**AVALIAÇÃO DA SECAGEM DE MADEIRA SERRADA
DE *E. grandis* E *E. urophylla*.**

Gianpaola Ciniglio

Engenheira Florestal

Orientador: Prof. Dr. Ivaldo Pontes Jankowsky

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, para a obtenção do título de Mestre em Ciências, Área de Concentração: Ciências e Tecnologia de Madeiras.

PIRACICABA

Estado de São Paulo - Brasil

Abril - 1998

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - Campus "Luiz de Queiroz"/USP

Ciniglio, Gianpaola

Avaliação da secagem de madeira serrada de *E. grandis* e *E. urophylla* / Gianpaola
Ciniglio. - Piracicaba, 1998.
73 p. : il.

Dissertação (mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1998.
Bibliografia.

1. Madeira de eucalipto 2. Madeira serrada 3. Secagem da madeira I. Título

CDD 674.142

**AVALIAÇÃO DA SECAGEM DE MADEIRA SERRADA
DE *E. grandis* E *E. urophylla*.**

GIANPAOLA CINIGLIO

Aprovado em: 09/06/1.998

Comissão julgadora:

Prof. Dr. Ivaldo Pontes Jankowsky

ESALQ/USP

Prof. Dr. Mário Tomazello Filho

ESALQ/USP

Prof. Dr. Ivan Tomaselli

UFPr

Prof. Dr. Ivaldo Pontes Jankowsky
Orientador

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho não dependeu exclusivamente do meu esforço ou vontade, por vezes precisei da atenção, auxílio, dedicação, carinho, dinheiro e sugestões de várias pessoas para que ele pudesse ser realizado. Assim, gostaria de agradecer...

- . a *Ciro ♥ Marisa* - meus pais - que sempre se mostram presente em absolutamente todos os acontecimentos da minha vida;
- . ao amigo e Prof. Dr. Ivaldo P. Jankowsky (e sua família) não somente pela sua orientação acadêmica mas também pelo apoio nas oportunidades profissionais que vem estruturando minha carreira;
- . aos professores Luiz Carlos Estraviz Rodrigues, Hilton T. Z. do Couto e Tarlei A. Botrel pelo auxílio emocional, estatístico e técnico, repectivamente;
- . ao Dr. Fred Dimantas que me mostrou uma nova forma de alimentar o corpo físico e etéreo;
- . a equipe do Sr. Luiz A. Renostro (Palhinha) pela ajuda e paciência no processamento das madeiras na serraria;
- . ao Sr. Walter C. Gallo - Wood Reflorestamento - pela doação da madeira estudada;
- . ao CNPq pela concessão da bolsa;
- . a equipe do Laboratório de Secagem de Madeiras da ESALQ/USP - Pedro, Deisiane, Inês, Ducatti (incluindo sua família), Ariel (nosso querido Prego) e os "bichinhos" Luiz Francisco e Marcelo pela bárbara convivência em tempos de sol, chuva e secagens pela madrugada a dentro;
- . a Faculdade de Engenharia Florestal - UNESP-Botucatu - principalmente os professores Maria Aparecida M. Brasil e Vera Lex Angel que propiciaram meu primeiro contato com essa maravilhosa profissão;
- . a Marialice M. Poggiani e sua equipe pela boa vontade e simpatia;
- . aos meus queridos amigos, cada qual do seu jeito, marcando presença em cada instante de minha vida - Fioravante e Gianfrancesco (os irmãos mais incríveis que alguém pode ter, amo vocês!!), Carol Pinta, Luís Eduardo (Vanessa), Maria ♥ Giovanni, Laura Fofolet, José Luís, André Blu, Ligia Portera, Karim ♥ Alexandre, Maidole Marcom (e sua família), André Xororó, Baco Selari, Kátia Georgia e Colleen Lewis;
- . a Francisco Bertolani pela recente amizade e parceria.
- . aos momentos de felicidade e tristeza que me fortaleceram para finalizar este trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
RESUMO.....	xii
SUMMARY	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivos Gerais.....	3
2.2. Objetivos Específicos.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. Introdução.....	4
3.2. Secagem ao ar livre.....	5
3.3. Secagem Convencional.....	6
3.4. Programas de Secagem.....	9
3.5. Desenvolvimento de programas de secagem.....	11
3.6. Defeitos de Secagem.....	13
3.7. Secagem da Madeira de <i>Eucalyptus</i>	18
3.8. Aspectos silviculturais do <i>E. grandis</i> e <i>E. urophylla</i>	22
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
4.1. Madeira.....	25
4.2. Preparo do material.....	26

4.3. Ensaaios.	28
4.3.1. Determinação do programa de secagem.....	28
4.3.2. Secagem convencional.	31
4.3.3. Secagem ao ar.	33
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
5.1. Densidade Básica.	37
5.2. Seleção do programa de secagem.	37
5.3. Secagem convencional em escala laboratorial.	40
5.3.1. Curvas de secagem.....	40
5.3.2. Quantificação dos defeitos.	43
5.4. Secagem ao ar.....	47
5.4.1. Curvas de secagem ao ar.....	47
5.4.2. Quantificação dos defeitos.	52
5.4.3. Combinação dos processos de secagem.....	64
6. CONCLUSÕES.....	66
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Defeitos de secagem.	14
Figura 2. Esquema demonstrativo da retirada de amostras para determinação do programa de secagem.	26
Figura 3. Esquema demonstrativo da retirada de amostras para secagem convencional.	27
Figura 4. Esquema demonstrativo para a retirada dos corpos de prova para os testes de tensões.	32
Figura 5. Metodologia para avaliar os teste de tensões.	33
Figura 6. Secagem ao ar em local coberto.	34
Figura 7. Secagem ao ar em local aberto com aspersão de água.	34
Figura 8. Perfil do posicionamento das amostras de controle nas pilhas de secagem ao ar.	35
Figura 9. Curva de secagem em estufa laboratorial para <i>E. grandis</i> e <i>E. urophylla</i>	40
Figura 10. Secagem convencional em laboratório para <i>E. grandis</i>	46
Figura 11. Secagem convencional em laboratório para <i>E. urophylla</i>	46
Figura 12. Curva de secagem ao ar para <i>E. grandis</i>	48
Figura 13. Curva de secagem ao ar para <i>E. urophylla</i>	48
Figura 14. Distribuição da umidade no perfil das pilhas de <i>E. grandis</i> após secagem ao ar.	50
Figura 15. Distribuição da umidade no perfil das pilhas de <i>E. urophylla</i> após secagem ao ar.	51
Figura 16. Porcentagem da ocorrência do colapso na condição seca, para <i>E. grandis</i>	53
Figura 17. Valores médios para a variável rachaduras de topo para <i>E. grandis</i>	56

Figura 18. Valores médios para a variável rachaduras de topo para <i>E. urophylla</i>	57
Figura 19. Valores médios para a variável empenamento longitudinal para <i>E. grandis</i>	58
Figura 20. Valores médios para a variável empenamento longitudinal para <i>E. urophylla</i>	59
Figura 21. Valores médios para a variável empenamento torcido para <i>E. grandis</i>	61
Figura 22. Valores médios para a variável empenamento torcido para <i>E. urophylla</i>	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Variáveis do ensaio a 100°C.....	28
Tabela 2. Escore atribuído aos defeitos de secagem.	30
Tabela 3. Equações para a estimativa dos parâmetros de secagem.....	31
Tabela 4. Critérios para classificação de defeitos de secagem.	33
Tabela 5. Valores médios obtidos para <i>E. grandis</i> e <i>E. urophylla</i> das variáveis para ensaio a 100°C.....	38
Tabela 6. Valores dos parâmetros para a seleção do programa de secagem.....	38
Tabela 7. Programa proposto para a secagem para <i>E. grandis</i> e <i>E. urophylla</i>	39
Tabela 8. Avaliação da umidade final média (%), distribuição da umidade (%) e tensões internas.....	43
Tabela 9. Porcentagem dos defeitos antes e depois da secagem na estufa laboratorial.....	44
Tabela 10. Incidência dos defeitos de secagem para <i>E. grandis</i> e <i>E. urophylla</i>	44
Tabela 11. Umidades inicial e final (%) para madeira seca ao ar.	47
Tabela 12. Tempo de secagem (dias) para madeira seca ao ar.	49
Tabela 13. Velocidade de secagem (%U/dia) para madeira seca ao ar.	49
Tabela 14. Porcentagem de medula.	53
Tabela 15. Porcentagem de peças com rachaduras de topo na condição verde, PSF e seca.	54
Tabela 16. Perdas em metros lineares de tábua e em porcentagem do total, devido à rachaduras de topo nas condições verde, PSF e seca.	55

Tabela 17. Média, desvio padrão e teste t para a variável rachaduras de topo.	56
Tabela 18. Média, desvio padrão e teste t para a variável empenamento longitudinal.	58
Tabela 19. Valores médios para empenamento longitudinal na condição verde, PSF e seca e índice de recuperação (%).	60
Tabela 20. Porcentagem de peças com empenamento longitudinal na condição verde, PSF e seca.	60
Tabela 21 . Média, desvio padrão e teste t para a variável empenamento torcido.	60
Tabela 22. Valores médios para empenamento torcido na condição verde, PSF e seca e índice de recuperação (%).	61
Tabela 23. Porcentagem de peças com empenamento torcido na condição verde, PSF e seca.	62
Tabela 24. Distribuição dos defeitos nas pilhas de secagem ao ar na condição seca.	63

**AVALIAÇÃO DA SECAGEM DE MADEIRA SERRADA
DE *E. grandis* E *E. urophylla*.**

Autor: Gianpaola Ciniglio

Orientador: Prof. Dr. Ivaldo Pontes Jankowsky

RESUMO

Este estudo avaliou o comportamento das espécies *E. grandis* e *E. urophylla* em relação aos processos de secagem ao ar e secagem convencional.

O programa de secagem foi determinado através de ensaio a 100°C definindo-se para as duas espécies um mesmo programa, com temperatura inicial de 40°C, temperatura final de 65°C e potencial de secagem 2.0. O tempo de secagem da condição úmida até a umidade final de 14 % foi de 25 e 22 dias para o *E. grandis* e *E. urophylla* respectivamente, demonstrando a adequação do programa. Os defeitos foram quantificados verificando-se de pequena e moderada incidência de empenamentos longitudinal e torcido, rachaduras de topo e colapso.

Na secagem ao ar foram testados dois tratamentos: em local coberto e em local aberto com aspersão intermitente de água.

Estatisticamente os tratamentos não mostraram diferença significativa entre si recomendando-se como melhor forma de pré secagem a secagem em local coberto sem aspersão de água.

O tempo ideal de pré secagem variou de 15 a 19 dias respectivamente para *E. grandis* e *E. urophylla*. O tempo de secagem convencional gastos do ponto de saturação das fibras até a umidade de 14% foi de 7 dias para o *E. grandis* e 8 dias para o *E. urophylla*. Com essa combinação (pré-secagem associada a secagem convencional) o início da secagem da madeira de *Eucalyptus* terá taxas de secagem bastante suaves minimizando a incidência de defeitos, principalmente o colapso, e o tempo de secagem convencional será diminuído. No conjunto a combinação de processos promoverá um menor custo total de secagem com o menor índice de defeitos possível.

EVALUATION OF *E. grandis* AND *E. urophylla* LUMBER DRYING

Author: Gianpaola Ciniglio

Adviser: Prof. Dr. Ivaldo Pontes Jankowsky

SUMMARY

Air drying and kiln drying of *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus urophylla* lumber was evaluated.

A 100°C screening methodology was used to select kiln schedule, and the same schedule (with 40°C initial temperature, 65°C final temperature and drying potential equal 2.0) is suggested for both species.

Kiln drying times from wet condition to 14% final moisture content were 25 and 22 days for *E. grandis* and *E. urophylla*, respectively. Evaluation of drying defects showed a little to moderate incidence of warping, end checks and collapse. The suggested kiln schedule can be considered as adequate to lumber of both species.

Air drying was conducted under shed and air exposed with intermittent water spray. There was no difference between the two conditions, and air drying under shed is recommended as a predrying method.

Air drying times from wet condition to FSP were 15 and 19 days for *E. grandis* and *E. urophylla*, respectively. Considering conventional kiln drying times around 8 days from FSP to 14% final moisture content, the combination of methods (air under shed and conventional kiln drying) should reduce costs and defects incidence.

1. INTRODUÇÃO

A madeira, embora seja um material renovável, não pode ser encarada como uma matéria-prima inesgotável, fazendo-se fundamental o uso racional desse recurso.

É crescente a preocupação com a conservação dos recursos florestais, que ao mesmo tempo devem cumprir a importante função de proteção ambiental e suprir a não menos importante indústria de produtos florestais. Esse fato está provocando mudanças profundas tanto na consciência da sociedade como um todo como também na forma de ação e na estratégia das indústrias (Jankowsky, 1993).

Diversas ações são propostas para se atingir o equilíbrio entre a manutenção do recurso florestal e a atividade da indústria madeireira destacando-se a redução de perdas durante o processamento e a utilização de espécies não tradicionais no mercado.

Dentre as espécies não tradicionais destaca-se a madeira de eucalipto, sendo para a indústria de base florestal uma alternativa oportuna e estratégica, por ser madeira de reflorestamento proveniente de plantações de ciclo curto.

Uma das características desfavoráveis dessa madeira, principalmente quando proveniente de árvores jovens, é a propensão a apresentar sérios defeitos durante a secagem, quer seja ao ar ou em secadores, o que pode ser fator limitante por implicar no aumento dos custos.

Como alternativa para minimizar os defeitos que ocorrem durante a secagem tem-se a combinação de processos como a secagem ao ar e a secagem convencional. A avaliação desses processos em conjunto é essencial para fornecer subsídios para minimizar os defeitos e o tempo de secagem.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Gerais.

O presente trabalho tem por finalidade avaliar o comportamento da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, quando submetida aos processos de secagem ao ar e secagem convencional.

2.2. Objetivos Específicos.

Dentre os objetivos específicos, tem-se:

- determinar e testar o programa de secagem convencional para as duas espécies;
- avaliar o efeito da aspersão intermitente de água durante a secagem ao ar;
- sugerir a melhor combinação de processos entre a secagem ao ar (com ou sem aspersão de água) e secagem convencional.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Introdução.

Para qualquer uso da madeira como produto, a mesma deve ser previamente seca, para que melhor se possa usá-la. Entre outros fatores é importante secar madeira porque:

- . reduz a movimentação dimensional;
- . reduz o custo de transporte;
- . aumenta a resistência mecânica;
- . melhora a qualidade de aplicação dos vernizes e colas;
- . evita o ataque de fungos.

A principal razão para a secagem de madeira é garantia de que ela estará dimensionalmente estável antes do seu uso em uma estrutura ou em um item manufaturado. O objetivo é assegurar que algum subsequente movimento na madeira manufaturada seja negligenciável (Vermaas, 1995).

Lamb¹, citado por Jankowsky (1995), considera a madeira como adequadamente seca, quando apresentar os seguintes atributos:

- . livre de defeitos visíveis, tais como rachaduras, empenamentos, colapso e manchas;
- . teor de umidade compatível com o uso pretendido;

¹ LAMB, F. M. Targeting and achieving the final moisture content. In: Profitable Solutions for Quality Drying of Softwoods and Hardwoods. Charlotte, 1994. 54-6p.

- . mínimo de variação no teor de umidade, tanto dentro de cada peça como entre todas as peças;
- . livre das tensões de secagem.

O nível aceitável para cada um desses fatores irá variar de acordo com o tipo e aplicação dessa madeira; produtos de maior valor agregado irão requerer padrões de qualidade muito mais rígidos.

3.2. Secagem ao ar livre.

Sendo o método de secagem mais antigo, no processo de secagem ao ar livre a influência do homem é pequena, pois depende basicamente da temperatura, umidade relativa e velocidade do fluxo de ar no local em questão. É evidente que existem regras elementares que devem ser seguidas para que seja obtida uma boa qualidade, e até mesmo para que seja reduzido o tempo de secagem (Tomazelli, 1983).

Entre os fatores importantes a serem considerados num método de secagem ao ar livre pode-se citar (Tomazelli, 1980):

- . distância entre pilhas;
- . direção do vento;
- . método de empilhamento;
- . espessura dos separadores, e
- . proteção das pilhas das condições climáticas.

Outro aspecto que merece uma atenção especial no pátio de secagem é o preparo das pilhas, que devem ser organizadas por espécie, dimensões, espessuras, etc, sendo que as bases dessas pilhas devem permitir ventilação e distanciamento do solo (Henriquez, 1986).

Segundo Finighan² citado por Tomazelli (1980); técnicas de melhoramento do método de secagem ao ar livre tem sido investigadas e um aumento na velocidade foi observado com a introdução de modificações na disposição das pilhas, sendo que o empilhamento tipo "espinha de peixe" resultou em uma diminuição no tempo de secagem em 25%.

A secagem ao ar pode ser usada como uma pré-secagem, principalmente para madeiras duras impermeáveis, desde o estado verde até a madeira conter uma umidade próxima de 28%, quando pode resistir a condições de secagem mais rigorosas. Transferindo as pilhas para um secador e usando condições mais rigorosas, é possível alcançar um período de tempo mais curto para a secagem e combinar as vantagens de cada método (Brasil Madeira, 1979).

3.3. Secagem Convencional.

A secagem convencional é a conhecida secagem em estufa, onde são controladas a temperatura e a umidade relativa, e a combinação dessas duas características, associadas a movimentação de ar faz com que a secagem seja processada de forma muito mais rápida. Esse é o melhor método quando são necessárias madeiras secas próximas à umidade de equilíbrio (Galvão & Jankowsky, 1985).

A secagem em secadores convencionais é conduzida em câmara fechada em que o ar circula pela face da madeira, à velocidade de 60 a 120 m/mim. As temperaturas no secador no início do processo variam entre 40°C a 80°C e as temperaturas no final do ciclo, de 65°C a 95°C. Essas temperaturas relativamente altas e a circulação forçada do ar são os principais meios de se acelerar a secagem muito além da secagem ao ar livre. É

² FINIGHAN, R. & LIVERSIDGE, R. M. An examination of some factors affecting the performance of air seasoning yards. Australia, CSIRO. Division of Building Research, 1972. 9p.

necessário, porém, o controle da umidade relativa para que sejam evitados os defeitos associados às contrações (Ponce & Watai, 1985).

A movimentação do ar dentro do secador é obtida por ventiladores e tem por finalidade:

- . misturar o ar (umidade relativa e temperatura) antes da sua passagem pela carga;
- . distribuir calor uniformemente para todo o secador;
- . transferir o calor do aquecedor para a madeira;
- . remover a água de superfície da madeira.

A velocidade do ar é importante nos estágios iniciais da secagem e para altos valores de umidade, decrescendo a sua importância a medida que se aproxima a umidade de equilíbrio.

A circulação do ar é importante porque, conforme o ar em volta da madeira vai absorvendo umidade, este irá perdendo o seu poder de absorção e, se não for substituído, tenderá a um equilíbrio que fará desaparecer o fluxo de transferência da umidade da madeira para o ar (Martins, 1988).

Quando se inicia a retirada da água higroscópica (água abaixo do ponto de saturação de fibras) a rapidez de secagem tende a diminuir, tornando-se menor a influência da velocidade de circulação do ar (Galvão & Jankowsky, 1985).

Galvão & Jankowsky (1985) sugerem que velocidades em torno de 120 m/min são economicamente viáveis, velocidades maiores somente deveriam ser aplicadas para umidades iniciais elevadas (Severo, 1989), devendo ser salientado que, para madeiras impermeáveis, a remoção muito rápida da umidade superficial irá provocar o aparecimento de rachaduras.

A temperatura do ar sendo mais elevada que a do material em secagem, proporcionará um gradiente que permite fornecer energia à água da madeira, favorecendo a sua difusão e evaporação.

Quando a temperatura em um secador aumenta, sem a introdução de vapor d'água, tem-se:

- . redução da umidade relativa, aumentando a rapidez de retirada de água;
- . aumento do coeficiente de difusão da água higroscópica e do vapor d'água;
- . alteração de gradiente de umidade.

Quanto maior a temperatura, maior a velocidade de secagem. No entanto, durante a retirada d'água livre não é necessário utilizar temperaturas elevadas, pois o efeito do aquecimento não aumenta significativamente a taxa de secagem nessa fase. O aumento da temperatura influi na umidade relativa do ar acelerando a difusão, responsável pela retirada da água adsorvida, abaixo de 30% de umidade (Martins, 1988).

A umidade relativa do ar expressa a relação percentual entre a pressão parcial de vapor d'água e a sua pressão de saturação à mesma temperatura. A umidade relativa está diretamente relacionada com a capacidade do ar em receber maior ou menor quantidade d'água e com a remoção da água da superfície da madeira (Galvão & Jankowsky 1985).

O controle da umidade relativa é obtido por:

- . sistema de aquecimento;
- . fornecimento de vapor, através de pulverizadores;
- . admissão de ar seco e frio;
- . eliminação de ar úmido e quente do interior do secador.

Jankowsky (1992) sugere que o controle do processo de secagem deve envolver o controle das condições do meio de secagem, o qual é definido principalmente em função do teor de umidade da madeira. Assim, é necessário a medição de três parâmetros:

- . umidade da madeira;
- . temperatura do ar dentro do secador (temperatura de bulbo seco);
- . umidade relativa do ar no interior do secador.

A orientação do corte interfere na secagem da madeira. O fluxo de umidade no sentido longitudinal é 10 a 15 vezes maior que no transversal (radial ou tangencial) sendo que esse fluxo é de 20 a 50% maior no sentido radial que no tangencial.

O alburno seca mais rápido do que o cerne devido a sua alta permeabilidade, apesar de que o alburno quase sempre tem um teor de umidade mais alto que o do cerne (Martins, 1988).

3.4. Programas de Secagem.

O programa de secagem é uma listagem de temperaturas de bulbo seco e úmido, elaboradas cuidadosamente para que o operador possa usá-la para secar um determinado produto de madeira à uma velocidade satisfatória, sem causar defeitos pronunciados (Ponce & Watai, 1985).

Rasmussen (1961) expõe que no programa de secagem podem ser reconhecidas as seguintes fases:

- . aquecimento do ar e da madeira dentro do secador até a temperatura desejada no início do processo;
- . secagem, usando os parâmetros (umidade relativa e temperatura) previstos no programa, com o objetivo de retirada de água da madeira num mínimo de tempo e defeitos;
- . uniformização, que tem como principal objetivo a redução da variação de umidade que ocorre entre as peças de madeira que constituem a carga.
- . condicionamento, visando primordialmente a eliminação de tensões internas e deformações permanentes nas peças em secagem.

Ao final da fase de secagem, a variação na umidade entre peças pode ser grande, e se deve a diferentes causas, tais como a umidade inicial desuniforme, a escolha incorreta da amostra de controle ou a diferença na qualidade das tábuas secas (Hildebrand, 1970).

De acordo com Pratt (1974) uma amplitude de variação de 2% na umidade ao final da secagem pode ser considerado um bom resultado do ponto de vista prático.

Normalmente a uniformização promove o reumidecimento das camadas externas das peças, tendendo a liberar tensões desenvolvidas no processo. Entretanto, em muitas ocasiões o condicionamento é necessário. O condicionamento pode durar de 4 a 48 horas, dependendo da espécie, espessura das peças e temperaturas usadas (Galvão & Jankowsky, 1985; Rasmussen, 1961).

Basicamente essa operação consiste em elevar significativamente a umidade relativa de forma a ocorrer o reumidecimento das camadas superficiais das peças, suavizando o gradiente de umidade, e aliviando as tensões de secagem.

Quando encerrada a secagem a madeira ainda está quente, sendo necessário promover o seu resfriamento. Geralmente a madeira seca pode ser resfriada fora do secador (protegida da chuva) sem alterar a umidade final desejada.

Porém, quando existe a necessidade de madeira de alta qualidade com distribuição exata de umidade, o resfriamento deve ser feito dentro do secador. A circulação do ar deve ser mantida, o aquecimento deve ser desligado e as saídas de ar devem ser fechadas. Esta condição será mantida até que a temperatura da carga atinja temperatura ambiente (Hildebrand, 1970).

Após a carga de madeira ter sido seca as tensões internas residuais e o teor de umidade final devem ser determinados para que se possa saber se a secagem foi bem conduzida, isto quer dizer, umidades finais compatíveis com a desejada e madeira livre de tensões internas de secagem.

3.5. Desenvolvimento de programas de secagem.

Os principais fatores envolvidos na escolha de um programa de secagem são:

- . espécie de madeira,
- . espessura do material,
- . uso a que o material se destina, e
- . equipamento de secagem.

Para a maioria das espécies usadas comercialmente já existem programas de secagem indicados na literatura (Pratt, 1974; Rasmussen, 1961; Hildebrand, 1970). Além disso, diversas indústrias que fabricam secadores para madeira vêm acumulando programas que são fornecidos junto com seus equipamentos (Martins, 1988). Porém, devido as grandes variações nas características da madeira, nas condições do secador, na qualidade da secagem requerida e nas considerações de custo, não existe um programa que possa ser considerado ideal para todas as espécies de madeiras (Ponce & Watai, 1985).

Henriquez (1986) e Brandão (1989) comentam que a maioria dos programas de secagem para madeiras não sofreram modificações ou aperfeiçoamento desde a sua idealização, usando padrões conservadores, podendo citar como exemplo os programas temperatura/umidade desenvolvidos pelo Forest Products Laboratory em Madison - Wisconsin.

Alguns autores dedicaram-se ao estudo de outros parâmetros para que possam ser aprimorados os programas de secagem já existentes.

O desenvolvimento de novos programas foi recomendado pelo grupo de trabalho de secagem de madeiras (Wood Drying Working Party - IUFRO) em 1983. O método tradicional (tentativa e erro) para o desenvolvimento de programas é lento, e, um método rápido para prever as

características de secagem da madeira, selecionar programas ou prever a severidade dos defeitos de secagem tem sido pesquisados em diversas instituições (Brandão & Jankowsky, 1992).

Buscando definir uma metodologia de fácil operacionalidade para a elaboração de programas de secagem de madeiras, Terazawa³, citado por Brandão (1989) desenvolveu um estudo relacionando a ocorrência de alguns defeitos como rachaduras e colapso em diferentes graus, decorrentes de uma secagem a 100° C, com a temperatura inicial e final do programa de secagem e a diferença entre a temperatura de bulbo seco e úmido para diferentes tipos de madeiras.

Os resultados obtidos por Brandão (1989), posteriormente divulgados por Brandão e Jankowsky (1992), mostram que a proposta de Terazawa pode ser utilizada para prever o comportamento de uma dada madeira quando submetida a um processo de secagem convencional. A taxa de secagem e a rachadura de topo foram as variáveis de maior importância para elaboração dos programas de secagem.

Os trabalhos desenvolvidos no laboratório de secagem de madeiras da ESALQ/USP (Jankowsky, 1997) permitiram aprimorar essa metodologia, definindo os defeitos e características de secagem que mais interferem na elaboração dos programas - tempo de secagem, velocidade de secagem e rachaduras de topo - bem como a elaboração de equações para a estimativa dos parâmetros de secagem - temperaturas inicial e final e potencial de secagem.

³ TERAZAWA, S. Methods for easy determination of kiln drying schedule of wood. Wood Industry, 20(5), 1965.

3.6. Defeitos de Secagem.

Os defeitos que ocorrem na madeira durante a secagem causam significativos prejuízos para quem seca madeira e desestimula o uso de determinadas espécies susceptíveis a esses defeitos, contribuindo para a exploração seletiva (Martins, 1988).

O ato de secar a madeira envolve a sua contração, em razão da eliminação de sua umidade, o que poderá resultar em graves defeitos na madeira, diminuindo grandemente o seu valor econômico (Gomide, 1973).

Henriquez (1986) resume a discussão apresentada por Galvão & Jankowsky (1985), afirmando que os empenamentos são decorrentes de retrações diferenciadas que podem ocorrer nas peças submetidas à secagem, podendo ser causadas pela anisotropia da madeira ou então as diferenças entre cerne e alburno, lenho inicial e tardio ou madeira juvenil e adulta.

De acordo com vários autores (Rasmussen, 1961, Pratt, 1974, Ponce & Watai, 1985, Gomide, 1973 e Galvão & Jankowsky, 1985) os empenamentos são classificados como a diferença nas contrações radial e tangencial, como consequência da irregularidade da grã ou então devido as tensões de crescimento da árvore. Os autores agrupam os empenamentos em longitudinal, canoa e torcido. Definindo o empenamento longitudinal como sendo uma curvatura da peça no eixo em questão, podendo ocorrer devido as diferenças de retração nas faces da peça quando uma delas sofre mais secagem que a outra.

A Figura 1 ilustra os principais defeitos passíveis de ocorrerem durante a secagem da madeiras.

Figura 1. Defeitos de secagem (Pratt, 1974).

O encanoamento pode ocorrer principalmente em duas ocasiões; i) secagem mais rápida de uma face ou ii) uma face se contrai mais que a outra, mesmo com secagem uniforme, em razão do plano em que foi feito o corte da peça de madeira, o radial ou tangencial

As causas do empenamento torcido podem ser as mesmas já mencionadas no encanoamento, podendo também ser causado pela combinação de diferentes contrações e desvios de grã, como disposição espiralada das fibras, o que é característico de certas espécies de eucaliptos.

Martins (1988) cita a existência de cinco formas de empenamentos: encanoamento, torcimento, encurvamento (empenamento longitudinal), arqueamento e forma de diamante. As três primeiras formas já foram discutidas. O arqueamento é causado pela diferença na contração longitudinal entre laterais, da mesma peça de madeira. Neste tipo de empeno, a madeira da parte mais central da tora se contrai mais longitudinalmente do que a madeira da parte externa. A forma diamante é características de peças com secção quadrada. É resultante da diferença entre as contrações tangencial e radial, quando os anéis de crescimento vão, diagonalmente, de um canto ao outro da secção.

As rachaduras são outro tipo de defeito comumente evidenciados durante o processo de secagem, podendo ser localizadas basicamente no topo e na superfície das peças.

Quando uma peça de madeira é submetida a secagem e as camadas superficiais secam a um teor de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras, apesar da madeira interna estar acima deste ponto, a porção exterior fica submetida a esforços de tensão, uma vez que o interior da peça restringe a contração da superfície. Se os esforços originados excederem à resistência da madeira haverá o aparecimento de fendas ou rachaduras nas superfícies e extremidades da peça de madeira (Gomide, 1973).

As rachaduras de superfície podem aparecer quando as condições de secagem são muito severas, isto é, baixas umidades relativas provocando a rápida secagem das camadas superficiais, enquanto as camadas internas estão com mais de 30% de umidade.

As rachaduras de topo aparecem, geralmente, nos raios que são constituídos por células parenquimáticas de reduzida resistência mecânica, e são causadas devido à secagem rápida dessas partes em relação ao restante da tábua. Os extremos começam a contrair rapidamente e como o restante da peça não acompanha, ocorrem as rachaduras de topo que, em casos mais sérios, podem transformar-se em verdadeiras fendas causando grandes perdas de madeira (Martins, 1988).

O colapso pode ser caracterizado por ondulações nas superfícies da peça de madeira, sendo basicamente ocasionado por forças geradas durante a movimentação da água capilar, as quais deformam as células.

Contrações normais envolvem apenas movimentações na espessura da parede da célula, relacionadas com a retirada da água adsorvida. No colapso ocorrem distorções na cavidade das células, sendo o achatamento das fibras evidenciado (Ellwood, 1962). O colapso surge quando a tensão desenvolvida durante a saída de água capilar supera a resistência da madeira à compressão.

Generalizando, os fatores responsáveis pelo colapso durante a secagem são (Siau, 1971):

- . pequeno diâmetro dos capilares e tamanho das pontoações. Pequena abertura das pontoações promove baixa permeabilidade e alta tensão capilar;
- . altas temperaturas no início da secagem que diminuem a resistência das células;
- . densidade da madeira; (baixa densidade significa parede celular com espessura e resistência mecânica reduzidas)
- . alta tensão superficial do líquido que é removido da madeira, causando alta tensão capilar.

Para Kauman⁴, citado por Rozas & Tomaselli (1993) a umidade relativa do ambiente de secagem e o formato da madeira são de importância secundária na ocorrência de colapso. Portanto, as madeiras susceptíveis a colapsar não devem ser expostas a temperaturas superiores a 40°C até alcançar umidade de 30% no centro das tábuas e 25% em média. A razão de limitar a temperatura baseia-se no fato que esta intensifica o colapso por degradação térmica, limitando sua recuperação.

Muitas madeiras de eucaliptos, que foram estudadas na Austrália, são propensas a colapsar durante o início da secagem até o ponto de saturação das fibras. Tradicionalmente o colapso pode ser recuperado através do recondicionamento com vapor, entretanto o colapso frequentemente induz rachaduras de superfície e internas que são irreversíveis dependendo da intensidade (Innes, 1996).

Pode-se considerar que o comportamento da madeira para colapso varia entre espécies, entre diferentes árvores da mesma espécie e também entre tábuas cortadas de uma mesma árvore (Ellwood, 1962).

O encruamento pode ser definido como uma condição existente na madeira resultante do stress de secagem, causado basicamente por uma secagem muito rápida ou desuniforme. McMillen⁵ citado por Galvão & Jankowsky (1985) define o encruamento como sendo uma condição de tensão e deformação permanente na madeira, na qual as fibras externas estão sob compressão e as internas sob tração, quando a madeira está uniformemente seca.

⁴ KAUMAN, W.G. Cell collapse in wood. CSIRO, Division of Forest Products, DFP Reprint NS66, 1964.

⁵ McMILLEN, J. M. Drying stresses in red oak: effect of temperature. **Forest Products Journal**, Madison, 5(8):230-41, 1955.

3.7. Secagem da Madeira de *Eucalyptus*.

A madeira de eucalipto é usada como madeira serrada em vários países: Austrália, África do Sul, Chile, Uruguai e Argentina. No Brasil, o uso dessa espécie como madeira serrada é ainda bastante incipiente.

O eucalipto apresenta algumas características que realmente dificultam seu aproveitamento. Essas dificuldades não são, todavia, maiores do que as apresentadas por diversas espécies tropicais. Introduzido no país para a produção de lenha para alimentar locomotivas, carrega até hoje o estigma de madeira de baixa qualidade, que racha demasiadamente e não deve ser usada como madeira serrada (Ponce, 1994).

O estoque disponível de madeira de eucalipto vem aumentando em diversos países, principalmente no hemisfério sul. Por se tratar, na grande maioria, de matéria-prima proveniente de plantações de ciclo curto, tem-se como principal obstáculo a necessidade de secar material jovem e propenso a apresentar sérios defeitos durante a secagem (Jankowsky, 1995).

Alguns defeitos são toleráveis no material para muitos usos finais e o objetivo de uma boa prática de secagem deve ser a limitação dos defeitos a um nível aceitável no produto pretendido. Defeitos inevitáveis em algumas espécies podem impedir sua utilização para algum fim (Campbell & Hartley, 1978).

Brennan et al⁶. citado por Neumann (1990) mostra que muitas madeiras de folhosas de baixa permeabilidade, como os eucaliptos, são propensos a rachar durante o início da secagem, e devido a esse fato, tradicionalmente seca-se essa madeira ao ar ou em grandes galpões protegidos do meio ambiente.

⁶ BRENNAN, L. J.; FRICKE, K. W.; KAUMAN, W. G.; WRIGHT, G. W. Predrying in Australia. *The Australian Timber Journal*. V. 32, n.11. 1966. 360-366p

Por existir a necessidade em secar-se madeira de eucaliptos jovens, tem-se árvores de menor diâmetro, que inevitavelmente produz uma fração considerável de madeira tangencial, que é bastante propensa a rachar (Neumann, 1989).

Madeira de eucalipto geralmente seca devagar. Características típicas são o colapso, alta contração, gradiente de umidade, superfícies rachadas, associadas à pronunciadas tensões de crescimento. Algumas espécies de eucaliptos possuem densidade básica entre 500 - 800 kg/m³ e são relativamente impermeáveis e difíceis de serem secas (Vermaas, 1995).

Nos eucaliptos, em geral, parece haver mais tendência a colapso nas espécies de média densidade e menor tendência naquelas de baixa ou alta densidades (Ponce, 1994). O mesmo autor encontrou em madeira serrada de *E. grandis* diferenças de intensidade de colapso entre procedências, clones e diferentes florestas da mesma espécie.

Campbell & Hartley⁷ citados por Vermaas (1995) citam a similaridade no desenvolvimento de defeitos em madeiras jovens e adultas. Espécies com baixa densidade geralmente colapsam mais do que espécies com altas densidades, sendo o colapso mais presente em madeiras jovens.

Os experimentos realizados com madeiras de eucalipto, tem confirmado a técnica ou tratamento que permite "recuperar" a madeira colapsada através da vaporização, que é tradicionalmente usada para esterilizar a madeira e aliviar as tensões de secagem (Cavalcante, 1991).

Cavalcante (1991) estudando a ocorrência de colapso na secagem da madeira de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis* concluiu que a temperatura de secagem é um fator decisivo no aparecimento do colapso, uma vez que os maiores índices apareceram com o aumento da temperatura.

⁷ CAMPBELL, G. S.; HARTLEY, J. Drying and dried wood. Chapter 16 in: *Eucalyptus for Wood Production*. Hilis, W. E. and Brown, A. G. (ed) CSIRO, Austrália. 1978.

Jankowsky & Cavalcante (1992) concluíram que *E. grandis* foi menos susceptível ao colapso do que o *E. saligna* e que o colapso pode ser parcialmente recuperado através de condicionamento com alta temperatura e umidade relativa.

Vermaas & Neville (1988) estudando o comportamento da madeira de *Eucalyptus grandis* concluíram que, devido a madeira possuir um crescimento extremamente rápido, caracteriza-se por possuir altos níveis de tensões de crescimento, mostrando resultados severos em termos de rachaduras durante o desdobro e principalmente após a secagem. Os mesmos autores, testando diferentes níveis de temperatura para o início da secagem certificaram a tendência que a madeira apresenta em aumentar o colapso quando ocorre o aumento da temperatura.

Alexiou et al. (1990) estudando *E. pilularis* demonstraram que a taxa de secagem aumenta significativamente (7-16%) em madeira de cerne, como consequência de alterações no conteúdo e disposição dos extrativos. Observou também uma redução no gradiente de umidade e das tensões de secagem, sendo a vaporização mais efetiva nos primeiros 8 dias de secagem.

Segundo Chafe (1990) a pré vaporização da madeira de *E. regnans* por 30 minutos reduz a variação dimensional da madeira e permite melhorar os níveis de recuperação do colapso.

Na secagem, quando ocorre a retirada de água acima do ponto de saturação das fibras, a madeira de eucalipto mostra uma tendência a aumentar o nível de rachaduras e colapso quando são utilizadas temperaturas altas. A secagem em secadores, de tábuas com 25 mm ou mais de espessura, deve utilizar uma temperatura que não exceda 45°C durante os primeiros estágios e a umidade relativa deve ser mantida alta, caso contrário rachaduras internas e de superfície podem ser desenvolvidas (Vermaas, 1995).

Durante a secagem podem surgir vários tipos de empenamentos. Em algumas espécies de eucalipto é comum o encanoamento, devido a grande diferença entre a contração radial e tangencial, o que pode ser contornado através do empilhamento adequado (Ponce, 1995).

Segundo Kauman⁸ citado por Brandão (1989) a intensidade de colapso, em diferentes espécies do mesmo gênero é muito variável. Em *Eucalyptus marginata* o colapso é insignificante, em *Eucalyptus globulus* apresenta-se severo. Northway (1996) cita que na Austrália *E. grandis* não é considerado como propenso ao colapso, mas sim susceptível à rachaduras de superfície, sendo o *E. globulus* bastante propenso ao colapso.

Eucalyptus pilularis, *E. grandis* e *E. saligna* são espécies que possuem colapso quando jovens, porém raramente ocorre em árvores adultas. *Eucalyptus maculata* jovem, com pequenos diâmetros, quando submetido a secagem demonstrou colapso pouco significativo, e esta característica aplica-se para outras espécies de alta densidade, como *Eucalyptus cloeziana*. A baixa densidade e maior permeabilidade do material jovem indica que poderia ser mais fácil a secagem quando comparada com madeira adulta (Campbell & Hartley, 1978).

Estudando *Eucalyptus regnans* com 37 anos de idade, Campbell & Hartley (1978) secaram tábuas com 25, 38 e 50 mm de espessura ao ar até 16%-18% de umidade e foi posteriormente condicionada por 6-8 h em um secador convencional. Pequenas rachaduras de superfície ocorreram na madeira, sendo produzido material de boa qualidade, comprovando a importância em se aplicar o condicionamento para a madeira de eucalipto, quer seja ela adulta ou jovem.

Os mesmos autores citam que colapsos irreversíveis e severos ocorrem com associação de rachaduras em uma zona próxima a

⁸ KAUMAN, W.G. Cell collapse in wood. CSIRO, Division of Forest Products, DFP Reprint NS66, 1964.

medula em *Eucalyptus pilularis*, podendo também ocorrer em outras espécies. Essa área de medula deve ser excluída de qualquer produção de madeira sólida.

Northway (1996) recomenda para eucaliptos, a secagem ao ar com proteção da chuva durante as 2 ou 4 primeiras semanas, associado a uma secagem convencional quando a madeira atingir 40-50%. As condições iniciais de secagem devem ser suaves com umidade relativa próxima de 90% e velocidade do ar baixa (menor que 0,5 m/s). O condicionamento deve ser aplicado após a uniformização para diminuição das tensões.

As características da secagem, em relação ao comportamento e defeitos na madeira, podem variar de acordo com a espécie, maturidade da árvore, posição da árvore, a espessura, largura e direção do corte da madeira serrada, bem como fatores ambientais, de sítio, melhoramento genético, clima e latitude (Campbell & Hartley, 1978).

3.8. Aspectos silviculturais do *E. grandis* e *E. urophylla*.

O gênero *Eucalyptus* ocorre naturalmente na Austrália e em algumas ilhas da Indonésia. Estão descritas mais de 600 espécies, variedades e híbridos, desde arbustos até árvores gigantescas.

As primeiras amostras deste gênero foram identificadas em 1770, a primeira descrição foi publicada em 1789, e a partir de 1880 o eucalipto passou a ser plantado por todo o mundo. No Brasil, o eucalipto foi introduzido em 1904 pelo engenheiro Navarro de Andrade (Barrichelo & Brito, 1976).

O Brasil é um país que possui vasta área de florestas homogêneas de eucalipto. As indústrias florestais brasileiras reflorestaram com eucalipto cerca de 3.600.000 hectares até o ano de 1992 (ANFPC, 1993).

O programa brasileiro de reflorestamento com espécies de folhosas, esteve até o ano de 1983, sendo feito quase que totalmente com espécies de eucaliptos, sendo utilizadas predominantemente o *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus urophylla* em menor proporção.

Dentre os três, o *E. urophylla* teve sua importância realçada por apresentar maior rusticidade, incrementos volumétricos anuais satisfatórios e boa resistência ao cancro do eucalipto causado pelo *Cryphomectria cubensis* (Bruner) (Brasil, 1983).

E. urophylla pertence à florestas abertas altas, com boa forma, forte dominância apical e presença de lignotubérculo, podendo exceder 50 m em sítios favoráveis. Não encontrada naturalmente na Austrália. Ocorre no Timor e em outras ilhas da Indonésia. Presente em altitudes de 300 a 3.000 m e onde o nível pluviométrico varia de 1.000 a 2.000 mm/ano. (Boland et al, 1994).

Esta espécie foi introduzida no Brasil em 1919 com o nome de *E. alba*, e progênies foram usadas para estabelecer grandes áreas no Brasil e em outros países. Mostra-se promissora em países onde o clima é tropical ou subtropical com níveis pluviométricos maiores que 1.000 mm/ano (Boland et al, 1994).

Brasil (1983) obteve 0,448 g/cm³ para valores médios de densidade básica de *E. urophylla* proveniente de Linhares, ES. Barrichelo & Brito, 1976 obtiveram uma densidade básica de 0,532 - 0,555 g/cm³ para a mesma espécie com 5 anos de idade e 0,575 g/cm³ com 7 anos. Ferreira, 1992 caracterizou a densidade básica do *E. urophylla* como sendo média, com valor de 0,50 g/cm³.

Já o *Eucalyptus grandis* ocorre naturalmente em florestas altas ou muito altas com 45 - 55 m de altura. A forma é geralmente excelente, a casca é lisa, com a copa sendo 2/3 do total da altura. A maior área de ocorrência natural está ao redor de Newcastle em New South Wales e em

Queensland, na Austrália. A altitude varia do nível do mar até 600 m na sua maior distribuição. O clima é quente e úmido, com temperaturas médias máximas de 27°C e mínimas de 6°C. A média anual pluviométrica varia de 1.000 a 3.500 mm/ano (Boland et al, 1994).

A madeira de *E. grandis* tem coloração rosa claro no alburno e vermelho claro no cerne. Possui textura áspera, apresentando veios, a grã é reta. É resistente ao ataque do inseto *Lyctus borers* sendo moderadamente durável.

A densidade básica média está em torno de 0.70 a 0.80 g/cm³ para amostras provenientes de áreas de ocorrência natural (Boland, 1994). Ferreira (1992) classificou a densidade básica do *E. grandis* como sendo média, obtendo um valor que varia de 0,40 a 0,50 g/cm³. Barrichelo & Brito (1976) obtiveram a densidade básica de 0,407 - 0,470 g/cm³ para *E. grandis* com 5 anos de idade, e 0,435 - 0,574 g/cm³ para a idade de 16 anos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Madeira.

No presente trabalho foi utilizada madeira de duas espécies do gênero *Eucalyptus*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, selecionadas em função da disponibilidade em obter-se o material, bem como na representatividade do plantio feito com essas espécies no país.

A madeira foi fornecida pela empresa WOOD Reflorestamento S/A, localizada em Ribeirão Preto - SP, na forma de tábuas comerciais, com 2.5 cm x 300 cm x largura variável de 10 a 20 cm. O material foi proveniente de uma floresta plantada em 1980, na cidade de Ribas do Rio Pardo - MS, em uma área pertencente à Companhia Nestlé Indústria e Comércio Ltda.

O *Eucalyptus urophylla* com procedência de Camaquã - SP, foi plantado em espaçamento 3.0m x 2.0 m, possuindo 609 árvores/ha, e volume médio com casca de 219,2 m³/ha.

O *Eucalyptus grandis* com procedência de Mogi-Guaçu - SP, foi plantado em espaçamento 3.0 m x 2.0 m, possuindo 849 árvores/ha e volume médio com casca de 277,5 m³/ha.

4.2. Preparo do material.

Para determinação do programa de secagem, foram utilizadas 5 tábuas de cada espécie. De cada tábua foram retiradas 5 amostras nas dimensões 1,0 cm x 5,0 cm x 10,0 cm, destinadas ao ensaio para indicação do programa de secagem, e 10 amostras nas dimensões 1,0 cm x 5,0 cm x 5,0 cm para as estimativas da umidade inicial e da densidade básica. O esquema de amostragem é ilustrado na Figura 2.

Figura 2. Esquema demonstrativo da retirada de amostras para determinação do programa de secagem.

A umidade inicial foi calculada pela equação:

$$U_i = \frac{m_i}{m_s} - 1 \cdot 100, \quad \text{onde:} \quad (1)$$

U_i = umidade inicial (%)

m_i = massa inicial da amostra (g)

m_s = massa seca da amostra (g)

Para o cálculo da densidade básica foi usado o método da balança hidrostática, conforme descrito por Barrichelo (1983) sendo expressa pela seguinte equação:

$$Db = \frac{m_s}{m_u - m_i} \cdot 100 \quad (2)$$

Db = densidade básica (g/cm³)

m_u = massa úmida da amostra (g)

m_s = massa seca da amostra (g)

m_i = massa imersa da amostra saturada em água (g)

Para a secagem convencional em laboratório foram utilizadas 8 tábuas de cada espécie, retirando-se 3 amostras de 2,5 cm x 15,0 cm x 50,0 cm por tábua. De cada amostra foram retiradas 2 sub-amostras nas dimensões 2,5 cm x 15,0 cm x 5,0 cm (Figura 3) destinadas ao cálculo de umidade inicial e densidade básica, usando como base de cálculo as equações 1 e 2.

Todas as amostras foram impermeabilizadas nos topos com Mobilcer M, (parafina emulsionável), visando restringir a perda de umidade pelos topos.

Para a secagem ao ar foram montadas duas pilhas de cada espécie, uma em local coberto e outra exposta ao ar (para posterior aspersão intermitente de água). Cada pilha tinha 1,0 m x 1,0 m x 3,0 m, com a dimensão maior correspondendo ao comprimento das tábuas.

Para o empilhamento foram usados separadores com 2,5 cm de espessura.

Figura 3. Esquema demonstrativo da retirada de amostras para secagem convencional.

4.3. Ensaios.

O desenvolvimento do trabalho envolveu os ensaios para a determinação do programa de secagem, a secagem convencional da madeira em secador de laboratório e a secagem ao ar em local coberto sem aspersão e em local aberto com aspersão de água.

4.3.1. Determinação do programa de secagem.

A determinação do programa de secagem foi feita usando-se como base teórica a proposta de Terazawa, citado por Brandão (1989) e modificada pelo laboratório de secagem de madeiras da ESALQ/USP (Jankowsky, 1997). A hipótese fundamental é de que pequenas amostras de madeira quando submetidas a uma secagem drástica em estufa a 100° C irão apresentar defeitos em níveis proporcionais aos que ocorreriam durante a secagem industrial.

As características da madeira, bem como os defeitos avaliados neste ensaio estão relacionados na Tabela 1.

Tabela 1. Variáveis do ensaio a 100°C.

VARIÁVEL	DESCRIÇÃO	FAIXA UMIDADE	UNIDADE
Ui	Umidade inicial	Verde	%
T1	Tempo de secagem	Ui a 5%	h
T2	Tempo de secagem	Ui a 30%	h
T3	Tempo de secagem	30% a 5%	h
V1	Velocidade de secagem	Ui a 5%	g/cm ² .h
V2	Velocidade de secagem	Ui a 30%	g/cm ² .h
V3	Velocidade de secagem	30% a 5%	g/cm ² .h
R1	Rachaduras de topo	Ui a 5%	adimensional
R2	Rachaduras de topo	Ui a 30%	adimensional
R3	Rachaduras de topo	30% a 5%	adimensional
C	Intensidade de Colapso	Ui a 5 %	adimensional

Para o cálculo das velocidades de secagem foram usadas as seguintes equações:

a) Velocidade de secagem até 5% de umidade.

$$V_1 = \frac{m_v - m_5}{T_1 \cdot 100}, \quad \text{onde:} \quad (3)$$

V_1 = Velocidade de secagem até 5% de umidade (g/cm².hora)
 m_v = Massa da amostra úmida (umidade inicial) (g)
 m_5 = Massa da amostra a 5% de umidade (g)
 T_1 = Tempo de secagem da umidade inicial até 5% (h)
 100 = Área superficial da amostra (cm²)

b) Velocidade de secagem até 30% de umidade.

$$V_2 = \frac{m_v - m_{30}}{T_2 \cdot 100}, \quad \text{onde:} \quad (4)$$

V_2 = Velocidade de secagem até 30% de umidade (g/cm².hora)
 m_v = Massa da amostra úmida (umidade inicial) (g)
 m_{30} = Massa da amostra a 30 % de umidade (g)
 T_2 = Tempo de secagem a 30% de umidade (h)
 100 = Área superficial da amostra (cm²)

c) Velocidade de secagem de 30 - 5% de umidade.

$$V_3 = \frac{m_{30} - m_5}{T_3 \cdot 100}, \quad \text{onde:} \quad (5)$$

V_3 = Velocidade de secagem de 30 - 5% de umidade (g/cm².hora)
 m_{30} = Massa da amostra a 30 % de umidade (g)
 m_5 = Massa da amostra a 5 % de umidade (g)
 T_3 = Tempo de secagem de 30 - 5% de umidade (h)
 100 = Área superficial da amostra (cm²)

A avaliação dos defeitos - rachaduras de topo e superfície - da secagem drástica foram feitos periodicamente de 2 em 2 horas, durante as 12 primeiras horas de ensaio. Após esse período, a avaliação foi realizada de 3 em 3 horas, até as amostras atingirem 5% de umidade, sendo os mesmos

quantificados com o auxílio de lâminas calibradoras graduadas de 0,05 mm a 1,0 mm para a medição da largura e paquímetro para a medição do comprimento, considerando sempre a maior intensidade de ocorrência dos defeitos. A Tabela 2 mostra as notas atribuídas para a classificação dos defeitos das amostras.

Tabela 2. Escore atribuído aos defeitos de secagem.

ESCORE	RACHADURA DE TOPO	RACHADURA DE SUPERFÍCIE	RACHADURA INTERNA	COLAPSO
NOTA 1	AUSENTE	AUSENTE	AUSENTE	AUSENTE
NOTA 2	CR < 5,0 e LR < 0,5	CR < 25 e LR < 0,25	CR < 2,5 e LR < 0,5	e < 0,25
NOTA 3	CR > 5,0 e LR < 0,5	CR < 50 e LR < 0,5	CR > 2,5 e LR < 0,5	0,25 > e < 0,5
NOTA 4	CR < 5,0 e 0,5 > LR > 1,0	CR < 75 e LR < 1,0	CR > 2,5 e LR > 0,5	0,5 > e < 1,0
NOTA 5	CR > 5,0 e 0,5 > LR < 1,0	CR > 75 e LR > 1,0	-	e > 1,0
NOTA 6	CR > 5,0 e LR > 1,0	-	-	-

CR = Comprimento da rachadura (mm)

LR = Largura da rachadura (mm)

e = Espessura da amostra (mm)

Durante o ensaio foi acompanhada a perda de massa de água das amostras através da pesagem em balança eletrônica com precisão de 0,01 g. Os cálculos foram feitos com base na equação:

$$U_c = \frac{m_c(U_i + 100)}{m_i} - 100, \quad \text{onde:} \quad (6)$$

U_c = umidade da amostra em instante qualquer (%)

m_c = massa da amostra no mesmo instante (g)

* U_i = umidade inicial da amostra (%)

m_i = massa inicial da amostra (g)

* O teor de umidade inicial foi determinado através da equação 1.

O valor médio das variáveis listadas na Tabela 1 foram aplicados nas equações da Tabela 3, definindo-se dessa forma os principais parâmetros dos programas de secagem, temperatura inicial (TI), temperatura final (TF) e potencial de secagem (PS).

Tabela 3. Equações para a estimativa dos parâmetros de secagem.

PARÂMETRO	EQUAÇÃO				
Ti =	27,9049 +	0,7881 T2 +	419,0254 V1 +	1,9483 R2	
Tf =	49,2292 +	1,1834 T2 +	273,8685 V2 +	1,0754 R1	
PS =	1,4586 -	30,4418 V2 +	42,9653 V1 +	0,1424 R3	

O procedimento acima permitiu indicar, para cada espécie estudada, o programa para a secagem convencional.

4.3.2. Secagem convencional.

Para testar a validade dos programas de secagem previamente determinados, foi feita a secagem de uma carga de cada espécie, usando-se um secador Hildebrand modelo HD 4004, com capacidade para 0,1 m³ de madeira e controle semi-automático.

O acompanhamento da secagem foi feito com duas amostras por perda de massa e cinco amostras por resistência elétrica (medidor de umidade), seguindo-se as recomendações de Galvão & Jankowsky (1985), incluindo as etapas de uniformização e condicionamento.

A qualidade da madeira foi avaliada através da intensidade de defeitos, da variação no teor de umidade e da presença de tensões residuais de secagem.

Para a avaliação das tensões decorrentes da secagem utilizou-se da metodologia do "teste de tensões" conforme descrito em Rasmussen (1961), Pratt (1974) e Galvão & Jankowsky (1985) entre outros autores. Esta metodologia permite a determinação do teor de umidade média, a distribuição da umidade na peça e a verificação das tensões internas.

A Figura 4 mostra a retirada dos corpos de prova para efetuar os testes de tensão. Os três corpos de prova aparecem identificados com as letras A, B e C. A amostra A destina-se à verificação do teor final de umidade, a amostra B verifica a sua distribuição e a amostra C foi usada para verificar as tensões internas (endurecimento superficial) que surgem durante a secagem, sendo preparada através do "teste do garfo".

Figura 4. Esquema demonstrativo para a retirada dos corpos de prova para os testes de tensões.

A intensidade das tensões de secagem foi avaliada de acordo com metodologia descrita por Pratt (1974) e está ilustrada na Figura 5.

Figura 5. Metodologia para avaliar os teste de tensões (Pratt, 1974).

Para a qualificação final da madeira seca foram quantificados os defeitos existentes, (empenamento longitudinal e torcido, encanoamento, rachaduras de topo e superfície, colapso e presença de medula), conforme os critérios descritos na tabela 4, de acordo com IBDF (1988).

Tabela 4. Critérios para classificação de defeitos de secagem. Fonte: IBDF (1988).

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

4.3.3. Secagem ao ar.

Foram estudadas 2 formas de secagem ao ar:

- secagem ao ar em local coberto (Figura 6);
- secagem ar em local aberto com aspersão intermitente de água (Figura 7).

Figura 6. Secagem ao ar em local coberto.

Figura 7. Secagem ao ar em local aberto com aspersão de água.

As aspersões, com objetivo de suavizar a secagem superficial e evitar gradientes de umidades acentuados, foram realizadas duas vezes ao dia, pela manhã e à tarde, por um período de 25 minutos, proporcionando no final do dia a umidificação equivalente a 10 mm de pluviosidade.

O acompanhamento da perda de umidade, em cada uma das pilhas, foi feito com quatro amostras por perda de massa (localizadas nas laterais) e sete amostras por resistência elétrica (localizadas nas laterais e na parte central d pilha), seguindo metodologia tradicional descrita na literatura (Hildebrand, 1970; Pratt 1974; Galvão & Jankowsky, 1985).

O posicionamento das amostras na pilha é esquematizado na Figura 8.

Figura 8. Perfil do posicionamento das amostras de controle nas pilhas de secagem ao ar.

A qualidade da madeira submetida a secagem foi avaliada no momento da montagem das pilhas, aos 10, 20, 30 dias de secagem e quando as amostras de controle atingiram a umidade de equilíbrio (considerado como o final do ensaio).

Foram avaliadas rachaduras de topo, bem como empenamento longitudinal (encurvamento) e torcido, encanoamento, colapso e porcentagem de medula, conforme metodologia citada por Zenid, (1996) que sugere as seguintes equações para a quantificação das rachaduras e empenamento longitudinal.

$$R = \frac{L_2 + L_3}{L_1}, \quad \text{onde:} \quad (7)$$

R = Rachaduras (mm/m)

L₁ = Comprimento total da peça (m)

L₂ e L₃ = Comprimento das rachaduras de superfície (mm)

$$E = \frac{H_e}{L_1}, \quad \text{onde:} \quad (8)$$

E = Encurvamento (mm/m)

H_e = Altura do encurvamento (mm)

L₁ = Comprimento real da peça (m)

O encanoamento e o empenamento foram avaliados em relação ao valor fixo especificado na norma de classificação, onde a maior flecha em mm deverá ser o valor da distorção.

O colapso foi quantificado como ausente ou presente.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Densidade Básica.

A densidade média encontrada para a espécie *E. grandis* foi de 0.57 g/cm³ e para o *E. urophylla* foi de 0.61 g/cm³.

Confrontando os valores obtidos com os dados de literatura percebe-se que os valores são considerados médios para as espécies. Vale ressaltar que a densidade está sujeita a variações que dependem tanto de aspectos genéticos como de sítio e silviculturais.

5.2. Seleção do programa de secagem.

O valor das variáveis usadas para o cálculo da temperatura inicial, final e potencial de secagem para as duas espécies estudadas são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5. Valores médios obtidos para *E. grandis* e *E. urophylla* das variáveis para ensaio a 100°C

VARIÁVEL	UNIDADE	<i>E. grandis</i>		<i>E. urophylla</i>	
		Média	Max - Min	Média	Max - Min
Tempo total	h	13	-	13	-
U _i	%	80,9	107,7-57,7	61,4	75,6-41,6
T1	h	12,01	12,91-10,03	10,42	12,89-5,96
T2	h	4,17	6,10-2,06	2,58	3,64-1,01
T3	h	8,76	10,97-6,26	8,23	11,78-6,06
V2	g/cm ² .h	0,035	0,039-0,034	0,043	0,046-0,040
V3	g/cm ² .h	0,0079	0,0088-0,0064	0,0103	0,0123-0,009
V1	g/cm ² .h	0,0173	0,0201-0,0159	0,0191	0,0237-0,0143
R2	Adimensional	1,04	1 a 2	1,20	1 a 2
R3	Adimensional	1,00	-	1,12	1 a 2
R1	Adimensional	1,04	1 a 2	1,20	1 a 2
C	Adimensional	4,76	3 a 5	3,48	2 a 5

Os resultados obtidos no ensaio a 100°C permitem dizer, em primeira análise, que o *E. urophylla* apresentou valores para as variáveis de secagem que indicam uma secagem mais rápida e com maiores índices de rachaduras de topo, quando comparada com os valores para *E. grandis*, uma vez que o tempo de secagem foi mais baixo e as velocidades em diferentes umidades foram mais altas.

Em relação as rachaduras de topo o *E. grandis* obteve um menor índice, não apresentando rachaduras de topo até a umidade de 30%. A propensão ao colapso mostrou-se alta para as duas espécies.

Os valores das variáveis listadas na Tabela 5 foram aplicados nas equações da Tabela 3, definindo-se os principais parâmetros do programa de secagem que são temperatura inicial (TI), temperatura final (TF) e potencial de secagem (PS).

Tabela 6. Valores dos parâmetros para a seleção do programa de secagem.

PARÂMETROS	<i>E. grandis</i>	<i>E. urophylla</i>
TI (°C)	40,5	40,3
TF (°C)	64,9	65,5
PS	2,10	2,11

Mesmo com a diferença nas velocidades e tempo de secagem entre as duas espécies no ensaio a 100°C, ao observar a Tabela 6, percebe-se a semelhança nos valores obtidos para os parâmetros nas duas espécies, sendo dessa forma viável o uso do mesmo programa de secagem para o *E. grandis* e *E. urophylla*, apresentado na Tabela 7.

Tabela 7. Programa proposto para a secagem para *E. grandis* e *E. urophylla*.

UMIDADE (%)	TS (°C)	TU (°C)	UR (°C)	UE (°C)	PS
Aquecimento	40.0	39.0	94	21.6	-
até 35	40.0	38.0	88	18.3	-
35	40.0	37.5	85	17.0	2.05
30	40.0	36.5	80	15.1	1.99
28	42.0	38.0	77	14.0	2.00
26	46.0	41.0	74	12.8	2.03
24	49.0	43.5	72	11.9	2.02
22	53.0	46.5	67	11.0	2.00
20	57.0	49.5	64	10.0	2.00
18	61.0	52.0	60	8.8	2.05
16	65.0	54.5	56	8.1	1.98
14	65.0	52.0	50	6.9	2.03
12	65.0	50.0	45	6.1	1.97
10	65.0	46.0	35	5.1	1.96
8	65.0	42.5	27	4.2	1.96

TS = Temperatura de bulbo seco

UR = Umidade relativa

PS = Potencial de secagem

TU = Temperatura de bulbo úmido

UE = Umidade de equilíbrio

O ensaio a 100°C sugere um programa de secagem com temperatura inicial de bulbo seco de 40°C, baixas diferenças higrométricas (TS-TU) e alta umidade relativa até o ponto de saturação das fibras - aproximadamente 28% de umidade. A partir desse ponto a combinação de temperaturas de bulbo seco e úmido passam a ser maiores, acelerando o processo de secagem, até atingir a temperatura final de bulbo seco de 65°C.

Os valores do potencial de secagem variaram em torno de 2.00, valor esse determinado pelo ensaio a 100°C.

Esse tipo de programa, considerado suave, era previsto, pois diversos autores, dentre eles Vermaas (1995) e Northway (1996), já haviam confirmado que para a secagem da madeira de *Eucalyptus* os programas devem promover condições suaves até que seja retirada toda a água livre da madeira para que sejam evitados o desenvolvimento de altos índices de colapso, rachaduras internas e de superfície.

5.3. Secagem convencional em escala laboratorial.

5.3.1. Curvas de secagem.

A curva de secagem expressa a perda de umidade da madeira em determinado período de tempo. A partir dessa curva tem-se o histórico do processo de secagem e pode-se saber onde os ajustes do programa devem ser feitos para propiciar a melhor qualidade de secagem possível.

Figura 9. Curva de secagem em estufa laboratorial para *E. grandis* e *E. urophylla*.

Na Figura 9 tem-se as curvas de secagem para as duas espécies. O mecanismo de secagem em condições constantes para materiais sólidos porosos é descrito por vários autores (Skaar, 1988; Mujumdar, 1995) e esclarece a dinâmica de retirada de água. Fazendo uma analogia ao processo de secagem de madeiras em secadores, onde as condições de secagem são variáveis, pois existe a necessidade de ser alterada a temperatura e umidade relativa para que a secagem seja processada de forma mais rápida, pode-se observar a mesma dinâmica de secagem.

No início do processo de secagem, quando a madeira encontra-se com alta porcentagem de umidade, inicia-se o primeiro estágio de secagem. Nessa fase retira-se principalmente a água livre da madeira e ocorre quando a velocidade de evaporação da água é menor ou igual a velocidade de chegada do líquido à superfície do sólido. A chegada de água à superfície da madeira está associada às suas características anatômicas. Pode ser considerado o período de velocidade constante de retirada de água. Nessa fase deve-se ter cuidado especial com a velocidade de retirada de água, que está ligada a temperatura empregada no processo. Se forem usadas altas temperaturas de termômetro seco e baixa umidade, poderão ocorrer colapso e formação de bolsas de umidade na madeira parcialmente seca, bem como rachaduras nas superfícies e extremidades da madeira.

A medida em que a madeira torna-se mais seca existe a necessidade de se empregar maior energia para a retirada da água, é o primeiro período de velocidade decrescente de retirada de água, onde a velocidade de evaporação é pouco maior que a velocidade de chegada de líquido à superfície da madeira. Nesta etapa começa a ser retirada a água adsorvida às paredes celulares, são iniciados também os fenômenos de movimentação dimensional na madeira ocorrendo a contração e consequentemente, promovendo o fechamento das rachaduras superficiais e de topo que por ventura ocorreram no início da secagem.

Quando o teor de umidade aproxima-se da umidade de equilíbrio percebe-se o segundo período de velocidade decrescente de retirada de água, onde a velocidade de evaporação é bem maior que a velocidade de chegada do líquido à superfície da madeira. A quantidade de energia empregada nesta fase é muito maior, pois a maior parte da água adsorvida já foi retirada e existe uma camada seca na superfície para ser ultrapassada. Essa fase não é visível na Figura 9 porque as condições de temperatura e umidade relativa determinadas dentro do secador não são constantes.

A secagem do *E. grandis* teve início com uma umidade de 82,6% e levou 25 dias para atingir a umidade final desejada. A taxa de secagem da condição verde até o PSF (ponto de saturação das fibras) foi de 0,11% / h e do PSF até a umidade desejada foi de 0,073% / h.

Para o *E. urophylla* a secagem teve início com 69,2% de umidade e levou 22 dias para ser finalizada. A taxa de secagem da condição verde até o PSF foi de 0,13% / h e do PSF até a umidade desejada foi de 0,083 % / h.

Analisando as curvas de secagem para as duas espécies percebe-se que com o passar do tempo ocorre uma diminuição na perda de umidade, que está associada a capacidade de perda de água do material e das condições de temperatura e umidade relativa as quais esse material foi submetido, corroborando com a teoria de secagem de materiais porosos.

Quando são comparadas as taxas de secagem para as duas espécies, o *E. urophylla* apresenta taxa mais alta nas duas fases do processo de secagem. No ensaio a 100°C observou-se o mesmo comportamento, menor tempo e maior velocidade de secagem para o *E. urophylla*. Esses valores vem reforçar a eficiência da metodologia usada para a seleção do programa de secagem.

O teste de tensões foi efetuado ao final da secagem para verificar a eficiência da uniformização e do condicionamento.

Na Tabela 8 são mostrados valores de umidade média e de distribuição da umidade para as espécies *E. grandis* e *E. urophylla*, bem como a avaliação do teste do "garfo" que evidencia a presença de tensões internas.

Tabela 8. Avaliação da umidade final média (%), distribuição da umidade (%) e tensões internas.

TESTES DE TENSÃO	<i>Eucalyptus grandis</i> (%)	<i>Eucalyptus urophylla</i> (%)
Umidade interna	16	15
Umidade externa	12	13
Umidade final média	14	14
Tensões internas	Presente	Presente

A umidade final sugerida no programa de secagem foi de 12%, sendo que ao final da secagem a umidade foi avaliada em 14%. Essa variação de 2 % na umidade final é considerada alta e caracteriza uma uniformização insuficiente. A presença de tensões internas tanto para *E. grandis* como para *E. urophylla* mostra que o condicionamento estipulado em 8 horas não foi efetivo, devendo em pesquisas futuras ser permitido um aumento no período de uniformização e condicionamento para que a umidade final seja a mais próxima da estipulada e as tensões internas possam ser minimizadas.

5.3.2. Quantificação dos defeitos.

Os defeitos foram avaliados antes e depois da secagem convencional em estufa laboratorial. O empenamento longitudinal bem como o empenamento em arco não foram encontrados durante o processo da secagem convencional. O empenamento longitudinal não ocorreu pois as tábuas que foram submetidas a secagem mediam 0,50 m de comprimento, sendo curtas para apresentar o defeito.

Na Tabela 9 tem-se a porcentagem de tábuas defeituosas antes e depois da secagem.

Tabela 9. Porcentagem dos defeitos antes e depois da secagem na estufa laboratorial.

Defeitos	<i>Eucalyptus grandis</i>		<i>Eucalyptus urophylla</i>	
	Antes da secagem (%)	Depois da secagem (%)	Antes da secagem (%)	Depois da secagem (%)
Colapso*	-	8.3 (2.3)	-	8.3 (2.0)
E. torcido	-	16.7	-	33.3
E. encanoado	-	29.2	-	41.7
R. de superfície	-	-	-	-
R. de topo	-	-	-	-

* o índice de colapso, indicado entre parentesis, é expresso através de uma escala adimensional que varia de 1 para colapso ausente a 5 para colapso severo.

A madeira de *Eucalyptus* possui como característica anatômica grã espiralada. Na secagem essa característica promove o aparecimento do chamado empenamento torcido, que poderia ter sido amenizado se tivesse sido colocado um peso sobre a carga ou mesmo providenciado uma correta amarração da mesma.

Quanto à classificação dos defeitos, a Tabela 10 mostra a tendência para o *E. grandis* e *E. urophylla*.

Tabela 10. Incidência dos defeitos de secagem para *E. grandis* e *E. urophylla*.

DEFEITOS	CLASSIFICAÇÃO	
	<i>E. grandis</i>	<i>E. urophylla</i>
Colapso	Baixa	Baixa
E. torcido	Pequena	Moderada
E. encanoado	Pequena	Moderada
R. de superfície	Ausente	Ausente
R. de topo	Ausente	Ausente

Não foi evidenciado o aparecimento de rachaduras de topo e superfície nas duas espécies em análise, apenas uma tábua da carga de *E. grandis* apresentou rachadura de topo, porém esse defeito não foi quantificado pois a rachadura ocorreu em associação à madeira de medula.

A porcentagem de empenamentos após a secagem convencional foi maior para o *E. urophylla*, enquanto que o índice de colapso mostrou-se maior para o *E. grandis*. O comportamento dos defeitos após a secagem foi o mesmo observado no ensaio a 100°C, reforçando mais uma vez, a eficiência da metodologia usada.

De acordo com a Tabela 10 pode-se afirmar que a madeira de *E. grandis* apresenta pequena tendência a desenvolver empenamentos e colapso, já a madeira de *E. urophylla* foi classificada como moderada para o desenvolvimento de empenamentos e de baixa tendência para o colapso.

As Figuras 10 e 11 mostram a carga de madeira seca para *E. grandis* e *E. urophylla*, fornecendo uma melhor ilustração dos defeitos e do comportamento da madeira após a secagem. Nestas ilustrações pode ser notada a alta incidência de madeira tangencial, principalmente na carga de *E. urophylla*, justificando o índice de empenamento em canoa.

Figura 10. Secagem convencional em laboratório para *E. grandis*.

Figura 11. Secagem convencional em laboratório para *E. urophylla*.

Quanto a secagem convencional em escala laboratorial podemos concluir que o programa proposto foi adequado com a observação de que devem ser reorganizados os períodos de uniformização e condicionamento. Existe a necessidade de ser aumentado o tempo de uniformização e condicionamento para que seja diminuída a variação de umidade na carga e possivelmente recuperar ainda mais a madeira colapsada.

5.4. Secagem ao ar.

5.4.1. Curvas de secagem ao ar.

A Tabela 11 apresenta os teores de umidade inicial e final da madeira sob estudo. As curvas de secagem ao ar podem ser visualizadas nas Figuras 12 e 13.

Tabela 11. Umidades inicial e final (%) para madeira seca ao ar.

Umidade (%)	<i>Eucalyptus grandis</i>		<i>Eucalyptus urophylla</i>	
	com aspersão	sem aspersão	com aspersão	sem aspersão
Inicial	69.68	60.17	60.21	70.92
Final	17.50	14.20	17.07	14.61

Conforme pode ser observado nas Figuras 12 e 13, a madeira poderia ser considerada como seca ao ar após um período de secagem entre 60 e 80 dias. Contudo, as pilhas continuaram sob análise por um período maior (111 dias para o *E. grandis* e 110 dias para o *E. urophylla*) para que fosse possível avaliar o comportamento da madeira ao longo do tempo.

Figura 12. Curva de secagem ao ar para *E. grandis* com e sem aspersão.

Figura 13. Curva de secagem ao ar para *E. urophylla* com e sem aspersão.

Uma vez que a secagem natural foi estudada sob o enfoque da pré-secagem (em combinação com a secagem convencional),

torna-se relevante analisar os tempos e as velocidades de secagem até um teor de umidade de 20 % . Esses resultados constam das Tabelas 12 e 13. A distribuição de umidade nas pilhas ao final do processo está ilustrada nas Figuras 14 e 15.

Tabela 12. Tempo de secagem (dias) para madeira seca ao ar.

Faixa de Umidade	<i>Eucalyptus grandis</i>		<i>Eucalyptus urophylla</i>	
	com aspersão	sem aspersão	com aspersão	sem aspersão
Até 30 % (PSF)	34	15	25	19
de 30 % a 20 %	35	13	40	23
Total (dias)	69	28	65	42

Para atingir umidade próxima a 30 % o *E. grandis* demorou 30,6% e 13,5% do tempo total de secagem para os tratamentos com e sem aspersão, já o *E. urophylla* dispendeu 22,7% e 17,3% respectivamente para os mesmos tratamentos. Foram gastos 62,2% e 25,2% para o *E. grandis* com e sem aspersão e 59,1% e 38,2% para o *E. urophylla* atingirem umidade próxima a 20 %.

A secagem abaixo de 20 % de umidade foi lenta. Para o *E. grandis* foram gastos 37,8% e 74,8% do tempo total de secagem respectivamente para os tratamentos com e sem aspersão, para que a madeira atingisse a umidade de equilíbrio. Já para o *E. urophylla* foram necessários 40,9% e 61,8% do tempo total de secagem. As Figuras 12 e 13 mostram as curvas de secagem onde podem ser visualizados o tempo gasto para atingir a umidade de equilíbrio.

Tabela 13. Velocidade de secagem (%U/dia) para madeira seca ao ar.

Faixa de Umidade	<i>Eucalyptus grandis</i>		<i>Eucalyptus urophylla</i>	
	com aspersão	sem aspersão	com aspersão	sem aspersão
Até 30 % (PSF)	1.17	2.01	1.21	2.15
de 30 % a 20 %	0.28	0.77	0.25	0.43

O *E. urophylla* apresentou uma velocidade de secagem maior para os dois tratamentos até o PSF, e valores menores para atingir 20% de umidade. Índices de velocidade de secagem maiores para o *E. urophylla* vem sendo evidenciados desde o início do estudo o que leva a concluir que essa espécie possui como característica uma melhor capacidade de perda de água acima do PSF quando comparada com o *E. grandis*.

Ao final do estudo a umidade de equilíbrio para o tratamento com aspersão mostrou-se mais alta. No que diz respeito à distribuição da umidade no perfil das pilhas percebe-se para o *E. grandis* uma variação de 2,2% de umidade para o tratamento com aspersão e 5,1% para o tratamento sem aspersão. O *E. urophylla* apresenta uma variação de 5,0% e 1,7% para os tratamentos com e sem aspersão. Essas variações podem ser consideradas razoáveis para a secagem ao ar uma vez que não se possui o controle da condução do processo de secagem. As Figuras 14 e 15 ilustram o distribuição da umidade no perfil das pilhas de secagem.

Figura 14 . Distribuição da umidade no perfil das pilhas de *E. grandis* após secagem ao ar.

Figura 15 .Distribuição da umidade no perfil das pilhas de *E. urophylla* após secagem ao ar.

Com base nas discussões acima pode-se dizer que o tempo de pré-secagem para o *E. grandis* é de 69 dias para o tratamento com aspersão e de 28 dias para o tratamento sem aspersão. O *E. urophylla* precisa de 65 e 42 dias, respectivamente, para os tratamentos com e sem aspersão de água.

Quando associa-se a aspersão de água à velocidade de secagem conclui-se que o procedimento não é interessante pois retarda a secagem aumentando o tempo necessário para a madeira atingir a umidade desejada. No enfoque da pré-secagem a aspersão não é interessante pois implica em dias adicionais de secagem.

Em termos práticos conclui-se que a pré-secagem ideal para as espécies em estudo deve ser conduzida ao ar e em local coberto, por um período entre 15 e 20 dias. Este tempo será ideal para que a carga atinja umidade próxima de 30 %, quando a madeira já estará apta a ser seca em secador convencional. Vale ressaltar que o tempo gasto na pré-secagem é condicional ao clima da região de Piracicaba - SP.

5.4.2. Quantificação dos defeitos.

Embora a quantificação dos defeitos tenha sido feita ao longo da secagem, a comparação entre os tratamentos teve como base as condições verde (início da secagem), PSF (umidade em torno de 30 %) e seca (ao final do ensaio).

O principal questionamento para os tratamentos testados era saber se a aspersão intermitente de água promoveria um menor índice de defeitos quando comparada com o tratamento sem aspersão de água.

Em análise prévia, foi feita a análise de variância obtendo-se interação significativa entre as épocas de análise, o que implica em dizer que para cada época o comportamento dos defeitos foi diferente, e as épocas não poderiam ser analisadas independentemente, pois o efeito das variáveis - rachaduras de topo, empenamentos torcido e longitudinal - é cumulativo de uma época à seguinte.

A comparação dos tratamentos foi feita a partir das médias que expressam as diferenças entre os tratamentos com e sem aspersão intermitente de água (teste t).

. Medula.

A incidência de tábuas medulares não é caracterizado como um defeito de secagem, mas sim característica da própria madeira. Esse material é característico de florestas jovens com toras de pequeno diâmetro e pode ser amenizado através de ações conjuntas de manejo adequado da floresta para a produção de árvores com diâmetros maiores e também na serraria adequando o método de serragem ao material.

O procedimento ideal indica um controle qualitativo das tábuas já na serraria, eliminando aquelas que por ventura apresentam o

defeito, uma vez que a madeira não pode ser comercializada por apresentar alto índice de rachaduras de topo e superfície e também possuir características físico-mecânicas diferenciadas. A Tabela 14 mostra a porcentagem de tábuas que apresentaram madeira de medula.

Tabela 14. Porcentagem de medula.

Espécie	% de Medula
<i>E. grandis</i> sem aspensão	18,3
<i>E. grandis</i> com aspensão	16,2
<i>E. urophylla</i> sem aspensão	11,1
<i>E. urophylla</i> com aspensão	18,4

. Colapso

Os valores em porcentagem de peças com colapso são apresentados na Figura 16.

Figura 16. Porcentagem da ocorrência do colapso na condição seca, para *E. grandis* e *E. urophylla*.

Dentre os tratamentos estudados, o tratamento com aspersão foi mais eficiente quando observa-se a variável colapso. Para *E. grandis* o tratamento sem aspersão apresentou 23,0% de incidência do defeito enquanto que para o tratamento com aspersão a porcentagem de presença do defeito foi de 9,9%. Para o *E. urophylla* o efeito da aspersão não foi decisivo para reduzir a incidência do defeito. A porcentagem de colapso para o tratamento sem aspersão foi de 13,1% enquanto que para o tratamento com aspersão a porcentagem foi de 11,9%.

. Rachaduras de topo.

Rachaduras de superfície não foram evidenciadas durante a condução do estudo. As rachaduras de topo acompanharam as tábuas desde a condição verde e a recuperação ocorreu com o decorrer do estudo como mostra a Tabela 15. O *E. grandis* apresentou maior número de peças defeituosas em todas as condições, evidenciando desta forma maiores perdas de madeira com o defeito.

Tabela 15. Porcentagem de peças com rachaduras de topo na condição verde, PSF e seca.

Rachaduras de topo	Verde (%)	PSF (%)	Seco (%)
<i>E. grandis</i> sem aspersão	100	91,3	83,7
<i>E. grandis</i> com aspersão	97,3	83,8	83,8
<i>E. urophylla</i> sem aspersão	97,0	86,9	75,8
<i>E. urophylla</i> com aspersão	97,5	66,9	66,9

A Tabela 16 expressa as perdas de madeira, em porcentagem e metros lineares, causadas pelas rachaduras de topo. Tanto para o *E. grandis* como para o *E. urophylla*, nos dois tratamentos testados, ocorreu uma recuperação do defeito, o que na prática implica em dizer que maior quantidade de madeira será aproveitada. Essa recuperação foi de 2,7%

para o *E. grandis* sem aspersão e 4,1 % para o tratamento com aspersão. Para a espécie *urophylla* a recuperação foi de 3,9 % para o tratamento sem aspersão e 4,7 % com aspersão de água. Comparando-se as espécies nota-se a maior incidência das rachaduras de topo no *E. grandis*, quando em secagem ao ar, pois além de possuir maior número de tábuas com o defeito também apresenta a menor porcentagem de recuperação do defeito.

Tabela 16. Perdas em metros lineares de tábua e em porcentagem do total, devido à rachaduras de topo nas condições verde, PSF e seca.

% de Perdas	Verde		PSF		Seco	
Espécie	m	%	m	%	m	%
<i>E. grandis</i> sem aspersão	30,2	9,8	24,5	7,9	22,1	7,1
<i>E. grandis</i> com aspersão	43,0	12,9	30,7	9,2	29,5	8,8
<i>E. urophylla</i> sem aspersão	27,4	9,2	18,4	6,2	15,7	5,3
<i>E. urophylla</i> com aspersão	33,2	9,3	16,8	4,8	16,4	4,6

Os diferentes tratamentos não deferiram entre si quanto à recuperação das rachaduras, levando a acreditar que a principal razão para essa recuperação está na dinâmica da reversão das tensões de secagem quando o teor de umidade está abaixo do PSF, ocorrendo a contração da madeira e diminuindo ou eliminando a visualização do defeito.

A Tabela 17 é específica para a variável rachaduras de topo e mostra os valores médios para o defeito bem como o teste estatístico de comparação de médias para os dois tratamentos testados. As Figuras 17 e 18 ilustram esses valores.

As médias para o *E. grandis* com aspersão são maiores (129,2 mm/m) do que para o tratamento sem aspersão (96,8 mm/m) isso significa que, para essa espécie, o tratamento sem aspersão foi mais favorável (estatisticamente significativo a 1% e 5%) ao desenvolvimento e recuperação das rachaduras de topo. No *E. urophylla* o comportamento foi exatamente o contrário (não mostrando diferença estatística nas condições verde e seca), constatando que o fator de maior contribuição para o desenvolvimento de

rachaduras de topo foi a susceptibilidade das espécies à rachaduras e não os tratamentos com ou sem aspersão intermitente de água.

Tabela 17 . Média, desvio padrão e teste t para a variável rachaduras de topo.

Rachaduras de Topo (mm/m)	<i>E. grandis</i> sem aspersão		<i>E. grandis</i> com aspersão		Teste t	
	μ	σ	μ	σ	t calc	sig.
Verde	96,8	49,1	129,2	66,0	4,07	**
PSF	78,7	55,7	92,3	72,9	2,24	*
Seco	70,9	58,2	88,6	71,4	1,98	*
	<i>E. urophylla</i> sem aspersão		<i>E. urophylla</i> com aspersão		Teste t	
	μ	σ	μ	σ	t calc	sig.
Verde	92,2	58,7	93,7	57,1	0,19	n.s.
PSF	62,1	56,9	47,5	53,4	-1,12	*
Seco	52,8	53,9	46,5	52,6	-0,86	n.s.

μ = média

σ = desvio padrão

t = teste t para comparação de médias entre tratamentos

** = significativo a 1%

* = significativo a 5%

n.s. = não significativo

Figura 17. Valores médios para a variável rachaduras de topo para *E. grandis*.

Figura 18. Valores médios para a variável rachaduras de topo para *E. urophylla*.

Vale ressaltar que a rachadura de topo diminui de intensidade mas não desaparece. Ela pode não aparecer porém ainda existe e pode provocar problemas quando essa madeira for novamente beneficiada.

. Empenamento longitudinal.

Os empenamentos arqueado e encanoado não são citados neste trabalho pois não ocorreram durante todas as fases do estudo.

A Tabela 18 indica os valores médios para a variável empenamento longitudinal. O teste t não mostra significância para as duas espécies nas três épocas de estudo, o que mais uma vez reforça a idéia de que o tratamento com aspersão intermitente de água não foi interessante para a diminuição dos defeitos de secagem.

Tabela 18 . Média, desvio padrão e teste t para a variável empenamento longitudinal.

Empenamento Longitudinal (mm/m)	<i>E. grandis</i> sem aspersão		<i>E. grandis</i> com aspersão		Teste t	
	μ	σ	μ	σ	t calc	sig.
Verde	3,31	3,02	3,22	2,7	-0,23	n.s.
PSF	2,83	2,35	2,91	2,3	2,01	n.s.
Seco	3,02	2,35	2,53	2,2	-1,54	n.s.
	<i>E. urophylla</i> sem aspersão		<i>E. urophylla</i> com aspersão		Teste t	
	μ	σ	μ	σ	t calc	sig.
Verde	3,09	2,47	2,76	2,06	-1,05	n.s.
PSF	2,50	1,82	2,81	1,86	-0,31	n.s.
Seco	2,07	2,09	1,78	1,71	-1,06	n.s.

μ = média

σ = desvio padrão

t = teste t para comparação de médias entre tratamentos

** = significativo a 1%

* = significativo a 5%

n.s. = não significativo

Figura 19. Valores médios para a variável empenamento longitudinal para *E. grandis*.

Analisando as médias para as duas espécies, que pode ser visualizado nas Figuras 19 e 20, o tratamento com aspersão mostrou menor

defeito nas condições verde e na umidade de equilíbrio, porém no PSF o tratamento sem aspersão revelou médias maiores. Quando observa-se o comportamento das espécies, o *E. urophylla* mostrou os menores valores para o defeito.

Figura 20. Valores médios para a variável Empenamento longitudinal para *E. urophylla*.

Observando-se a tendência à recuperação do defeito verifica-se que o *E. urophylla* apresentou um melhor índice para os dois tratamentos envolvidos no estudo, como mostra a Tabela 19. Porém quando se analisa a porcentagem tábuas com defeitos (Tabela 20) percebe-se que o *E. urophylla* apresenta um valor levemente maior, o que implica em dizer que a espécie apresenta um maior número de peças defeituosas porém com menor intensidade do defeito.

Tabela 19. Valores médios para empenamento longitudinal na condição verde, PSF e seca e índice de recuperação (%).

Empenamento longitudinal	Verde (mm/m)	PSF (mm/m)	Seco (mm/m)	Recuperação (%)	
				PSF	Total
<i>E. grandis</i> sem aspersão	3,3	2,8	3,0	15,1	9,1
<i>E. grandis</i> com aspersão	3,2	2,9	2,5	9,6	21,1
<i>E. urophylla</i> sem aspersão	3,1	2,5	2,1	19,3	33,2
<i>E. urophylla</i> com aspersão	2,8	2,8	1,8	-	35,7

Tabela 20. Porcentagem de peças com empenamento longitudinal na condição verde, PSF e seca.

Empenamento longitudinal	Verde (%)	PSF (%)	Seco (%)
<i>E. grandis</i> sem aspersão	73,1	71,2	76,0
<i>E. grandis</i> com aspersão	71,2	71,2	66,7
<i>E. urophylla</i> sem aspersão	69,7	74,7	53,5
<i>E. urophylla</i> com aspersão	78,0	80,5	76,3

. Empenamento torcido.

A Tabela 21 é específica para a variável empenamento torcido e mostra os valores médios para o defeito bem como o teste estatístico de comparação de médias para os dois tratamentos testados.

Tabela 21 . Média, desvio padrão e teste t para a variável empenamento torcido.

Empenamento Torcido (mm)	<i>E. grandis</i> sem aspersão		<i>E. grandis</i> com aspersão		Teste t	
	μ	σ	μ	σ	t calc	sig.
Verde	2,76	4,38	2,21	4,02	-0,95	n.s.
PSF	0,96	3,25	2,91	4,20	2,00	*
Seco	1,47	4,87	0,95	2,29	-1,37	n.s.
	<i>E. urophylla</i> sem aspersão		<i>E. urophylla</i> com aspersão		Teste t	
	μ	σ	μ	σ	t calc	sig.
Verde	5,70	6,18	3,45	5,02	-2,88	**
PSF	3,29	5,26	1,84	3,66	-2,53	*
Seco	2,72	6,58	2,18	4,00	-0,71	n.s.

μ = média

σ = desvio padrão

t = teste t para comparação de médias entre tratamentos

** = significativo a 1%

* = significativo a 5% n.s. = não significativo

Na variável empenamento torcido o *E. grandis* mostrou uma menor média para o defeito, não havendo uma diferença significativa para as condições verde e seca. As Figuras 21 e 22 e a Tabela 22 evidenciam esse comportamento.

Figura 21. Valores médios para a variável empenamento torcido para *E. grandis*.

Tabela 22. Valores médios para empenamento torcido na condição verde, PSF e seca e índice de recuperação (%).

Empenamento torcido	Verde (mm)	PSF (mm)	Seco (mm)	Recuperação (%)	
				PSF	Total
<i>E. grandis</i> sem aspersão	2,8	1,0	1,5	64,3	46,4
<i>E. grandis</i> com aspersão	2,2	2,9	0,9	-	57,0
<i>E. urophylla</i> sem aspersão	5,7	3,3	2,7	42,3	52,1
<i>E. urophylla</i> com aspersão	3,5	1,8	2,2	46,8	36,7

Figura 22. Valores médios para a variável empenamento torcido para *E. urophylla*.

O empenamento torcido foi o defeito que apresentou o comportamento mais indefinido, ora diminuindo ora aumentando a intensidade do defeito bem como a porcentagem de peças defeituosas, sem apresentar correlação com a espécie ou tratamento estudados. As Tabelas 22 e 23 mostram esses valores.

Tabela 23. Porcentagem de peças com empenamento torcido na condição verde, PSF e seca.

Empenamento torcido	Verde (%)	PSF (%)	Seco (%)
<i>E. grandis</i> sem aspersão	40,4	16,3	26,9
<i>E. grandis</i> com aspersão	29,7	41,5	18,0
<i>E. urophylla</i> sem aspersão	65,7	47,5	25,3
<i>E. urophylla</i> com aspersão	49,2	28,0	28,0

A Tabela 24 diz respeito a distribuição dos defeitos nas pilhas de secagem ao ar. As peças posicionadas na parte superior das pilhas apresentam um índice de empenamentos longitudinal e torcido maior quando comparado com as camadas inferior e central. O peso da camada superior sobre as camadas central e inferior faz com que os defeitos sejam minimizados, este detalhe explica um procedimento que deve ser usado para a diminuição dos empenamentos.

Tabela 24. Distribuição dos defeitos nas pilhas de secagem ao ar na condição seca.

Espécies Defeitos	<i>E. grandis</i> sem aspersão		<i>E. grandis</i> com aspersão		<i>E. urophylla</i> sem aspersão		<i>E. urophylla</i> com aspersão	
	E. Long* (mm/m)	E.Torcido (mm)	E. long* (mm/m)	E.Torcido (mm)	E. long* (mm/m)	E.Torcido (mm)	E. long* (mm/m)	E.Torcido (mm)
Posição superior	2,4	6,3	2,6	5,16	3,81	4,12	2,82	1,43
Posição média	2,2	0,7	1,6	1,35	2,99	0,91	3,23	1,10
Posição inferior	1,4	0,0	1,2	0,2	2,24	0,57	1,57	0,26

* E. long = Empenamento longitudinal

Com base nos resultados obtidos, não é possível afirmar, qual é o melhor tratamento para diminuir a intensidade dos defeitos analisados, isso porque as variáveis não se comportaram de forma homogênea. Nas Tabelas 17, 18 e 21 o desvio padrão da média para as três variáveis apresentam valores altos, o que mais uma vez caracteriza a heterogeneidade dos defeitos estudados para os dois tratamentos. Na verdade existe a necessidade de aprofundar os estudos no que diz respeito ao comportamento dos defeitos de secagem na madeira de *Eucalyptus* para que se possa melhor compreender sua dinâmica e, por conseguinte, promover sua minimização.

5.4.3. Combinação dos processos de secagem.

A combinação dos processos envolve a análise conjunta da secagem ao ar e da secagem convencional. Como na secagem ao ar os tratamentos testados não mostraram diferença significativa, usou-se na combinação de processos a secagem ao ar sem aspersão de água. Optou-se por esse tratamento pelo fato de ser o mais utilizado na prática industrial da secagem de madeiras.

A secagem ao ar deve ser feita como uma forma de pré secagem. O tempo ideal para pré secagem varia de 15 a 19 dias de acordo com a espécie (*E. grandis* ou *E. urophylla*, respectivamente) quando a madeira atinge a média de 30% de umidade.

Com a pré secagem ao ar a madeira perde praticamente toda a água livre, sendo então transferida para o secador onde a taxa de secagem é mais elevada, promovendo a rápida secagem até a umidade final desejada. O tempo gasto para promover a secagem do PSF até a umidade final de 14 % em secador convencional foi de 7 dias para o *E. grandis* e de 8 dias para o *E. urophylla*.

É normal que a secagem ao ar gaste mais dias quando comparada com a secagem convencional, sabe-se que a taxa de secagem ao ar é mais suave. Porém deve-se levar em conta que os custos da secagem ao ar são bem menores e é interessante do ponto de vista econômico, diminuir ao máximo o tempo que a madeira fica dentro do secador.

Organizando uma secagem combinada (pré-secagem ao ar até o PSF, associada a secagem convencional até a umidade desejada) com os resultados obtidos neste estudo, tem-se para o *E. grandis* (15 + 7) 22 dias de processo e (19 + 8) 27 dias para o *E. urophylla*.

A secagem ao ar associada a secagem convencional levou mais tempo para ser realizada quando comparada apenas com a secagem

convencional, porém, deve-se considerar que o tempo de secagem convencional e a incidência de defeitos serão diminuídos, o que levará a um menor custo total de secagem.

6. CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos neste estudo permite as seguintes conclusões.

1. A metodologia para a indicação do programa de secagem foi eficiente e de execução rápida, resultando um programa coerente com as características das espécies estudadas.
2. O programa de secagem proposto foi adequado para as duas espécies com a sugestão de que devem ser reorganizados os períodos de uniformização e condicionamento para que seja diminuída a variação de umidade na carga e melhorar a recuperação do colapso.
3. Na secagem convencional o *E. grandis* apresentou pequena tendência a desenvolver empenamentos e colapso. O *E. urophylla* foi classificado com a tendência de moderado desenvolvimento a empenos e pequena tendência para o colapso.
4. Não é possível afirmar, pelo menos estatisticamente, qual é o melhor tratamento para diminuir a intensidade dos defeitos analisados, isso porque as variáveis não se comportaram de forma homogênea. É sugerido um estudo mais detalhado no que diz respeito ao comportamento dos defeitos de secagem na madeira de *Eucalyptus* para que se possa melhor compreender sua dinâmica e, por conseguinte, promover sua minimização.

5. A combinação mais adequada de métodos é a pré-secagem ao ar em local coberto (sem aspersão) até o PSF, seguida da secagem convencional até a umidade final desejada.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXIOU, P. N.; WILKENS, A. P.; HARTLEY, J. Effect of pre-steaming on drying rate, wood anatomy and shrinkage of regrowth *Eucalyptus pilularis* Sm. **Wood Science and Technology**. 24:103-110. 1990.
- FREITAS, A. R. de. **Regras NHLA para medição e classificação de madeiras duras serradas**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 2 edição (tradução). São Paulo. 1986. 41p.
- BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O. El eucalipto como matéria prima para celulosa en Brasil. **Investigación y Técnica del Papel**, n. 50, v. 13, out. 1976.
- BARRICHELO, L. E. G. Densidade básica - Subsídios para determinação (1ª Parte). **Informações SQCE**. Departamento de Silvicultura ESALQ/ USP. Set. 1983.
- BRANDÃO, A. T. de O.; JANKOWSKY, I. P. A screening to select kiln schedules. **IPEF Internacional**, Piracicaba (2):20 - 24, 1992.
- BRANDÃO, A. T. de O. Determinação de metodologia para a indicação de programas de secagem de madeiras. Piracicaba, 1989. 100p. Dissertação (M.S) - ESALQ/USP.
- BRASIL. Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal. Norma brasileira para classificação de madeira serrada de folhosas. Brasília. 1982. 51p.

- BRASIL, M. A. M. Variação da densidade básica da madeira entre e dentro de procedências de *E. urophylla* S.T. Blake. Botucatu, 1983. 89p. Tese (Livre Docência) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual "Júlio de Mesquita Filho".
- BOLAND, D.J.; BROOKER, M. I. H.; CHIPPENDALE, G. M. et al. **Forest Tree of Australia**. 4. Ed. Melbourne: CSIRO, 1994. 703p.
- CAMPBELL, G. S. & HARTLEY, J. Drying and dried wood. In: HILLIS, W. E. & BROWN, A. G. **Eucalyptus for Wood Production**. Austrália: Academic Press, 1978. p. 322-7.
- CAVALCANTE, A. de A. Ocorrência do Colapso na Secagem da Madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*. Piracicaba. 1991. 76p. Dissertação (M.S.) - ESALQ/USP.
- CHAFE, S. C. Radial variation of collapse, volumetric shrinkage, moisture content and density in *Eucalyptus regnans* F. Muell. **Wood Science and Technology**, 20 (3): 253-262. 1986.
- COMMONWEALTH SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH ORGANIZATION. The principles of air seasoning. Div. B. Res. 1967. 17p.
- ELLWOOD, E. L. & ECKLUND, B.A. The effect of organic liquids on collapse and shrinkage of wood. **Forest Products Journal**, Madison, 13(7):291-8. 1962.
- FERREIRA, M. Melhoramento e a silvicultura intensiva clonal. **IPEF**, n.45, p. 22-30, 1992.
- FOELKEL, C. E. B. ; BRASIL, M. A. M.; BARRICHELO, L. E. G. Métodos para a determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **Revista do IPEF**, Piracicaba (2/3): 65 - 74, 1971.
- GALVÃO, A. P. M. Aspectos da utilização da madeira de eucalipto no Brasil: Seu aproveitamento em serraria. **Boletim Informativo Especial IPEF**, Piracicaba 4 (12), Julho, 1976.

- GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel. 1985. 111p.
- GOMIDE, J. L. **Secagem de madeira**. Viçosa. Universidade Federal de Viçosa. 1973.
- HENRIQUEZ, E. Z. Comparação dos Métodos de Secagem para Madeira de *Pinus caribaea* var *hondurensis*. Piracicaba. 1986. 148p. Dissertação (M.S.) - ESALQ/USP.
- HILDEBRAND, R. **Kiln drying of sawn timber**. Germany: R H Maschinenbau GmbH, 1970. 198p.
- IBDF. **Madeiras da amazônia: Características e utilização**. Brasília: BQP/LPF, 1988. v. 2.
- ILIC, J.; CHAFE, S. C. The relationship between collapse, pulse resistance and depth of electrode penetration in trees of *Eucalyptus regnans* f. Muell. **Australian Forest Research** 16 (3): 291-9. 1986.
- INNES, T. C. Collapse during seasoning of Eucalypt timber. In: 5th INTERNATIONAL IUFRO WOOD DRYING CONFERENCE, Quebec, 1996. **Anais**. Canadá, 1996. p.533-537.
- JANKOWSKY, I. P. O controle do processo de secagem. In: II SIMPÓSIO FLORESTAL DO RIO GRANDE DO SUL - TECNOLOGIA DE MADEIRAS. Esteio, 1992. **Anais**. Esteio. 9-16 p.
- JANKOWSKY, I. P.; CAVALCANTE, A. A. Collapse prevention in the drying of eucalipt wood. In: 3rd INTERNATIONAL IUFRO WOOD DRYING CONFERENCE. Viena, 1992. **Anais**. Austria. p.357-361.
- JANKOWSKY, I. P.; BILIA, F. A. C.; DUCATTI, M. A. Ensaio rápido para seleção de programas de secagem. CNPq 500.758/90-5. 2º Relatório. Mar. Piracicaba. 1993. 16p.
- JANKOWSKY, I. P. Controle do processo de secagem. LCF/ESALQ. Piracicaba. 1994. (notas de aula)

- JANKOWSKY, I. P. Equipamentos e processos para a secagem de madeiras. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA. São Paulo, 1995. IPEF/IPT/IUFRO/ESALQ/USP. 1995. **Anais.** 132p.
- JANKOWSKY, I. P. Secagem de madeira de reflorestamento: técnicas e equipamentos. In: SEMINÁRIO SOBRE PROCESSAMENTO E UTILIZAÇÃO DE MADEIRAS PARA REFLORESTAMENTO. Curitiba, 1996. **Anais.** Paraná. 107-117p.
- JANKOWSKY, I. P.; BILIA, F. A. C.; DUCATTI, M. A. Ensaio rápido para a seleção de programas de secagem. Relatório técnico CNPq 510555/93-4. Mar. Piracicaba. 1997. 12p.
- KAUMAN, W. G. Cell collapse in wood. CSIRO, Division of forest Products, DFP Reprint NS66, 1964.
- MARTINS, V.A. **Secagem de madeira serrada.** Brasília: Ministério da agricultura IBDF/LPF, 1988. 89p.
- MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying.** 2.ed. New York: Marcel Dekker, Inc., 1995. 1v.
- NEUMANN, R. J. Kiln drying young *Eucalyptus globulus* boards from green. In: II IUFRO INTERNATIONAL WOOD DRYING CONFERENCE. **Anais.** Seattle, 1989.
- NEUMANN, R.J. Hacia um secado de madeira mas eficiente. In: XIX CONGRESSO MUNDIAL IUFRO. Actas, Divisão 5. Montreal. 1990. p.191-203.
- NORTHWAY, R. L. Drying strategies for plantation-grown Eucalypts In: 5th INTERNATIONAL IUFRO WOOD DRYING CONFERENCE, Quebec, 1996. Canadá. P.289-296.
- PONCE R. H. & WATAI, L. T. **Manual de secagem da madeira.** Brasília, STI/IPT. 1985. 70p.

- PONCE, R. H. Perspectivas do eucalipto na substituição de madeiras nativas. In: III SEMINÁRIO SOBRE PROCESSAMENTO E UTILIZAÇÃO DE MADEIRAS DE REFLORESTAMENTO. Curitiba. 1994. 86p.
- PONCE, R. H. Madeira serrada de eucalipto: Desafios e perspectivas. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA. São Paulo. IPEF/IPT/ IUFRO/ ESALQ/ USP. 1995. **Anais**. 132p.
- PRATT, G. H. **Timber dryng manual**. London: Building Research Establishment, 1974, 152p.
- PRÉ-SECAGEM NA AUSTRÁLIA. Revista Brasil Madeira. 1979. 38-42p.
- SCHÖNAU, A. P. G. & VERLOREN van THEMAAT, R. Preliminary results of investigations into the air-drying of debarked logs of four eucalyptus species in the natal midlands. Wattle Research Institute Report de 1976-77: 87-100.
- SIAU, J. F. **Flow in wood**. Syracuse University Press, 1971. 131p.
- RASMUSSEN, E. F. **Dry Kiln: operator's manual**. Madison: Forest Products Laboratory, 1961, 197p.
- SKAAR, C. **Water in wood**. Syracuse, Syracuse University Press, 1972. 218p.
- SKAAR, C. **Wood-Water relations**. Berlin. Alemanha, Springer-Verlag. 1988. 293p.
- SEVERO, E. T. D. Efeito da temperatura e da velocidade do ar na secagem de madeira serrada de *Pinus eliottii*. Curitiba. 1989. 121p. Dissertação (M.S.) UFPr
- TOMAZELLI, I. **Secagem da madeira**. Curitiba. FUPEF. 1980. 89p.
- TOMAZELLI, I. Novas técnicas de secagem de madeira. In: I SEMINÁRIO SOBRE PROCESSAMENTO E UTILIZAÇÃO DE MADEIRAS DE REFLORESTAMENTO. Curitiba. **Anais**. 1983. 75p.
- VERMAAS, H. F. & NEVILLE, C. J. Low temperature drying of *Eucalyptus grandis*. **Holzforschung**, 42 (4): 265-271. 1988.

- VERMAAS, H. F. Drying eucalypts for quality: material characteristics, pre-drying treatments, drying methods, schedules and optimization of drying quality. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA. São Paulo. IPEF/IPT/IUFRO/ESALQ/USP. 1995. **Anais.** 132p.
- ZENID, G. J. Classificação de madeira serrada de eucalipto proposta ABPM/IPT. In: SEMINÁRIO SOBRE PRECESSAMENTO E UTILIZAÇÃO DE MADEIRAS PARA REFLORESTAMENTO. Paraná, 1996. **Anais.** Curitiba: ABPM, 1996 91-96p.