de Madeiras de Reflorestamento. 24-25 outubro.

- BAILEY, P.J. e R.D. PRESTON, 1969. Some aspects of softwood permeability. Structural studies with douglas fir sapwood and heartwood. Holzforschung. Berlin, 23(4): 113-120.
- BALTES, R.C. e W.T. SIMPSON, 1972. Accelerating oak air drying by presurfacing. Forest Products Laboratory. Research note FPL-0223.
- BANKS, C.H., 1969. Solar Drying of Timber - A Development Study. Csiro subject survey 0/hout 10. Pretoria. 27 p.
- BARRICHELO, L.E.G., 1979. Estudo das características físicas, anatômicas e químicas da madeira de Pinus caribaea var. hondurensis, Barret et Golfari, para produção de celulose kraft. Piracicaba. 167 p. (Tese de Livre Docência -ESALQ).
- BOIS, P.J., 1977. Constructing and Operating a Small Solar-Heated Lumber Dryer. United States Department of Agriculture. Forest Service. 12 p. (Série: Technical Report 7).
- BRAMHALL, G., 1975. Evaporation rate during first stage of lumber drying. Wood Science. 8(1): 368-369.
- BRAMHAL, G., 1976. Semi-empirical method to calculate Kiln-schedule modifications for some lumber species. Wood Science. 8(4): 213-222.

BRAMHALL, G. e R.W. WELLOD, 1976. Kiln Drying of Western Canadian Lumber. Department of fisheries and the environment. Vancouver, Canada. 112 p. VGT 1x2.

BRAMHALL, G. e J.F.G. MACKAY e M. SALAMON, 1978. Kiln Drying of Lumber, Fifteen Questions and answers. Vancouver, Canada. Western forest products laboratory. Information report VP-X-161.

BROWN, H.P. e A.J. PANSIN e C.C. FORSAITH, 1952. Wood in relation to moisture. In: Textbook of Wood Technology. New York, McGraw-Hill, 2: 61-98.

CARLOS, V.J., 1984. Secagem da madeira ao ar. Boletim da Associação Brasileira dos Preservadores da Madeira. São Paulo, 17. 23 p.

CECH, M.Y. e F. PFAFF, 1978. Accelerated Kiln Drying of 1-Inch Hard Maple Lumber. Ottawa, Canada. Eastern forest products laboratory.

CHEN, P.Y.S., 1981. Design and tests of a 500 board feet solar kiln. Forest Products Journal . 31(3):33-38.

CHUDNOFF, M. e E.D. MALDONADO e E. GOYTIA, 1966. Solar Drying of Tropical Hardwoods. Rio Piedras, Porto Rico. United States Department of Agriculture. Institute of Tropical Forestry (Série: Research Paper ITF-2). 26 p.

- COMSTOCK, G.L., 1975. Heat Requirements for Drying: Lumber, Veneer, Particles. p. 8-12.
- COOPER, P.A., G. BRAMHALL e N.A. ROSS, 1974. Estimating preservative treatability of wood from its Air-Flow Properties. Forest Products Journal. 24(9): 99-103.
- CORDER, S.E., 1980. Potential for energy recovery from lumber dry kilns. Forest Products Journal. 30(8): 30-35.
- DANIELS, F., 1964. Direct use of the Sun's Energy. New Haven, Yale University Press. 374 p.
- DENIG, J. e E.M. WENGERT, 1982. Estimating air-drying moisture content losses for red oak and yellow poplar lumber. Forest Products Journal. 32(2): 26-31.
- ECKELMAN, C.A. e J.L. BAKER, 1976. Heat and air requirements in the kiln Drying of wood. West Lafayette. Purdue University. Agric. Exper. Station Research Bulletin, 933. 19 p.
- ERICKSON, H.D. e H. SCHMITZ e R.A. GORTNER, 1937. The Permeability of Woods to Liquids and Factors Affecting the Rate of Flow. University of Minnesota. Agricultural Experiment Station. 42 p. Technical Bulletin 122.

FOREST PRODUCTS RESEARCH SOCIETY, 1977. Practical Application of Solar Energy to Wood Processing. A work shop at Virginia Polytechnic Institute and State University. Backsburg, Virginia. January 6-7. 85 p.

GALVÃO, A.P.M., J.F. SIAU e C. SKARR, 1974. Factors influencing the transient flow of oils into coniferous woods. Wood Science. 7(2): 85-91.

GALVÃO, A.P.M., 1975. Estimativas da umidade de equilíbrio da madeira em diferentes cidades do Brasil. Piracicaba. IPEF. 12: 151-161.

GALVÃO, A.P.M., 1976. Secagem acelerada: Programa para a madeira de jatobá (Hymenaea stilbocarpa Hayne). IPEF. Piracicaba. 12: 151-161.

GALVÃO, A.P.M. e I.P. JANKOWSKY, 1985. Secagem Racional da Madeira. São Paulo. Ed. Nobel. 112 p.

GOLFARI, L., R.L. CASER e U.P.G. MOURA, 1978. Zoneamento ecológico esquemático para reflorestamento no Brasil: 2ª aproximação. Brasília. PRODEF. (11): 1-66. Série Técnica.

GOUGH, D.K., 1980. Timber seasoning in a solar kiln. Paper presented to the conference of International Union of Forestry Research Organization (I.U.F.R.O.). Oxford. 9 p. (não publicado).

- GUNEAU, P., 1970. Une expérience de séchage solaire du bois. Bois et Forêts des Tropiques. 131: 69-78 (resumo em Inglês).
- HART, C.A., 1966. The Drying of Wood. The North Carolina Agricultural Extension Service. External Circular, 471.
- HILDEBRAND, R., 1970. Kiln Drying of Sawn Timber. Nuertingen, Germany. Robert Hildebrand Maschinenbau GmbH. 201 p.
- HUDSON, M.S. e S.V. SHELTON, 1969. Longitudinal flow of liquids in southern pine poles. Forest Products Journal. 19(5): 25-32.
- JANKOWSKY, I.P., 1979. Madeira juvenil; formação e aproveitamento industrial. Circular Técnica IPEF, Piracicaba, nº 81. 18 p.
- JANKOWSKY, I.P., 1979b. Secagem acelerada de madeira de Pinheiros tropicais em estufas industriais. Piracicaba. Boletim Informativo PPT. 1(4): 53-88.
- JANKOWSKY, I.P., 1979c. Influência da densidade básica e do teor de extrativos na umidade de equilíbrio da madeira. Piracicaba, ESALQ/USP. 94 p. (Tese de Mestrado).

JANKOWSKY, I.P., 1980. Efeito do aparelhamento e do tratamento preservativo superficial na secagem da madeira de Pinus spp. Curricular Técnica IPEF, Piracicaba, 109:1-11.

JANKOWSKY, I.P. e E. ZAPATA, 1983. The Drying of Caribbean pine saw wood. In: International Union of Forestry Research Organization (IUFRO). Proceedings of the Wood Drying Working Party at the IUFRO Division V Conference. Carbondale, Illinois, June-Huly.

JANKOWSKY, I.P. e E. ZAPATA, 1983a. Gradiente de umidade e desenvolvimento de tensões da secagem artificial da madeira de Pinus caribaea var. hondurensis. Piracicaba, IPEF. (24): 1-64.

JANKOWSKY, I.P., 1984. Programa de secagem: fundamentos teóricos e sua aplicação para a madeira de Pinus spp. São Paulo. Silvicultura. 34: 21-23.

JANKOWSKY, I.P., 1985. Variação sazonal da umidade de equilíbrio para madeira de Pinus. Piracicaba, IPEF. (31): 41-46.

JOHNSON, C.L., 1961. Wind-powered solar-heated lumber Dryer. Southern Lumberman. 203(2532): 41-44.

- JOHNSON, D.D., 1970. Timber drying - the principles involved. Journal of the Institute of Wood Science 5(2): 3-8.
- KOCH, P., 1971. Process for straightening and drying southern pine 2x4's in 24 hours. Forest Products Journal. 21(2): 17-24.
- KOCH, P., 1972. Utilization of the Southern Pines. Vol. I. United States Department of Agriculture. U.S. Government Printing Office. Washington, D.C. 734 p.
- KOCH, P., 1974. Serrated kiln sticks and top load substantially reduce warp in southern pine studs dried at 240°F. Forest Products Journal. 24(11): 30-34.
- KOLLMANN, F.F.P. e W.A. CÔTÉ JR., 1968. Principles of Wood Science and Technology. New York. Springer. Vol. 1. 592 p.
- KOLLMANN, F.F.P., E.W. KUENZI e A.J. STAMM, 1975. Principles of Wood Science and Technology. Vol. II: Wood Based Materials. Germany. Springer-Verlag. 703 p. 118-120.
- KOZLIK, Ch. J. e J.C. WARD, 1981. Properties and kiln-drying characteristics of young-growth western hemlock dimension lumber. Forest Products Journal. 31(6): 45-53.

KYI, W., 1983. Predicting drying times of some burmese woods based on dring maple in an external colector type solar kiln. In: International Union of Forestry Research Organization (IUFRO). Proceedings on the Wood Drying Working Party at the IUFRO Division V conference. Carbondale. Illinois. June-July.

LITTLE, R.L., 1977. Design and performance of foreign solar lumber dryers. In: Forest Product Research Society. Practical Application of Solar Enengy to Wood Processing. Blacksburg, Virginia. p. 35-48.

LITTLE; R.L., 1981. Effect of weather on dry kiln venting losses. Forest Products Journal. 31(6): 41-44.

LOWERY, D.P., J.P. KRIER e R.A. HANN, 1968. High-Temperature Drying of Lumber - A Review. United States Department of Agriculture. Forest Service. Research Paper Int. 48. 11 p.

MALDONADO, E.D., 1962. Radiación solar para secar caoba em Puerto Rico. Tropical Forests Research Center. Apuntes Forestales Tropicales, 14. 5 p.

MALDONADO, E.D. e E.C. PECK, 1962. Drying by solar radiation in Puerto Rico. Forest Products Journal. 12(10): 487-488.

- Mc MILLEN, J.M., 1955a. Drying stresses in red oak. Forest Products Journal 5(1): 71-76.
- Mc MILLEN, J.M., 1955b. Drying stresses in red - oak: effect of temperature. Forest Products Journal. 5(4): 230-241.
- Mc MILLEN, J.M., 1958. Stresses in Wood During Drying. United States Department of Agriculture. Forest Products Laboratory. Report 1652. 33 p.
- Mc MILLEN, J.M., 1963. A study of drying stresses in ponderosa pine (Pinus pondorosa Laws). In: West coast dry kiln club. Proceedings of 15th Annual Meeting of Western Dry Kiln Clubs. Corvallis, Oregon, p. 48-53.
- Mc MILLEN, J.M., 1964. Wood drying-techniques and economics. Southern lumberman. February, p. 25-32.
- Mc MILLEN, J.M., 1968. Transverse Strains During Drying of 2-Inch Ponderosa Pine. Madison, Wisconsin. United States Department of Agriculture. Forest Service. 26 p. Research Paper FPL-83.
- Mc MILLEN, J.M., 1969. Accelerated Kiln Drying of Pre surfaced 1-Inch Northern Red Oak. United States Department of Agriculture. Forest Products Laboratory. Resarch Paper FPL-122.

MORTATTI, J., 1980. Movimentação da madeira; método de atenuação gama. Seminário apresentado no curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da ESALQ/USP, na disciplina Secagem e Preservação da Madeira.

OLIVEIRA, L.C.S., 1977/78. Secagem solar de madeira de carvalho. Preservação de madeiras. 8/9(1): 52-60.

OLIVEIRA, L.C.S., C. SKAAR e E.M. WENGERT, 1982. Solar and air lumber drying during winter in Virginia. Forest Products Journal. 32(1): 37-44.

PANSHIN, A.J., C. de ZEEUW e H.P. BROWN, 1970. Textbook of Wood Technology. Vol. I. Structure, identification, uses and properties of the commercial woods of the United States and Canada. 3ª ed. Nova York. MCGRAW-HILL. 705 p.

PECK, E.C., 1940. A new approach to the formulation of hardwood dry-kiln schedules. Southern Lumberman. 161 (2033): 136-137.

PECK, E.C., 1962. Drying 4/4 red oak by solar heat. Forest Products Journal. 12(3): 103-107.

PLUMPTRE, R.A., 1967. The design and operation of a small solar seasoning kiln on the equator in Uganda. Commonwealth Forestry Review. 46(4): 298-309.

PLUMPTRE, R.A., 1973. Solar Kilns: Their Suitability for Developing Countries. United Nations Industrial Development Organization. ID/WG, 151/4.

PLUMPTRE, R.A., 1979. Simple solar-heated timber dryers: design, performance and commercial viability. Commonwealth Forestry Review. 58(4): 243-251.

PONCE, R.H. e L.T. WATAI, 1985. Manual de secagem da madeira. São Paulo. Secretaria de Tecnologia Industrial/Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 70 p.

PRAK, A.L., 1970. Unsteady-state gas permeability of wood. Wood Science and Technology. 4: 50-69.

PRATT, G.H., 1974. Timber Drying Manual. London. Department of the Environment. Building Research Establishment. 152 p.

QUÉMÉRÉ, Y., 1976. A Recent Development in the Control of Wood Seasoning Kilns. Paris, France. Centre Technique du Bois. Bulletin D'Informations Techniques. 77: 36-38.

- RASMUSSEN, E.F., 1961. Dry Kiln Operator's Manual. United States Department of Agriculture. 197 p. (Série: Agriculture Handbook, 188).
- RASMUSSEN, E.F., 1968. Dry Kiln Operator's Manual. Madison Forest Products Laboratory. 110 p.
- READ, W.R. e A. CHODA e P.I. COPPER, 1974. A solar timber kiln. Solar Energy. 15(4): 309-316.
- REHMAN, M.A. e O.P. CHAWLA, 1961. Seasoning of timber using solar energy. Indian Forest Bulletin. (New Series) 229. 17 p.
- RESCH, H. e B.A. ECKLUND, 1964. Permeability of wood, exemplified by measurements on red wood. Forest products Journal. May. p. 199-206.
- RESCH, H., 1967. Unsteady-State flow of compressible fluids through wood. Forest Products Journal. 17(3): 48.
- RIETZ, R.C., 1970. Accelerating the Kiln Drying of Hardwoods. United States Department of Agriculture. Forest Products Laboratory. (Série: Approved Technical Article).

RIETZ, R.C. e R.H. PAGE, 1971. Air Drying of Lumber: A Guide to Industry Practices. United States Department of Agriculture. Forest Service. 110 p. (série: Agriculture Handbook, 402).

RIETZ, R.C., 1972. A calendar for Air-Drying Lumber in the Upper Midwest. United States Department of Agriculture. Forest Products Laboratory. (Série: Research note, FPL-224).

ROSEN, H.H., R.E. BODKIN e K.D. GADDIS, 1983. Pressure steam drying of lumber. Forest Products Journal. 33(1): 17-24.

RUCKER, T.W. e W.R. SMITH, 1961. Forced air drying of lumber-research and experimental. Forest Products Journal. 11(9): 390-394.

RYLEY, T., 1980. Solar timber kiln. Australian Forestry Industrial Journal. 46(1): 25-26.

SALAMON, M., 1966. Effect of drying severity on properties of western hemlock. Forest Products Journal. 1(16): 39-56.

SALAMON, M. e J. HEJJAS, 1971. Faster Kiln Schedules for Western Red Cedar and Their Effect on Quality and Strength. Vancouver, British Columbia. Canadian Forestry Service. Department of Fisheries and Forestry . Information Report VP - X - 74.

- SANTINI, E.J., 1981. Secagem de madeira em estufa solar e sua comparação com os métodos convencionais. Curitiba, Paraná. Universidade Federal do Paraná, 185 p. (Tese de Mestrado).
- SEBASTIAN, L.P. e W.A. CÔTE JR e C. SKAAR, 1965. Relationship of gas phase permeability to ultrastructure of white spruce wood. Forest Products Journal. 15(9): 394-404.
- SHARMA, S.N. e N. PREM e B.I. BALI, 1972. A solar timber seasoning kiln. Journal of Timber Development Association of India. 18(2): 10-26.
- SHARMA, S.N., 1975. Solar timber drying. In: Proceedings of Seminar on Industrial Application of Solar Energy. Madras. 6 p.
- SIAU, J.F., 1971. Flow in Wood. New York. Syracuse University Press. 131 p.
- SIAU, J.F., 1984. Transport Processes in Wood. Berlin, Alemanha. Springer-verlag Series in Wood Science. ed. State University of New York. College of Environmental Science and Forestry. 245 p.
- SIMPSON, W.T., 1982a. Warp reduction in kiln-drying hardwood dimension. Forest Products Journal. 32(5): 29-32.

SIMPSON, W.T., 1982b. Pre-drying before press-drying to reduce drying defects in hardwoods. Forest Products Journal. 32(11): 77-80.

SIMPSON, W.T., 1983. Methods of reducing warp when drying. Asian Timber. 2(5): 80-81.

SIMPSON, W.T. e J.L. TSCHERNITZ, 1984. Solar dry kiln for tropical latitudes. Forest Products Journal. 34(5): 25-34.

SKAAR, C., 1972. Water in Wood. Syracuse University Press. 298 p.

SMITH, D.N. e E. LEE, 1958. The Longitudinal Permeability of Some Hardwoods and Softwoods. London, Forest Products Research Society. 13 p. (Série: Special Report, 13).

SMITH, D.N., 1972. Preservation and the permeability of wood. Timber Technology Convention Paper 2, p- 460-463.

STAMM, A.J. e W.K. LOUGHBOROUGH, 1935. Thermodynamics of the Swelling of Wood. United States Department. Forest Products Laboratory. 15 p. Report 1215.

STAMM, A.J., 1964. Wood and Cellulose Science. New York. Ronald Press. 459 p.

STEINHAGEN, H.P., 1974. Efect of kiln air velocity, at various moisture content levels, on drying rate of 4/4 yellow poplar sapwood. Forest Products Journal. 24(4): 45-47.

TAO, Y. e C. HSIAO, 1964. Lumber solar drying experiment at Taichung. Taiwan Provincial Chung-Hsing University Bullettin, nº 63, nº 49. 14 p.

TIEMANN, H.D., 1917. The Kiln Drying of Lumber. New York. J.B. Lippincott. 316 p.

TIEMANN, H.D., 1919. The phenomena of drying wood. Journal of the Franklin Institute. July. 188: 27-50.

TOMASELLI, I., 1979. Secagem a alta temperatura: um processo aplicável às condições brasileiras. Brasil Madeira, Curitiba, 3(27): 32-35.

TOMASELLI, I. e A.S. MENDES, 1983. Wood drying developments in Brasil. In: International Union of Forestry Research Organization (IUFRO). Proceedings of the Wood Drying Party at the IUFRO Division V Conference. Carbondale, Illinois. June-July.

- TOMASELLI, I., 1984. Novas técnicas de secagem de madeira. Silvicultura. 34: 25-30.
- TORGESON, O.W., 1951. Schedules for the Kiln Drying of Wood. United States Forest Products Laboratory. Report 1791.
- TORGESON, O.W., 1956. Effect of piling methods on air circulation in a lumber dry kiln. Forest Products Laboratory. Report nº 1653.
- TROXELL, H.E. e L.A. MUELLER, 1968. Solar lumber drying in the central rocky mountain region. Forest Products Journal. 18(1): 19-24.
- TSCHERNITZ, J.L. e W.T. SIMPSON, 1979. Solar-heated, forced-air, lumber dryer for tropical latitudes. Solar Energy. 22: 563-566.
- VIANNA NETO, J.A.A., 1984. Considerações básicas sobre desdobro de Pinus spp. Silvicultura. 34: 15-19.
- VITAL, B.R. e J.L. COLLOM, 1974. Secador Solar para Madeira. Viçosa, Minas Gerais. Universidade Federal de Viçosa, Imprensa Universitária, 34 p.
- VITAL, B.R., 1976. Utilização de energia solar para secagem de madeira. Revista Ceres. 23(125):1-10.

- WENGERT, E.M., 1971a. Dry kiln automation. Southern Lumberman. Dez. p. 123-124.
- WENGERT, E.M., 1971b. Making Management Decisions in Lumber Drying. Sandston, Virginia. 41 p. Lumber Manufacturers Association of Virginia.
- WENGERT, E.M., 1971c. Improvements in Solar Dry Kiln Design. United States Department of Agriculture. Forest Service 10 p. (Série: Research Note FPL - 0212).
- WENGERT, E.M., 1972. Review of high-temperature kiln-drying of hardwoods. Southern Lumberman. September 15, p. 17-19.
- WENGERT, E.M. e R.C. BALTES, 1971. Accelerating oak drying by presurfacing, accelerated schedules and kiln automation. Forest Products Laboratory. FPL - 0214.
- WENGERT, E.M. e P.G. EVANS, 1971. Automatic programing and control for steam-heated lumber dry kilns. Forest Products Journal. 21(2): 56-59.

WENGERT, E.M. e R.C. BALTES, 1974. A "Pinned" sticker to reduce crook in kiln-drying lumber. Forest Products Journal. 24(8): 23-24.

WENGERT, E.M. e F.M. LAMB, 1983. Making Management Decisions in Lumber Drying. Lumber Manufacturers' Association of Virginia. Sandston, Virginia. 50 p.

WENGERT, E.M. e L.C. OLIVEIRA, 1985. Solar Heated, Lumber Dry Kiln Designs. Blacksburg, Virginia. Department of forest products, Virginia Polytechnic Institute and State University. 91 p.

WRIGHT, G.W., 1962. Factors affecting seasoning economics. Australian Timber Journal. 28(11): 124-128.

YANG, K.C., 1980. Solar kiln performance at a high latitude, 48°N. Forest Products Journal. 30(3): 37-40.