

**OTIMIZAÇÃO DA SECAGEM DA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* [HILL EX MAIDEN]**

**GILSON ROBERTO VASCONCELOS DOS SANTOS**

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

**PIRACICABA**  
**Estado de São Paulo – Brasil**  
Fevereiro – 2002

**OTIMIZAÇÃO DA SECAGEM DA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* [HILL EX MAIDEN]**

**GILSON ROBERTO VASCONCELOS DOS SANTOS**

Engenheiro Florestal

Orientador: Prof. Dr. **IVALDO PONTES JANKOWSKY**

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

**PIRACICABA**  
**Estado de São Paulo – Brasil**  
**Fevereiro - 2002**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Santos, Gilson Roberto Vasconcelos dos

Otimização da secagem da madeira de *Eucalyptus grandis* [Hill ex Maiden] /  
Gilson Roberto Vasconcelos dos Santos. - - Piracicaba, 2002.

70 p.

Dissertação (mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2002.

Bibliografia.

1. Eucalipto 2. Madeira serrada 3. Otimização 4. Secagem da madeira I. Título

CDD 634.9734

**“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O  
autor”**

*A minha família, Nazaré, Bernadete, Gedeon, Eduardo e Edmond, pela compreensão, incentivo e apoio.*

*A Valter Gonçalves Vieira (**in memorian**), pela criação, incentivo e exemplo de pessoa.*

**DEDICO**

## **AGRADECIMENTOS**

A DEUS, pelas oportunidades ao longo desta caminhada.

Ao Professor Ivaldo Pontes Jankowsky, pela coragem de receber-me como orientado; pela orientação segura e criteriosa; pela paciência de esperar a conclusão deste trabalho; pela oportunidade de realizar idéias e projetos que foram conjuntamente concebidos e debatidos, levando a uma experiência real em laboratório e campo, agora expressa nesta dissertação; pela amizade, enfim, construída ao longo de nosso convívio.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudo durante o Curso.

As empresas CAF e ESUL, pelo apoio na concessão do material utilizado e na utilização do secador para a secagem convencional, respectivamente.

Ao Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Madeiras, da ESALQ-USP, pela oportunidade de cumprir o Programa de Mestrado.

A todos os Professores do Curso, pelos ensinamentos e idéias edificantes.

A todos os amigos da ESALQ e de Piracicaba, por propiciar um convívio agradável ao longo da minha estadia como aluno.

Ao Eng. Ariel de Andrade, amigo, estimulador e sempre agradável no convívio profissional e pessoal.

Ao Eng. Marcos André Ducatti, pela amizade e pelo apoio logístico durante a realização do trabalho na ESUL.

Aos funcionários da Serraria da ESALQ, pelo pronto auxílio sempre que solicitado.

Aos amigos Vitor Barchet, Jackson Roberto Eleotério e Eliane Santos Rocha Eleotério, pelo otimismo, pelo apoio moral nos momentos de desânimo e pela amizade.

Ao pesquisador Dr. Zenobio Abel Gouvêa Perelli da Gama e Silva, pelo incentivo profissional.

A sociedade em geral, que mesmo sem saber, custeou este Curso.

***Os meus sinceros agradecimentos.***

## SUMÁRIO

	Página
<b>RESUMO</b> .....	vii
<b>SUMMARY</b> .....	ix
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	3
2.1 Princípios da secagem de materiais porosos, capilares e higroscópicos .....	4
2.2 Processos de secagem .....	6
2.3 Programas de secagem .....	8
2.4 Defeitos de secagem .....	10
2.5 A secagem da madeira de Eucalipto .....	17
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	22
3.1 Determinação da curva característica de secagem .....	22
3.2 Preparação do programa de secagem .....	24
3.3 Secagem convencional em laboratório .....	29
3.4 Secagem combinada .....	33
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	36
4.1 Curva característica de secagem .....	36
4.2 Determinação do programa de secagem .....	43
4.3 Secagem convencional em laboratório .....	46
4.4 Secagem combinada .....	52
4.4.1 Tempo de secagem .....	52
4.4.2 Quantificação e qualificação dos defeitos .....	56
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	63
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	65

# OTIMIZAÇÃO DA SECAGEM DA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* [HILL EX MAIDEN]

Autor: GILSON ROBERTO VASCONCELOS DOS SANTOS

Orientador: Prof. Dr. IVALDO PONTES JANKOWSKY

## RESUMO

É crescente a utilização do gênero *Eucalyptus* nas indústrias de manufaturados de madeira, notadamente em produtos de maior valor agregado como móveis e assoalhos. Contudo, essa matéria-prima requer secagem lenta, o que implica um aumento no custo do processo, proporcional ao tempo de permanência da madeira no secador. A combinação da secagem natural com a secagem convencional tem sido indicada como alternativa para reduzir a duração do processo artificial; hipótese que foi avaliada, no presente trabalho, para madeira de *Eucalyptus grandis* com 40 mm de espessura. Em laboratório foram determinadas a curva característica de secagem para o material e o programa básico para a secagem convencional. Comprovou-se que a secagem convencional é lenta e que a transição da secagem ao ar para a artificial deve ser feita quando o teor de umidade da madeira estiver entre 35% e 40%. Em sequência foi realizada a secagem, em escala industrial, de uma carga com 60 m<sup>3</sup> de madeira, combinando a secagem ao ar com posterior secagem convencional. Embora a madeira recém serrada apresentasse alta incidência de defeitos (95%

da peças com rachaduras de topo e 93% com encurvamento), avaliando-se a qualidade da madeira ao longo do processo foi possível concluir que a secagem convencional causou aumento na intensidade dos empenamentos mas não afetou a incidência ou intensidade das rachaduras e do colapso. O tempo de permanência no secador foi reduzido em 78% (de 70 para 15 dias), comprovando a viabilidade da combinação dos métodos de secagem.

# **OPTIMIZING THE DRYING PROCCESS OF *Eucalyptus grandis* [HILL EX MAIDEN] LUMBER**

Author: GILSON ROBERTO VASCONCELOS DOS SANTOS

Adviser: Prof. Dr. IVALDO PONTES JANKOWSKY

## **SUMMARY**

The use of *Eucalyptus* lumber by the wood manufacturing industry is growing, mainly to added value products as furniture and flooring. However, this row material requires a slow drying, which means an increase of production cost, proportional to residence time of lumber in the kiln. To combine air and kiln drying has been suggested as an alternative to reduce the kiln drying time, hypothesis evaluated in this research to optimize the drying of *Eucalyptus grandis* lumber 40 mm thick. The drying characteristic curve of the material and a basic kiln schedule were determined using laboratory equipment. It was proved that conventional kiln drying is very slow and the best point to interrupt air drying and to start kiln process is when the lumber moisture content is between 35% and 40%. In sequence it was dried a charge with 60 m<sup>3</sup> of lumber, starting with air drying in a lumber yard

followed by conventional drying using an industrial kiln. Although the green saw wood showed a high incidence of defects before the drying (95% of boards with end checks and 93% with warping), quality evaluation all along drying process permits to conclude that kiln drying caused an increase in the warping intensity but did not affect the incidence as well the intensity of checking and collapse. A 78% reduction in the residence time of lumber in the kiln was obtained (from 70 to 15 days), proving the advantage to combine air and kiln drying.

## 1 INTRODUÇÃO

A busca por espécies florestais que possam fornecer madeira com potencial para substituir àquelas tradicionalmente comercializadas tem sido uma constante nos últimos anos.

Ao par da introdução no mercado de espécies não tradicionais, provenientes da floresta tropical, a utilização de espécies oriundas de florestas plantadas têm-se mostrado como alternativa promissora.

Dentre as espécies de rápido crescimento destacam-se as do gênero *Eucalyptus*, notadamente o *Eucalyptus grandis*, cuja cultura tem demonstrado ser uma das mais produtivas e competitivas do mundo; tanto em função das condições favoráveis de solo e clima existentes no Brasil como do desenvolvimento das técnicas silviculturais.

As tecnologias para o processamento das toras com diâmetros menores, usualmente extraídas das florestas plantadas, também evoluíram; mas alguns obstáculos ainda permanecem presentes quando o objetivo é a produção de madeira maciça. Uma característica desfavorável é a necessidade de secar material jovem e propenso a apresentar alta incidência de defeitos durante a secagem, dificultando a transformação da madeira em produtos com maior valor agregado.

A secagem convencional possui inúmeras vantagens em relação a secagem natural; mas representa também uma parcela significativa do custo de produção, devido principalmente a amortização do investimento nos secadores e a demanda de energia do processo.

Uma vez em que a madeira de Eucalipto requer uma secagem lenta, devido a tendência ao desenvolvimento de defeitos como rachaduras e colapso, principalmente nos estágios iniciais da secagem, tem-se um aumento no custo do processo proporcional ao tempo de permanência da madeira no secador.

Uma das alternativas que tem sido recomendadas para contornar esse inconveniente é a remoção da maior quantidade possível de água livre, antes de se iniciar a secagem convencional. Pressupõe-se que a pré-secagem ao ar, além de reduzir o tempo necessário para a posterior secagem artificial, também reduzirá a incidência dos defeitos normalmente observados nas fases iniciais do processo.

Buscando a confirmação desta hipótese, o presente trabalho teve como principal objetivo otimizar a secagem da madeira serrada de *Eucalyptus grandis* com 40 mm de espessura, através da combinação dos processos natural e convencional, visando a diminuição de custos do processo e a melhoria na qualidade dos produtos.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

Em qualquer processo de transformação da madeira em produtos, a secagem é a fase intermediária que mais valor agrega ao produto final.

Para Martins (1988), é o processo de redução do seu teor de umidade a fim de levá-la a um teor de umidade definitivo, com o mínimo de defeitos no menor tempo possível e de uma forma economicamente viável, para o uso a que se destina.

O teor de umidade existente no material influencia as suas propriedades físicas e mecânicas, bem como a possibilidade de ser atacada por insetos e fungos xilófagos, comprometendo muitas vezes o seu uso.

Somente o desconhecimento das características da madeira pode justificar o uso da madeira verde ou úmida, principalmente naqueles mais nobres, tais como móveis, esquadrias, lambris, assoalhos, instrumentos musicais, carrocerias de caminhão e outros produtos nos quais a madeira deve ser usinada, unida através de cola, pregada ou parafusada (Ponce & Watai, 1985).

### **2.1 Princípios da secagem de materiais porosos, capilares e higroscópicos**

Durante a secagem, a água se movimenta de zonas de alta umidade para zonas de baixa umidade, o que significa que a parte externa deve estar mais seca do que o interior da madeira, para que haja secagem (Ponce & Watai, 1985). Embora não explicado pelos autores, esse conceito é válido para os processos de secagem por convecção, independente do material a ser seco.

De acordo com Kollmann & Cotê (1968); Rosen (1983); Jankowsky (1995), durante o processo de secagem por convecção ocorrem três fases ou estágios distintos, ilustrados na Figura 1, caracterizados pela variação na taxa da perda de umidade e que determinam a curva característica de secagem do material.

No primeiro estágio ocorre taxa de secagem constante, com movimentação da água livre ou capilar até a superfície, provocada pelas forças de capilaridade.

Pela superfície ocorre o deslocamento de uma corrente de ar, caracterizando uma secagem por convecção. A energia (calor sensível) da corrente de ar é transferida para a superfície da madeira, promovendo a vaporização da água ali existente e que, no estado de vapor, é transferida para a corrente de ar. As condições externas exercem um grande efeito sobre o processo nessa fase, regulando a taxa de secagem desse período.

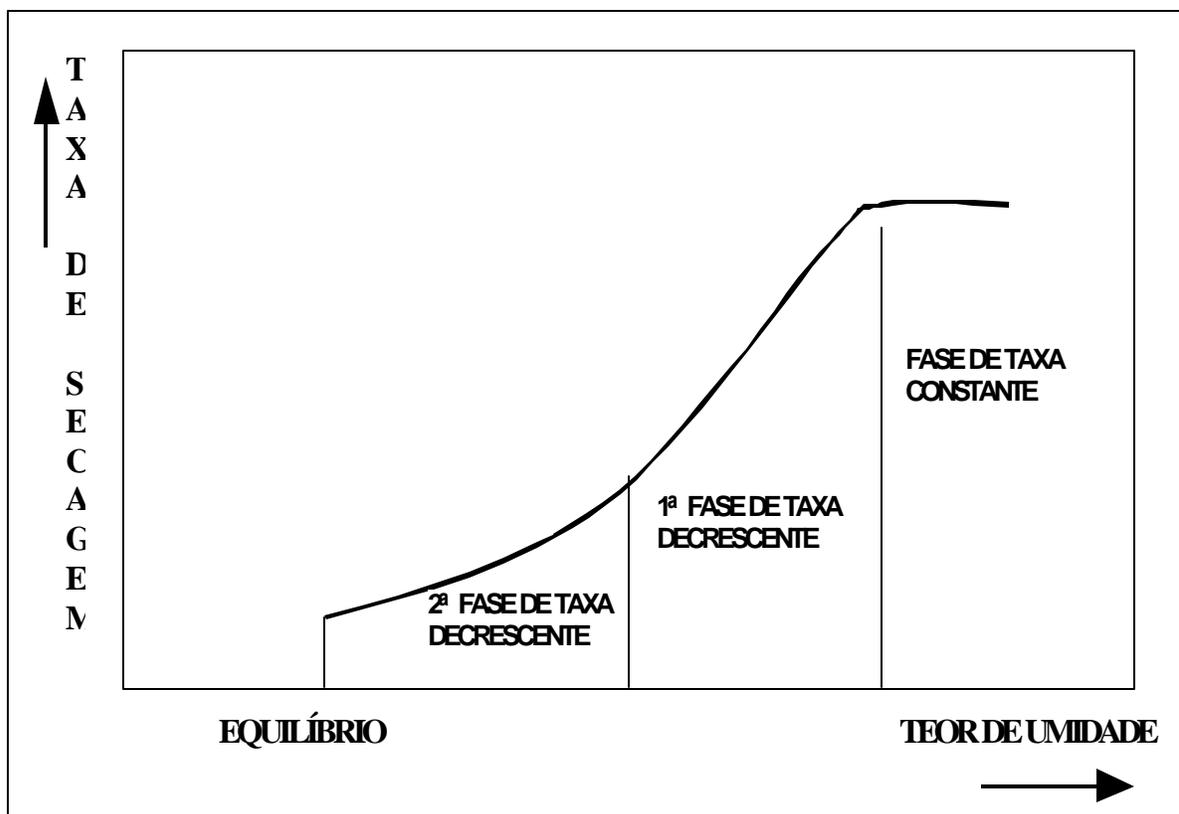
Parte da energia recebida pela superfície provocará o aumento da temperatura nessa região, iniciando a transferência de calor para o centro da peça.

No momento em que restrições ao fluxo capilar impedem que a água livre alcance a superfície da madeira, o teor de umidade nessa região

atinge o Ponto de Saturação das Fibras (PSF); caracterizando o início da primeira fase de taxa decrescente.

A madeira atinge um teor de umidade no qual a linha de evaporação da água se desloca em direção ao centro da peça. A vaporização da água presente na superfície irá gerar um gradiente de umidade, principalmente no sentido da espessura, dando início a movimentação da água do interior até a superfície por difusão; a qual também é influenciada pelo fluxo de calor que ocorre no sentido inverso.

Figura 1 - Curva característica de secagem para materiais porosos (Rosen, 1983).



A movimentação interna da água ocorre nas fases de líquido, de vapor e como água higroscópica (quimicamente ligada aos componentes da parede celular). A movimentação na fase líquida é fundamentalmente um

fenômeno de capilaridade, sendo afetado pela estrutura anatômica da madeira. A movimentação nas outras fases é basicamente um fenômeno difusivo, afetado não só pelas condições termodinâmicas da corrente de ar como também por características da própria madeira, tornando-se, esta última, significativa no controle da taxa de secagem.

No estágio final (segunda fase de taxa decrescente), iniciado quando a linha de evaporação de água restringe-se ao centro da peça, não há mais água livre no material e a taxa de secagem é regulada pelas características do material, até que o teor de umidade de equilíbrio seja alcançado.

## **2.2 Processos de secagem**

Diferente de outros materiais, a madeira serrada pode ser seca por diversos processos, tais como radio frequência, solar e alta temperatura, dentre outros. Os métodos mais usados são a secagem ao ar e a secagem convencional.

Sendo o método de secagem mais antigo, no processo ao ar livre a influência do homem é pequena, pois depende basicamente da temperatura, umidade relativa e velocidade do vento do 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 (Tomaselli, 1983).

Autores como Rasmussen (1968); Hildebrand (1970) e Pratt (1974), dentre outros, comentam que para uma efetiva utilização da secagem ao

ar há necessidade de atentar para a dependência de fatores da própria madeira, do pátio de secagem e das condições climáticas.

Destes o que pode ser mais facilmente controlado é o pátio, através de cuidados na escolha do local, preparo das pilhas, distância entre base das pilhas e solo, espaçamento entre pilhas, entabamento correto e proteção das pilhas; até como forma de garantir a qualidade do material, tornando o processo mais econômico e menos dispendioso.

Na secagem convencional, em secadores, tem-se total controle da temperatura, umidade relativa e velocidade do ar. Esse método é caracterizado por operar com temperaturas entre 35°C e 90°C , ter circulação forçada de ar e sistema para umidificação e troca de ar.

O objetivo principal da secagem artificial é promover o equilíbrio entre a velocidade de evaporação da água na superfície da madeira, a taxa de movimentação interna (tanto de calor como de umidade) e as reações da madeira durante o processo, de forma a tornar a secagem o mais rápida possível e com um nível de perdas ou um padrão de qualidade aceitável para o produto que se pretende.

Para se atingir esse objetivo é necessário não só o conhecimento sobre a termodinâmica da secagem como também sobre as características da madeira e sobre o funcionamento do secador (Jankowsky, 1995).

A secagem convencional é um método que possui reconhecida vantagem sobre a secagem ao ar. Entretanto, não é um método de secagem que possa ser indistintamente recomendado para todas as condições. Existem

alternativas disponíveis para cada tipo ou tamanho de indústria, tipo de madeira e localização da operação.

### **2.3 Programas de secagem**

Os programas de secagem consistem numa seqüência estudada de temperaturas e umidades relativas, visando reduzir rapidamente a umidade da madeira até um teor pré-determinado, com o menor número possível de defeitos (Galvão & Jankowsky, 1985).

Segundo Martins (1988), em um plano de secagem aplica-se a combinação correta de temperatura e umidade relativa à carga de madeira na estufa, no momento apropriado durante o processo de secagem, do qual obtém-se madeira seca com o mínimo de defeitos e no menor tempo possível.

No entanto, a redução do tempo é limitada pelas características da cada espécie de madeira, sendo que muitas só apresentam bons resultados quando submetidas a programas que produzem uma secagem lenta (Martins et al., 1997).

De acordo com Rasmussen (1968), os programas de secagem apresentam três fases distintas: aquecimento, secagem propriamente dita e uniformização.

O aquecimento tem como objetivo principal aquecer o sistema, sem iniciar a secagem, até a temperatura desejada no início do processo. A

superfície da madeira é aquecida primeiro, sem aquecimento interno, trabalhando-se com umidade relativa mais alta.

Decorrido o período de aquecimento, é iniciada a fase de secagem. Mantém-se a temperatura do bulbo seco da etapa anterior, reduzindo gradativamente a temperatura de bulbo úmido. No decurso do processo de secagem, a temperatura do bulbo seco é elevada gradativamente de acordo com o programa e em função do teor de umidade médio da carga, obtido das amostras de controle (Mendes et al., 1998).

A condução da secagem é realizada de maneira que sejam controlados, de modo independente, os três fatores primordiais para uma boa secagem: temperatura, umidade do ar e ventilação.

Para Hildebrand (1970), a variação no teor de umidade da madeira ao final da secagem deve-se a causas diferentes, como a umidade inicial desuniforme, a escolha incorreta da amostra de controle ou devido a qualidade das tábuas.

No final do processo, caso a variação de umidade entre as peças seja elevada, faz-se a uniformização; para que a diferença de umidade entre as peças mais seca e mais úmida esteja dentro do limite desejado.

Posteriormente, e havendo necessidade, pode-se efetuar o condicionamento, que tem a finalidade de equilibrar o teor de umidade dentro das peças, reumidificando a parte externa e aliviando as tensões de secagem.

Para espécies conhecidas, a indicação do programa de secagem pode ser feita com base nas informações contidas em Rasmussen (1968);

Hildebrand (1970); Pratt (1974); Boone et al. (1988) e Mendes et al. (1998), entre outros autores.

Para espécies não conhecidas é necessário estudar previamente o seu comportamento. Uma das alternativas é o ensaio de secagem drástica a 100°C.

Este ensaio relaciona os defeitos decorrentes, como rachaduras em diferentes graus, com a velocidade de secagem. Como resultado são obtidas as temperaturas inicial e final do programa de secagem, bem como o potencial de secagem. Após a análise dos resultados é possível sugerir um programa adequado para a espécie (Brandão, 1989).

Jankowsky et al.<sup>1</sup>, aprimoraram o método da secagem drástica a 100°C, definindo os defeitos e as características que mais interferem na elaboração dos programas, bem como a elaboração de equações para a estimativa dos parâmetros de secagem; sendo as rachaduras de topo e a taxa de secagem as variáveis de maior importância.

## 2.4 Defeitos de secagem

Os defeitos que geralmente aparecem durante a secagem da madeira, podem ser em consequência do processo de secagem ou decorrentes das características da madeira.

De acordo com Vermaas (1998a), a estrutura anatômica da madeira limita a movimentação interna de água, e isto, adicionado a tendência do

---

<sup>1</sup> JANKOWSKY, I.P.; BILIA, F.A.C.; DUCATTI, M. A. **Ensaio rápido para a determinação de programas de secagem**. Relatório técnico CNPq 510555/93-4. Piracicaba. 1997. 12p.

material para o desenvolvimento de tensões durante o processo, pode ocasionar vários defeitos.

A maioria desses defeitos aparece durante ou após a secagem, podendo ser classificados como defeitos devido a retração diferencial entre a superfície e o centro da peça ou defeitos decorrentes da retração anisotrópica do material madeira.

Brandão (1989), salienta que, geralmente, a diferença entre a velocidade de evaporação da umidade superficial e a velocidade de translocação da umidade interna para as zonas superficiais, resulta no aparecimento da grande maioria dos defeitos da madeira durante o processo de secagem.

Segundo Martins (1988), os defeitos causam significativos prejuízos para quem seca madeira, levando a desestimular a utilização de determinadas espécies susceptíveis, contribuindo para a exploração seletiva e o reduzido número de espécies atualmente comercializadas.

Os mais importantes defeitos de secagem podem ser agrupados em quatro categorias: o colapso, as rachaduras, o endurecimento superficial, e os empenamentos.

O colapso ocorre acima do PSF, durante a movimentação da água capilar. É caracterizado por uma contração anormal e desuniforme, com ondulações nas superfícies da peça, as quais podem apresentar-se bastante distorcidas. É diretamente proporcional à temperatura utilizada no início do processo, cujo aumento torna o material mais plástico, diminui sua resistência a compressão e possibilita o esmagamento interno das células (Kollmann & Cotê, 1968). Como o colapso é causado por tensões capilares, a incidência desse

defeito está vinculada a existência de água livre na madeira. Portanto, abaixo do PSF é nula a possibilidade de ocorrência deste tipo de problema.

Cavalcante (1991), explica que o colapso não ocorre dentro de uma mesma condição morfológica que a retração. Segundo o autor, a retração considerada normal da madeira é baseada na combinação das contrações lineares manifestadas nas direções tangencial, longitudinal e radial; não envolvendo a deformação das células e sempre ocorrendo abaixo do Ponto de Saturação das Fibras (PSF). O colapso caracteriza-se por uma retração anormal da madeira, e ocorre mais em função das características físicas e anatômicas da própria madeira do que em função do processo de secagem.

Para Galvão & Jankowsky (1985), os fatores que influem no colapso são:

- pequeno diâmetro dos capilares;
- altas temperaturas no início da secagem;
- baixa densidade da madeira;
- alta tensão superficial do líquido que é removido da madeira.

De acordo com Blumhm & Kaumann<sup>2</sup>, citados por Rozas & Tomaselli (1993), o colapso se apresenta com maior intensidade no cerne, devido a obstrução dos vasos por tilose. Essa obstrução limita o fluxo capilar e as pequenas pontoações das fibras geram altas tensões capilares, capazes de superar a resistência da parede celular a compressão e ocasionando o colapso na madeira. Este defeito é maior na direção tangencial que na direção radial, da mesma forma que o colapso é mais forte no lenho inicial do que no lenho tardio,

---

<sup>2</sup> BLUMHM, E.; KAUMAN, W. G. **El colapso en la madera y su reacondicionamento**. Santiago: Instituto Forestal, 1965. (Informe Técnico, 22)

pois as fibras do lenho inicial são mais finas e de menor resistência a compressão.

Segundo considerações feitas por Vermaas (1998a), o colapso ocorre primordialmente devido à rápida remoção da água capilar a altas temperaturas nos estágios iniciais de secagem, estando associado ao endurecimento superficial e a rachaduras.

A localização das rachaduras é basicamente no topo e na superfície das peças, cuja incidência verifica-se principalmente durante as primeiras fases da secagem. Posteriormente, podem surgir as rachaduras internas ou favos de mel, que só podem ser vistas no interior das peças mediante o seccionamento transversal das mesmas.

De acordo com Galvão & Jankowsky (1985), as rachaduras aparecem como consequência da diferença de retração nas direções radial e tangencial da madeira, e de diferenças de umidade entre regiões contíguas da mesma peça, durante o processo de secagem. Essa diferença leva ao aparecimento de tensões que tornam-se superiores a resistência dos tecidos lenhosos, provocando a ruptura da madeira.

Rachaduras superficiais são falhas que usualmente ocorrem nos raios da madeira, por toda a face lateral da peça, podendo ocorrer, também, nos dutos resiníferos. Ocorrem geralmente nos estágios iniciais da secagem, sendo neste caso associadas com a umidade relativa, mas situações em que a incidência do defeito prolonga-se ao longo do processo indicam severas condições de secagem (Rasmussen, 1968).

De acordo com Kollmann<sup>3</sup>, citado por Brandão (1989), as rachaduras internas ou em favos de mel aparecem principalmente em madeiras duras, que foram secas a temperaturas excessivamente elevadas, provocando tensões de secagem superiores a resistência a tração transversal.

Nos primeiros estágios da secagem as camadas superficiais secam mais rapidamente, atingindo níveis de umidade abaixo do PSF, enquanto que as camadas internas secam mais lentamente. Como consequência, as camadas superficiais tendem a se retrair, porém essa retração está limitada pela parte interna que se mantém acima do PSF. Nesse momento, células da superfície estão sujeitas a tensão de tração, enquanto que no interior das peças está ocorrendo a tensão de compressão (Galvão & Jankowsky, 1985).

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

As rachaduras internas ocorrem quase que exclusivamente na secagem artificial, podendo ser também resultado de rachaduras que fecharam na superfície. Uma vez desenvolvidas não podem ser eliminadas e na grande maioria dos casos, a madeira não poderá ser utilizada.

As tensões de secagem, que são tensões internas decorrentes da contração diferenciada dentro de uma mesma peça, causam não apenas as rachaduras como também o endurecimento superficial; que é caracterizado pela

---

<sup>3</sup> KOLLMANN, F. **Investigation sobre las origenes de los defectos de secado de madera de roble verde**. Estocolmo: Traforskninginstitut, 1950. 21p

deformação permanente (não elástica) das fibras superficiais por tensão de compressão.

Os empenamentos, por sua vez, são definidos como qualquer distorção da peça de madeira em relação aos planos originais de sua superfície (Galvão & Jankowsky, 1985).

Os empenamentos estão relacionados com as características anatômicas da madeira, tais como grã espiralada, diferença entre a variação dimensional nos sentidos radial e tangencial, diferenças entre madeira juvenil e adulta, bem como diferenças entre lenho inicial e tardio (Brandão, 1989).

Para Martins (1988) há cinco formas de empenamentos: encanoamento, torcimento, encurvamento (empenamento longitudinal), arqueamento e forma de diamante. A Figura 2 ilustra os tipos de empenamentos e outros defeitos que ocorrem durante a secagem.

Ponce & Watai (1985); Gomide (1973) e Galvão & Jankowsky (1985), definem o empenamento longitudinal como sendo uma curvatura da peça no eixo em questão (sentido do comprimento) e em relação a superfície de maior dimensão.

Segundo Martins (1988), a causa do arqueamento é a diferença na contração longitudinal entre laterais da mesma peça da 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 característica de peças com seção quadrada, sendo resultado da diferença entre

as contrações tangencial e radial, quando os anéis de crescimento vão, diagonalmente, de um canto ao outro da seção

De acordo com Gomide (1973) e Galvão & Jankowsky (1985), o encanoamento pode ocorrer quando a secagem de uma face é mais rápida ou quando 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 (radial ou tangencial).

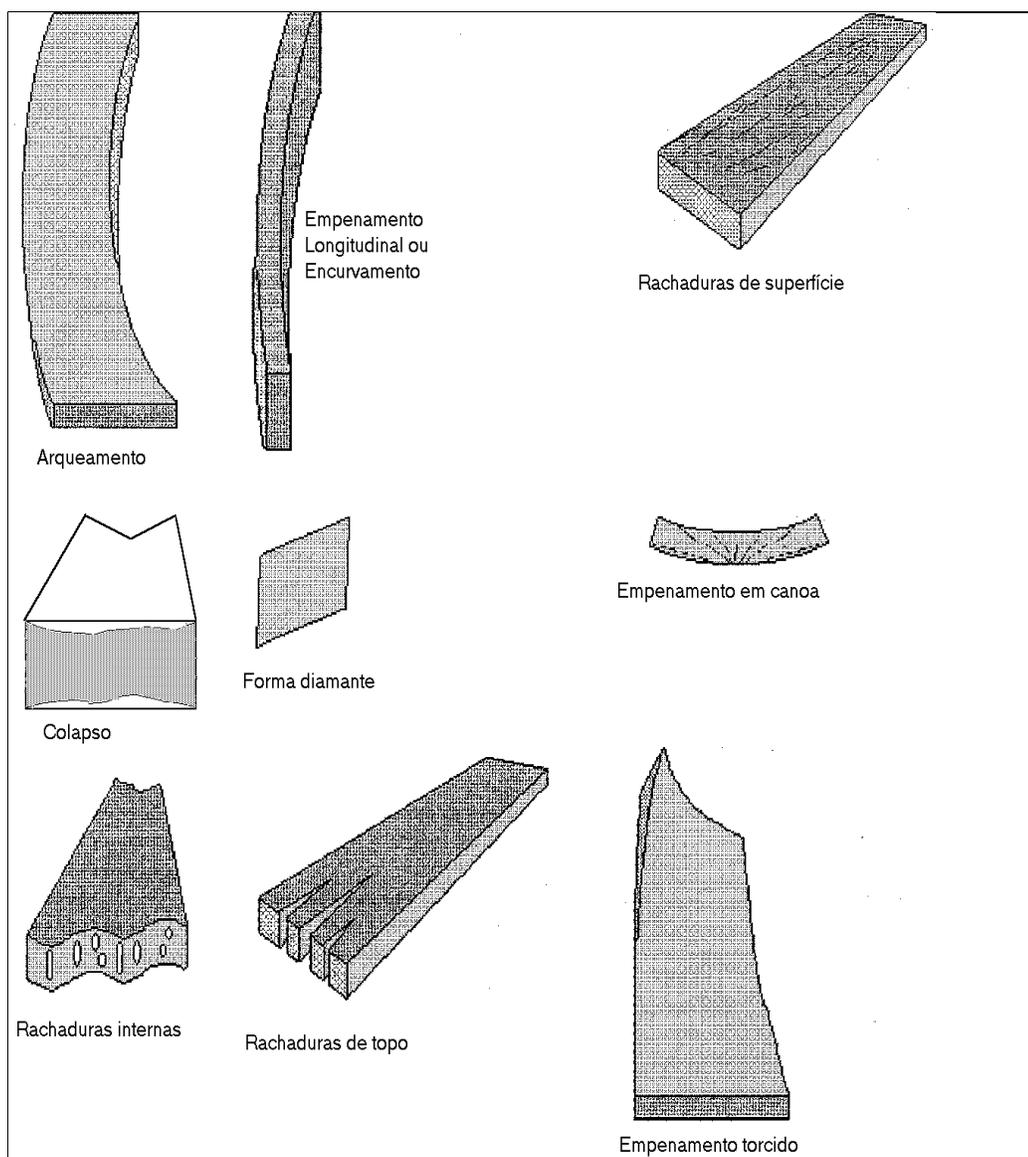


Figura 2 – Ilustrando os principais defeitos de secagem (Pratt, 1974).

O empenamento torcido pode ter as mesmas causas do encanoamento, ocorrendo também, pela combinação de diferentes contrações e desvios de grã, como a disposição espiralada das fibras, que é característico de certas espécies de Eucaliptos (Gomide, 1973).

## **2.5 A Secagem da madeira de Eucalipto**

A madeira de Eucalipto tem sido pouco aproveitada para produtos serrados e laminados. Isso deve-se, em parte, a características desfavoráveis, como as tensões de crescimento e a elevada retratibilidade, o que produz defeitos de secagem como empenamentos e colapso, quando usados programas de secagem severos (Rozas & Tomaselli, 1993; Vermaas, 2000).

Por se tratar na grande maioria de matéria-prima proveniente de plantações de ciclo curto (Jankowsky, 1995), há necessidade de secar madeira jovem; obtida de árvores de menor diâmetro e que resultam em uma fração considerável de madeira tangencial, bastante propensa a rachar (Neumann, 1989).

De acordo com Ponce (1995), o eucalipto apresenta algumas características que realmente dificultam seu aproveitamento, não sendo estas dificuldades maiores do que da maioria das outras madeiras.

A madeira de eucalipto tem, como característica, uma variação acentuada de umidade entre espécies. Conforme comprovam estudos feitos por Oliveira (1997), espécies como *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus paniculata* se destacam nitidamente pela distribuição mais uniforme do teor de umidade, tanto

na direção radial quanto ao longo do tronco. O diferencial de umidade entre as regiões internas do fuste e periferia, nessas duas espécies, raramente ultrapassa 20%. Já para espécies como *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*, estes valores em determinadas situações chegam a 80%.

A distribuição desuniforme da umidade na direção radial da madeira e uma estrutura anatômica peculiar, com predomínio de pontoações de pequenos diâmetros, são os principais fatores responsáveis tanto pela dificuldade de secagem como pela propensão ao aparecimento dos defeitos inerentes ao processo de secagem.

Vermaas (1995), salienta que a madeira de Eucalipto geralmente seca devagar, apresentando defeitos característicos como o colapso, alta contração, gradiente de umidade, superfícies rachadas; e que associadas a pronunciadas tensões de crescimento resultam numa perda significativa de madeira. O mesmo autor (Vermaas, 1998b), comenta que os empenamentos podem ser reduzidos através do empilhamento adequado, da restrição mecânica e com a vaporização no final da secagem. As rachaduras de topo, que são comentadas como um dos maiores fatores de perda de material, podem ser mínimas durante a secagem, e as de superfície não contribuem significativamente para perdas em madeira de *Eucalyptus grandis*.

Campbell & Hartley (1988), trabalhando com *Eucalyptus pilularis*, observaram colapsos irreversíveis e severos, ocorrendo em associação com rachaduras, em uma zona próxima a medula. Citam que esse comportamento pode ocorrer também em outras espécies, e recomendam a exclusão da região próxima a medula para produção de madeira sólida.

Segundo Cavalcante (1991), o tratamento com vaporização permite recuperar a madeira colapsada. Jankowsky & Cavalcante (1992), desenvolvendo pesquisas com *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*, concluíram que o *Eucalyptus grandis* é menos susceptível ao colapso que o

*Eucalyptus saligna*, podendo ser parcialmente recuperado através de condicionamento com altas temperatura e umidade relativa. O condicionamento de madeiras com colapso só não é possível quando se desenvolvem rupturas no tecido lenhoso (Kollmann & Cotê, 1968).

Rozas & Tomaselli (1993), empregando um programa de secagem para *Eucalyptus viminalis*, com uma vaporização inicial, uma intermediária e uma final, concluíram que a vaporização reduz significativamente as tensões internas e a taxa de secagem (redução de tempo), tendo pequeno efeito prático nas propriedades físicas e mecânicas. Constataram que é perfeitamente possível obter material de boa qualidade, desde que se tenha equipamento adequado e um perfeito controle do processo.

Aprimorar o uso do Eucalipto envolve práticas adequadas de beneficiamento, com rápida conversão das toras em tábuas; a rápida transferência de madeira serrada, ainda úmida, para local coberto, protegendo a superfície e topo na secagem ao ar; o uso combinado de pré-secagem ao ar com a secagem convencional ou a pré-secagem em pré-secadores com posterior secagem convencional quando há necessidade de acelerar processo (Campbell & Hartley, 1988). Adicionalmente, Andrade (2000), salienta a necessidade de considerar as características específicas de cada espécie, como o teor de umidade inicial, a velocidade de secagem e a tendência aos defeitos.

Segundo Stöhr (1977), a secagem em estufa é mais eficiente quando se está operando com suas condições de temperatura máxima desejada e baixa umidade relativa, para acelerar a taxa de evaporação de umidade da madeira. Porém para espécies como *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* a capacidade de secagem da estufa não pode ser utilizada devido a possibilidade de desenvolvimento de colapso e rachaduras na madeira.

Para estas espécies é recomendável o uso de um baixo potencial de secagem e de temperaturas iniciais que não excedam a 45°C, principalmente

nos estágios iniciais de secagem, conforme preconizam autores como Pratt (1974); Northway (1996); Ciniglio (1998); Martins et al. (1999) e Andrade (2000).

Portanto, a secagem convencional seria o método mais eficaz, desde que seja adotado um programa suave e que resulte em uma secagem lenta. Esta limitação implica em tempos de secagem (permanência da madeira no secador) que tornam o processo anti-econômico, principalmente quando há necessidade de secar grandes volumes de madeira.

Como alternativa para reduzir o tempo de permanência da madeira no secador, diversos autores (Stöhr, 1977; Campbell & Hartley, 1988; Northway, 1996; Ciniglio, 1998), tem sugerido como métodos aplicáveis a madeira de *Eucalyptus grandis* o uso da pré-secagem ou a combinação da secagem ao ar com posterior secagem convencional. Esta combinação proporcionaria redução de custos e otimização do processo, através da maior operacionalidade dos secadores.

Ciniglio (1998), trabalhando com madeira serrada de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, e realizando isoladamente secagens ao ar e convencional, sugere a combinação de pré-secagem ao ar em local coberto, até o PSF, seguida de secagem convencional.

Northway (1996), recomenda inicialmente a secagem de Eucaliptos ao ar, com proteção da chuva, durante as 2 ou 4 primeiras semanas, seguida de secagem convencional suave, com umidade relativa próxima de 90% e velocidade do ar baixa (menor que 0,5 m/s); e com condicionamento aplicado após a uniformização para diminuir as tensões de secagem.

Franzoni (2001), descrevendo a utilização do Eucalipto na produção de móveis, relata como procedimento a pré-secagem ao ar até um teor de umidade entre 30% e 40%, seguida de secagem convencional.

Objetivando otimizar o processo de secagem da madeira de *Eucalyptus grandis*, Jankowsky et al.<sup>4</sup>, realizaram experimentos com madeira recém cortada submetida diretamente à secagem convencional e envolvendo o uso de pré-secagem ao ar em locais coberto e descoberto, com posterior secagem convencional.

O estudo mostrou que a pré-secagem realizada em ambiente coberto, combinada com posterior secagem convencional, apresentou os melhores resultados. Segundo a conclusão dos autores, a pré-secagem em local coberto é preferível, pois propiciou secagem mais uniforme e melhor qualidade do que a madeira úmida colocada diretamente na estufa.

Apesar da aceitação generalizada que a literatura registra sobre os efeitos positivos da pré-secagem na qualidade da madeira serrada, não há concordância entre os autores sobre o teor de umidade a partir do qual a madeira deveria ser submetida a secagem convencional. Stöhr (1977), considera que esse teor estaria entre 20% e 25% de umidade. Campbell & Hartley (1988), relatando trabalhos de vários autores, consideram que a madeira deveria secar ao ar até atingir uma umidade em torno de 30%; enquanto que Northway (1996), recomenda a secagem natural até umidades entre 40% e 50%.

---

<sup>4</sup> JANKOWSKY, I. P.; DUCATTI,, M. A.; ANDRADE, A. **Avaliação da secagem da madeira de *Eucalyptus grandis*** . Convênio FIPA/FINEP 63960691-00. Relatório Final. Piracicaba. 1998.15p.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

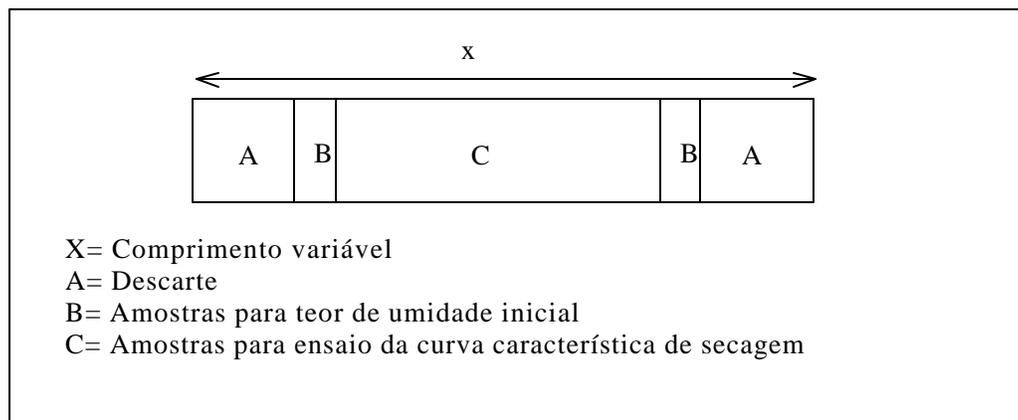
Neste trabalho foi utilizada madeira serrada de *Eucalyptus grandis*, fornecida pela empresa CAF – Companhia Agro-Florestal Santa Bárbara Ltda. A matéria-prima foi proveniente de florestas com 16 anos de idade, localizadas no município de Martinho Campos - MG.

#### **3.1 Determinação da curva característica de secagem**

Considerando que o momento mais adequado para encerrar a pré-secagem e iniciar a secagem convencional é quando a madeira atinge o teor de umidade correspondente a transição da 1<sup>a</sup> para a 2<sup>a</sup> fase de taxa de secagem decrescente, foi determinada a curva característica de secagem para o material em estudo.

A partir de 20 tábuas coletadas ao acaso foram cortadas amostras conforme esquema da Figura 3, com dimensões 490 x 80 x 20 mm, comprimento, largura e espessura respectivamente.

O ensaio foi conduzido em um secador Hildebrand modelo HD 4004, com controle automático, mantendo-se o meio de secagem constante com temperatura de 35°C, umidade de equilíbrio de 14% e velocidade do ar de 1,2 m/s.



**Figura 3 – Esquema de corte das amostras destinadas ao ensaio da curva característica de secagem.**

As amostras foram distribuídas dentro do secador em 2 colunas com 10 peças cada, utilizando-se separadores com 13 mm de espessura. A perda de massa foi acompanhada por pesagens periódicas até que o teor de umidade da madeira estivesse próximo ao teor de umidade de equilíbrio (14%) do meio de secagem.

Após o término do ensaio as amostras foram secas, em estufa sem ventilação de ar, a 103°C(±2) até atingir peso constante, para determinação da massa anidra. A taxa de secagem foi calculada com a equação (1).

$$ts = \frac{Dm_{\text{água}}}{Dt} \quad (1)$$

onde:  $ts$ = taxa de secagem (g/h)

$Dm_{\text{água}}$ = variação da massa de água (g)

$Dt$ = variação de tempo (h) em que ocorreu  $Dm_{\text{água}}$

### 3.2 Preparação do programa de secagem

Para o ensaio de secagem drástica a 100°C foram utilizadas 5 tábuas coletadas ao acaso, tirando-se de cada tábua 5 amostras nas dimensões 10 x 50 x 100 mm (que foram utilizadas para a secagem a 100°C) e 10 amostras nas dimensões 10 x 50 x 50 mm (determinação do teor de umidade inicial e da densidade básica), conforme ilustrado na Figura 4.

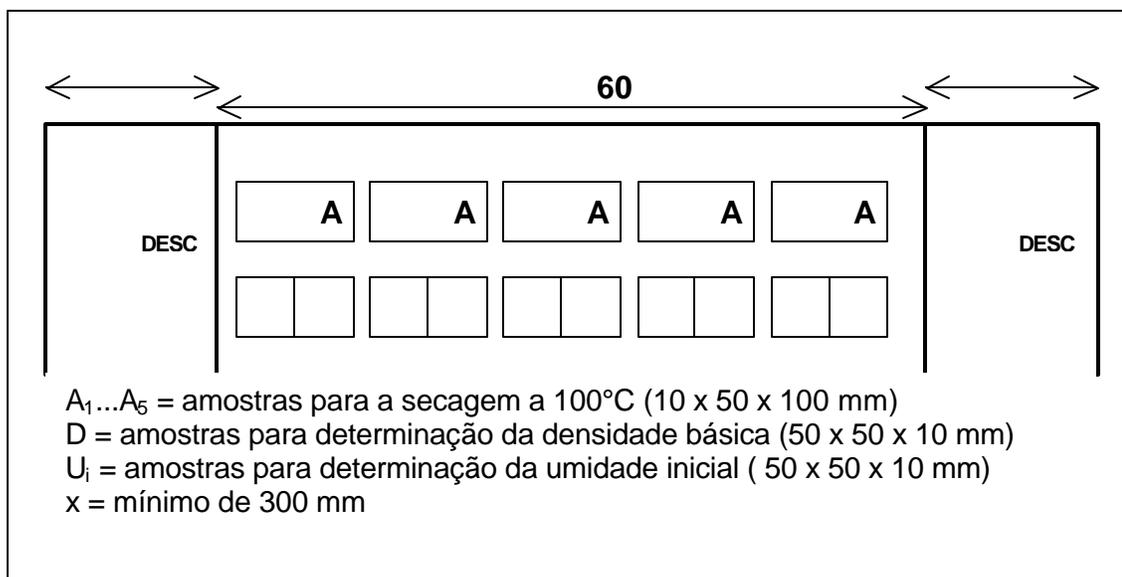


Figura 4 - Retirada das amostras para determinação do programa de secagem.

- Cálculo da umidade inicial

Para determinação do teor de umidade inicial foi utilizado o método gravimétrico, equação (2), descrito em vários manuais de secagem (Rasmussen, 1968; Galvão & Jankowsky, 1985), no qual as amostras úmidas são submetidas à secagem em estufa a 103°C(±2), até que seja alcançada massa constante.

$$TU_i = \frac{m_i - m_f}{m_f} \times 100 = \quad (2)$$

onde:  $TU_i$  = teor de umidade inicial (%)  
 $m_i$  = massa inicial da amostra (g)  
 $m_f$  = massa anidro da amostra (g)

•Cálculo da densidade básica

A densidade básica foi determinada pelo método da balança hidrostática, descrito por Barrichello (1983), e expressa pela equação (3).

$$DB = \frac{m_s}{m_u - m_i} \times 100 = \quad (3)$$

onde:  $DB$  = densidade básica ( $g/cm^3$ )  
 $m_s$  = massa da amostra seca até massa constante (g)  
 $m_u$  = massa da amostra saturada (g)  
 $m_i$  = massa da amostra imersa (g)

•Ensaio a  $100^{\circ}C$  (indicação preliminar do programa de secagem)

A indicação preliminar do programa de secagem adotou a metodologia descrita por Jankowsky et al.<sup>5</sup> e Ciniglio (1998).

As amostras de 10 x 50 x 100 mm foram submetidas a secagem drástica ( $100^{\circ}C$ ), em estufas de laboratório, sem sistema de circulação de ar, quantificando-se os defeitos e as taxas de umidade durante o ensaio (Tabela 1).

---

<sup>5</sup> JANKOWSKY, I.P.; BILIA, F.A.C.; DUCATTI, M. A. **Ensaio rápido para a determinação de programas de secagem**. Relatório técnico CNPq 510555/93-4. Piracicaba. 1997. 12p.

Tabela 1. Variáveis a serem analisadas no ensaio a 100°C.

VARIÁVEL	DESCRIÇÃO	FAIXA UMIDADE	UNIDADE
T <sub>1</sub>	Tempo de secagem	Ui a 5%	Hora
T <sub>2</sub>	Tempo de secagem	Ui a 30%	Hora
T <sub>3</sub>	Tempo de secagem	30 a 5%	Hora
V <sub>1</sub>	Velocidade de secagem	Ui a 5%	g/cm <sup>2</sup> .hora
V <sub>2</sub>	Velocidade de secagem	Ui a 30%	g/cm <sup>2</sup> .hora
V <sub>3</sub>	Velocidade de secagem	30 a 5%	g/cm <sup>2</sup> .hora
R <sub>1</sub>	Rachadura de topo	Ui a 5%	(escore)
R <sub>2</sub>	Rachadura de topo	30 a 5%	(escore)
R <sub>3</sub>	Rachadura de topo	30 a 5%	(escore)

Durante o ensaio a perda de massa das amostras foi acompanhada através da pesagem em balança analítica, com precisão de 0,01g.

A evolução das rachaduras de topo foi quantificada de 2 em 2 horas, durante as 12 primeiras horas de ensaio, e posteriormente, a cada 3 horas, até as amostras atingirem 5% de umidade. A quantificação consistiu em medir o comprimento e a largura das rachaduras de topo, com o auxílio de paquímetro e de lâminas calibradoras graduadas de 0,05 a 1,0 mm.

A partir das dimensões do comprimento e largura das rachaduras foram atribuídas notas, empregando o escore da Tabela 2.

Tabela 2. Escore atribuído aos defeitos de secagem.

ESCORE	RACHADURA DE TOPO	COLAPSO
NOTA 1	AUSENTE	AUSENTE
NOTA 2	CR < 5,0 e LR < 0,5	$\Delta e < 0,25$
NOTA 3	CR > 5,0 e LR < 0,5	$0,25 > \Delta e < 0,5$
NOTA 4	CR < 5,0 e $0,5 > LR > 1,0$	$0,5 > \Delta e < 1,0$
NOTA 5	CR > 5,0 e $0,5 > LR < 1,0$	$\Delta e > 1,0$
NOTA 6	CR > 5,0 e LR > 1,0	–

Onde: CR = Comprimento da rachadura (mm)

LR = Largura da rachadura (mm)

$\Delta e$  = Variação da espessura da amostra (mm)

As velocidades de secagem foram calculadas de acordo com as equações (4) a (6).

$$V_1 = \frac{m_v - m_5}{100 T_1} \quad (4)$$

onde:  $V_1$  = velocidade de secagem até 5% de umidade ( $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{hora}$ )

$m_v$  = 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 ( $\text{cm}^2$ )

$$V_2 = \frac{m_v - m_{30}}{100 T_2} \quad (5)$$

onde:  $V_2$  = velocidade de secagem até 30% de umidade ( $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{hora}$ )

$m_v$  = massa da amostra úmida (umidade inicial) (g)

$m_{30}$  = massa da amostra a 30% de umidade (g)

$T_2$  = Tempo de secagem da umidade inicial até 30% (h)

100 = Área superficial da amostra (cm<sup>2</sup>)

$$V_3 = \frac{m_{30} - m_5}{100 T_3} \quad (6)$$

onde:  $V_3$  = velocidade de secagem de 30 a 5% de umidade (g/cm<sup>2</sup>.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 a 5% de umidade (h)

100 = Área superficial da amostra (cm<sup>2</sup>)

Com os valores médios das variáveis da Tabela 1 foram definidos os principais parâmetros dos programas de secagem, ou seja, a temperatura inicial (Ti), a temperatura final (Tf) e o potencial de secagem (PS), através das equações mostradas na Tabela 3.

Tabela 3. Equações para estimativa dos parâmetros de secagem.

PARÂMETRO	EQUAÇÃO			
Ti =	27,9049 +	0,7881 T <sub>2</sub> +	419,0254 V <sub>1</sub> +	1,9483 R <sub>2</sub>
Tf =	49,2292 +	1,1834 T <sub>2</sub> +	273,8685 V <sub>2</sub> +	1,0754 R <sub>1</sub>
PS =	1,4586 -	30,4418 V <sub>3</sub> +	42,9653 V <sub>1</sub> +	0,1424 R <sub>3</sub>

•Tendência ao colapso

O ensaio a 100°C permitiu, também, estimar a tendência da madeira ao colapso. Ao final do ensaio as amostras foram cortadas ao meio (no sentido do comprimento) e medidas as espessuras nas laterais e na parte

colapsada (Figura 5). A diferença encontrada foi utilizada para atribuição de notas, de acordo com o escore da Tabela 2

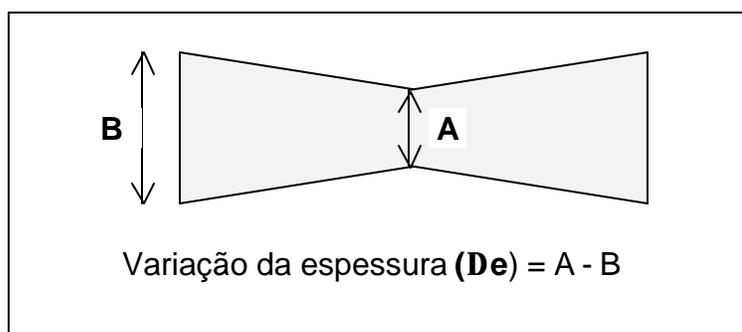


Figura 5 - Medição de colapso (Brandão, 1989).

### 3.3 Secagem convencional em laboratório

A avaliação do programa selecionado foi realizada através da secagem convencional de uma carga de madeira, em laboratório, usando-se o secador Hildebrand modelo HD 4004, controle automático e capacidade para 0,1 m<sup>3</sup> de madeira serrada.

O processo foi acompanhado de acordo com as recomendações dos manuais de secagem (Pratt, 1974; Galvão & Jankowsky, 1985), com quatro amostras para controle da perda de massa e seis amostras para controle de umidade por resistência elétrica (medidor de umidade).

A análise do programa utilizado compreendeu avaliação da distribuição da umidade entre e dentro das peças ao final do processo de secagem, a duração do processo e a ocorrência de defeitos.

Os empenamentos foram quantificados e classificados, antes e após a secagem, utilizando-se os valores da Tabela 4 como critérios de classificação.

Tabela 4. Critérios de classificação dos empenamentos.

EMPENAMENTOS	MAGNITUDE		
	LEVE	MÉDIO	FORTE
arqueamento (mm)	$a \leq 2,5$	$2,5 < a \leq 5$	$a > 5$
encanoamento (mm)	$c \leq 4$	$4 < c \leq 6$	$c > 6$
encurvamento (mm)	$e \leq 2,5$	$2,5 < e \leq 5$	$e > 5$
torcimento (mm)	$t \leq 2,5$	$2,5 < t \leq 5$	$t > 5$

Onde: a = arqueamento ; c = encanoamento ; e = encurvamento ; t = torcimento

Fonte: Martins, 1986.

As rachaduras foram quantificadas e classificadas em função do comprimento da rachadura (R) (Tabela 5), sendo considerada a soma das maiores rachaduras e o comprimento total das rachaduras de superfície nos extremos (rachaduras de topo). O colapso foi quantificado, nas avaliações, como ausente ou presente.

Tabela 5. Classificação das rachaduras após secagem convencional.

CLASSIFICAÇÃO DAS RACHADURAS	MAGNITUDE
$CR \leq 50$ mm	PEQUENA
$50$ mm $< CR \leq 200$ mm	MÉDIA

CR > 200 mm

FORTE

Onde: CR = Comprimento da rachadura

Fonte: Silva et al, 1997.

A distribuição do teor de umidade foi avaliada aplicando-se o método gravimétrico, em corpos de prova retirados conforme os esquemas das Figuras 6 (amostragem geral) e 7 (distribuição externa e interna de umidade).

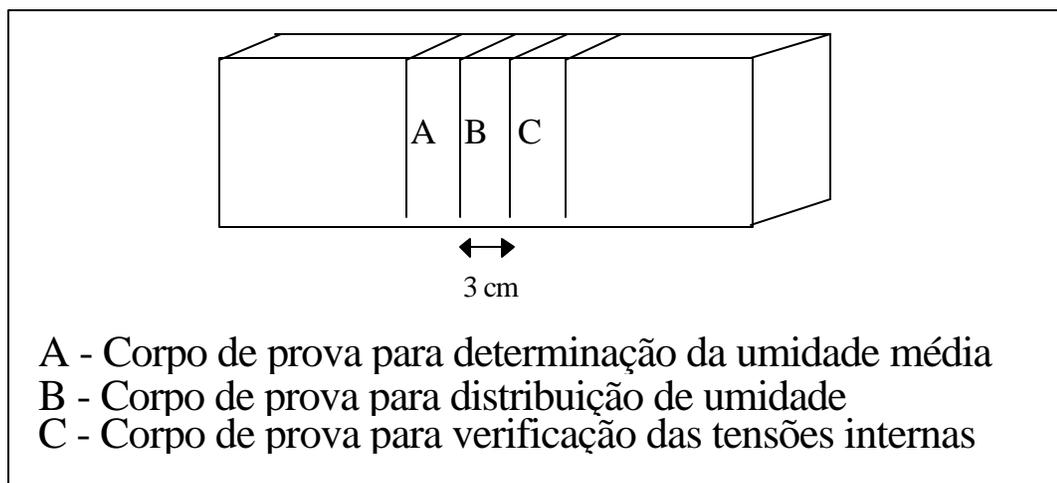


Figura 6 - Retirada de amostras para avaliação da secagem (Galvão & Jankowsky, 1985).

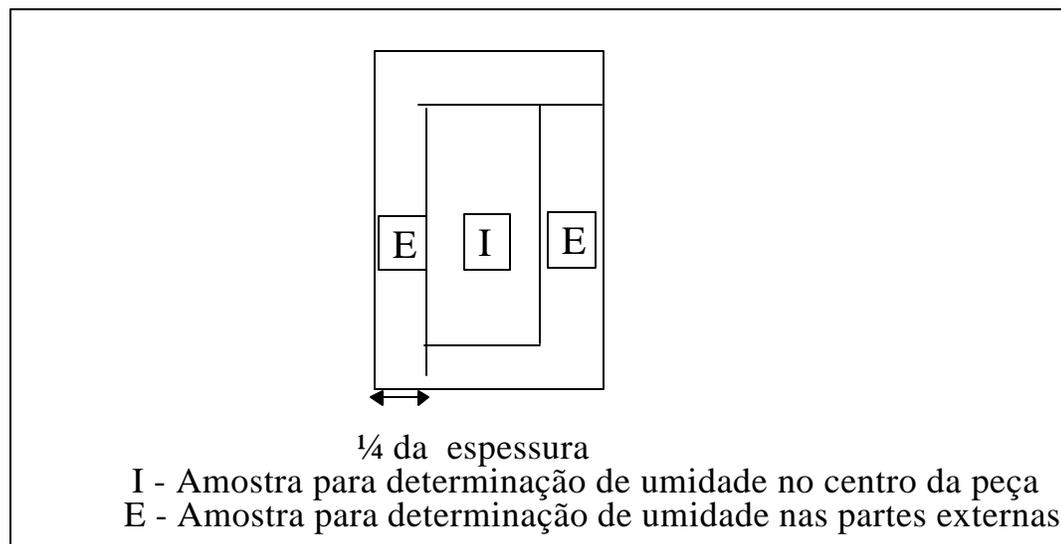


Figura 7 - Esquema de corte da amostra B (Figura 5), para verificação da distribuição do teor de umidade (Rasmussen, 1968).

A existência de tensões residuais ou endurecimento superficial foi avaliada através do “teste do garfo”. As amostras foram retiradas como mostra a Figura 6-C e a classificação de acordo com o esquema da Figura 8.

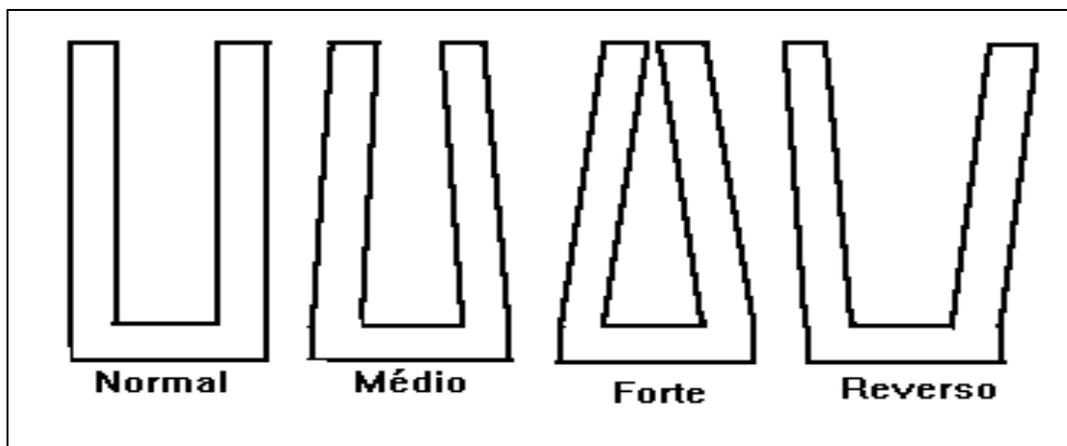


Figura 8 - Classificação das amostras após o "teste do garfo". (Pratt, 1974).

A frequência de cada defeito foi calculada em relação ao número total de tábuas, e classificada segundo a Tabela 6.

Tabela 6. Critérios para classificação dos defeitos de secagem .

Amostras testes que apresentaram defeitos (%)	Tendência
0 a 10	Ausente
11 a 30	Pequena
31 a 50	Moderada
51 a 100	Grande

Fonte : BRASIL, 1988.

### 3.4 Secagem combinada

A secagem combinada consistiu da secagem natural, seguida da secagem convencional, de uma carga com 60 m<sup>3</sup> de madeira serrada, equivalente a uma produção aproximada de 4200 peças.

A quantificação dos defeitos (rachaduras e empenamentos), foi realizada em 5% do total de peças, (denominadas **amostras de qualidade**), que totalizaram 215 peças com 3000 mm de comprimento, 40 mm de espessura e largura variável de 150 a 180 mm.

As amostras foram numeradas, identificadas e quantificadas quanto aos tipos de defeitos existentes em três fases do processo, isto é, antes do início da pré-secagem, após o encerramento da pré-secagem e ao término da secagem convencional.

Tanto os empenamentos como as rachaduras foram quantificadas e classificadas usando os mesmos critérios adotados na avaliação da secagem convencional em laboratório (item 4.3). O colapso e o encanoamento foram quantificados como presente ou ausente.

As amostras de qualidade, após serem inspecionadas, foram distribuídas nas pilhas, posicionadas nas camadas correspondentes ao terço inferior, a metade e ao terço superior da pilha (Figura 9).

Nas pilhas contendo as amostras de qualidade foram colocadas amostras para acompanhamento da perda de umidade, tanto por perda de massa (6 amostras) como com medidor elétrico do tipo resistência (2 amostras). Esse acompanhamento seguiu a metodologia tradicional descrita por Rasmussen (1968); Pratt (1974) e Galvão & Jankowsky (1985).

A pré-secagem foi realizada na própria CAF. As pilhas foram montadas com separadores de 25 x 25 mm na pilha e de 40 x 40 mm entre pilhas (sentido da altura). A disposição no pátio seguiu o procedimento padrão da empresa, com distâncias entre pilhas de 600 mm nas laterais e 60 mm nos extremos. Ao redor do material do ensaio foram colocadas pilhas para evitar efeito de bordadura, e todo o lote foi então coberto com lona plástica.

A secagem ao ar foi encerrada quando o teor de umidade estava em torno de 30%. Neste ponto a madeira foi desempilhada e transportada para a

Empresa ESUL – Esquadrias Uliana Ltda, localizada no Município de Tietê – SP; onde foi novamente empilhada e submetida a secagem convencional, adotando-se o programa anteriormente definido a partir da secagem de laboratório.

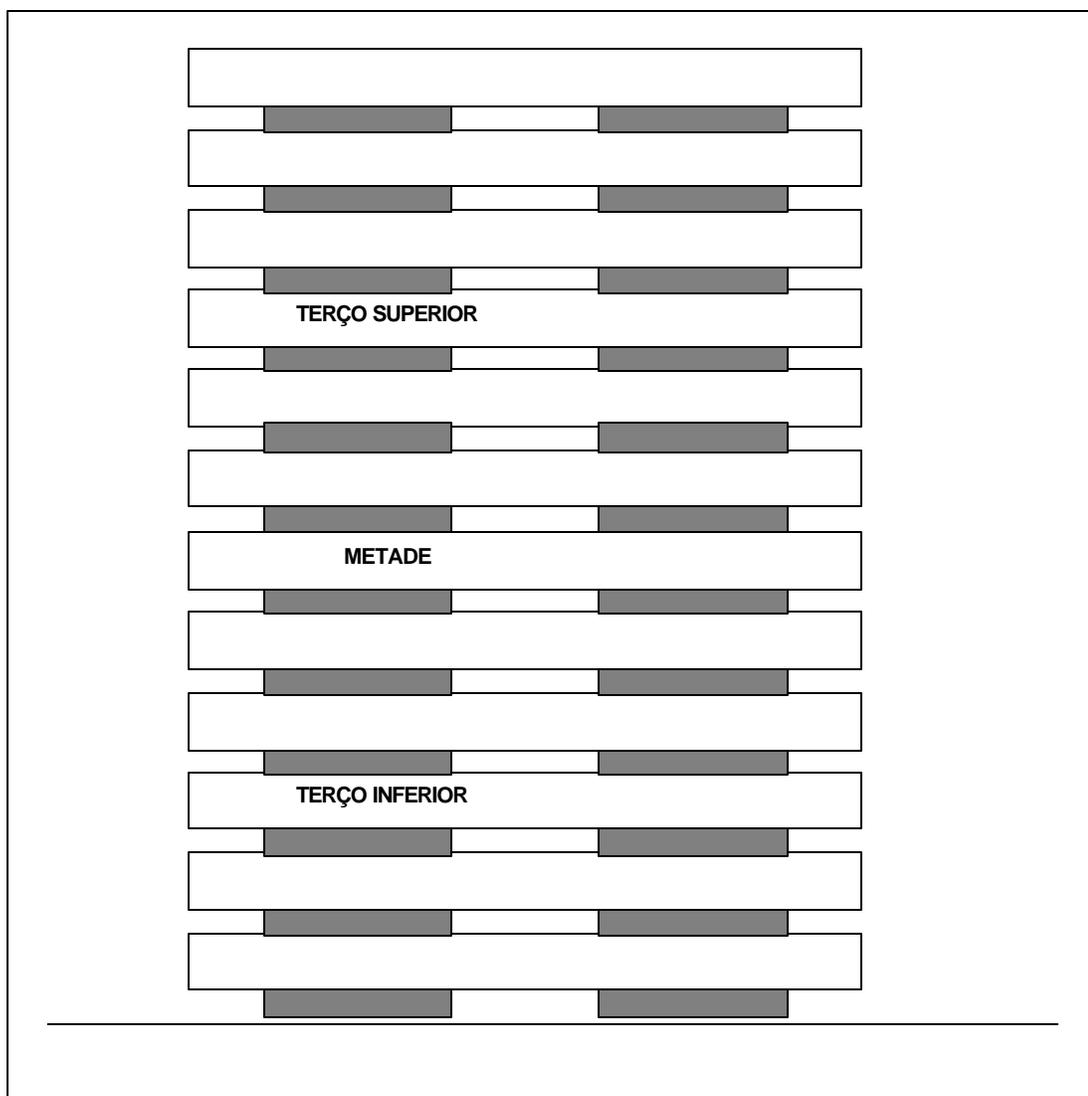


Figura 9 – Esquema de distribuição das amostras de qualidade nas pilhas.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os resultados obtidos são apresentados na mesma ordem da descrição metodológica, ou seja, determinação da curva característica de secagem, indicação do programa de secagem, secagem convencional em laboratório e secagem combinada.

### **4.1 Curva característica de secagem**

Os resultados da perda de massa das amostras (Tabela 7) mostram o comportamento característico do material madeira, com a taxa de secagem decrescendo com o tempo, ou seja, a medida em que diminui o teor de umidade. Na faixa de umidade capilar a taxa média de secagem foi de 1,44 g/h, decrescendo para uma taxa média de 0,31 g/h quando da retirada da água higroscópica.

Os resultados da variação na taxa de secagem constam da Tabela 8 e da Figura 10, e seguem o mesmo padrão observado na perda de massa.

A exemplo do ensaio a 100°C, este ensaio também foi um indicativo do comportamento do material durante a secagem, refletindo a dificuldade na retirada tanto de água capilar quanto da água higroscópica.

Tabela 7. Variação da perda de massa em função do tempo para madeira de *Eucalyptus grandis*.

Tempo (h)	Massa de água (g)	Tempo (h)	Massa de água (g)
0	664,1	81	562,9
2	654,9	84	561,2
4	649,4	96	555,0
6	644,3	108	549,7
8	640,0	120	545,0
11	633,7	126	542,9
14	627,9	132	540,8
21	616,9	144	536,9
24	613,0	150	535,2
27	608,9	156	533,6
30	604,6	168	530,5
36	597,3	174	529,2
38	595,3	180	527,8
48	585,8	192	525,4
54	581,0	198	524,2
60	576,7	204	523,1
62	<b>575,0*</b>	216	<b>521,2**</b>
72	568,3		

\*massa de água correspondente a 30% de umidade

\*\*massa de água correspondente a 18% de umidade

De acordo com Rosen (1983), o primeiro estágio da curva característica apresenta taxa constante de secagem, o que significa que a movimentação de umidade do interior da madeira até a superfície tem a mesma magnitude (ou taxa de transferência) que a evaporação superficial. Para o material madeira a taxa constante de secagem significa que a movimentação da água livre, por capilaridade, está ocorrendo sem impedimentos, ou seja, que a

madeira é permeável. Se a quantidade de água que chega até a superfície é igual a quantidade de água que está sendo vaporizada (taxa constante de secagem), a taxa de secagem em si depende exclusivamente das condições externas (meio de secagem).

Tabela 8. Valores da taxa de secagem (g/h) para madeira de *Eucalyptus grandis*, em função do tempo e teor de umidade.

<b>Tempo (h)</b>	<b>Teor de Umidade (%)</b>	<b>Taxa de secagem (g/h)</b>	<b>Tempo (h)</b>	<b>Teor de Umidade (%)</b>	<b>Taxa de secagem (g/h)</b>
0	51	-	81	28	0,60
2	49	4,58	84	27	0,57
4	48	2,77	96	26	0,52
6	46	2,52	102	25	0,42
8	45	2,16	108	25	0,44
11	44	2,09	120	23	0,39
14	43	1,93	126	23	0,34
21	40	1,56	132	23	0,35
24	39	1,32	144	22	0,32
27	38	1,36	150	21	0,27
30	37	1,42	156	21	0,28
33	36	1,26	168	20	0,25
36	36	1,15	174	20	0,21
38	35	1,04	180	20	0,23
48	33	0,95	192	19	0,19
54	32	0,80	198	19	0,19
60	31	0,71	204	19	0,18
62	30	0,83	216	18	0,16
72	29	0,67			

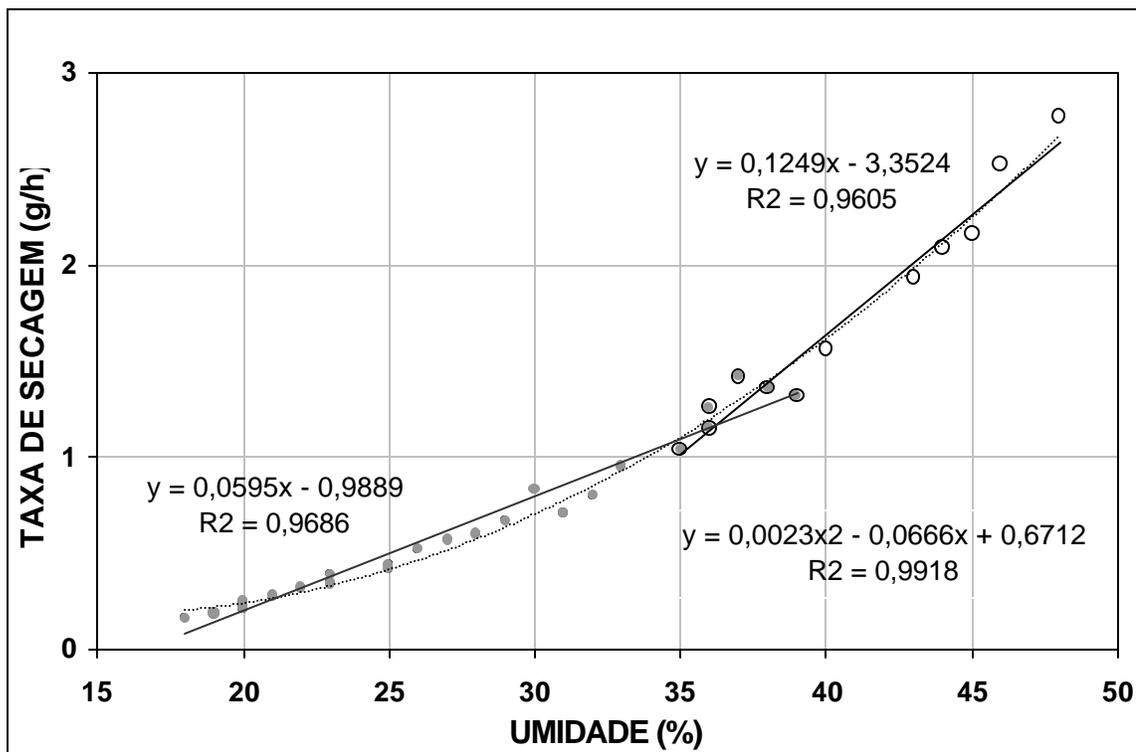


Figura 10 - Curva característica de secagem para madeira de *Eucalyptus grandis*.

Observa-se na Figura 10 que a curva característica de secagem, para a madeira de *Eucalyptus grandis* usada no ensaio, não apresenta a região ou fase em que a taxa de secagem é constante, mesmo com teores de umidade acima do PSF.

A movimentação da água capilar ocorre de uma célula para outra pelas aberturas naturais (Kollmann & Cotê, 1968; Siau, 1984). Porém, para as espécies do gênero *Eucalyptus* esse movimento sofre restrições pelas características anatômicas da espécie, com predomínio de pontoações de pequenos diâmetros e com vasos usualmente bloqueados por tiloses.

Essa característica define a madeira de *Eucalyptus grandis* como impermeável, conforme descrito por outros autores como Stöhr (1977); Campbell & Hartley (1988) e Vermaas (2000). A baixa permeabilidade da madeira de Eucalipto é tida como a principal responsável pela dificuldade da secagem e alta incidência de defeitos, principalmente o colapso.

A primeira fase de taxa de secagem decrescente inicia quando o teor de umidade da superfície está abaixo do PSF, com quando a magnitude da vaporização superficial supera a do deslocamento interno. Nesse ponto a água capilar não desloca-se até a superfície (por restrições ao fluxo capilar) e tem início a movimentação difusiva da água higroscópica.

A taxa de secagem passa a ser dependente da taxa de movimentação interna, a qual, por sua vez, dependerá do gradiente de umidade que forma-se da superfície em direção ao centro. Como o teor médio de umidade da madeira ainda está acima do PSF, pode-se afirmar que a movimentação externa é condicionada pelas características do material, principalmente permeabilidade e massa específica.

Stöhr (1977) salienta que o gradiente de umidade acentuado é vantajoso para obter o aumento na taxa de secagem, porém essa afirmação será válida para a madeira de Eucalipto apenas quando não houver mais a presença de água no estado líquido. Para madeiras impermeáveis, como o *Eucalyptus grandis* em estudo, forçar um aumento na taxa de secagem enquanto houver uma quantidade considerável de água líquida na madeira implica em aumentar a incidência de defeitos como o colapso (que poderá ocorrer nas fibras internas que ainda contenham água livre), e as rachaduras de superfície (devido a retração diferenciada entre a superfície mais seca e a parte central ainda saturada).

O estágio final (segunda fase de taxa decrescente) da secagem tem início quando, na movimentação interna, passa a predominar o processo de difusão (Rosen, 1983). Isto significa que praticamente não há mais água livre na madeira e o processo de secagem estará controlado unicamente pelas características do material, principalmente a massa específica.

Contudo, observando a Figura 10, o ponto de inflexão da curva corresponde a um teor de umidade de aproximadamente 35%. Se a umidade média da madeira está acima do PSF, com certeza a parte central da peça ainda conterà uma quantidade razoável de água no estado líquido (água livre). Este fato comprova a impermeabilidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, pois a inflexão na curva característica de secagem está provando indiretamente que a água capilar contida na parte central da madeira não movimenta-se por capilaridade (muito provavelmente devido a restrições anatômicas do material), e passa a predominar a movimentação por difusão.

Com base nesses resultados é possível inferir que parte da água capilar contida na madeira de *Eucalyptus grandis* transforma-se em água higroscópica, e passa a se movimentar em direção a superfície de evaporação por difusão.

Do ponto de vista prático, ou operacional, tem-se como indicativo que a madeira deverá permanecer em pré-secagem ao ar até um teor de umidade entre 35% e 40%, independentemente das considerações teóricas que possam ser feitas a respeito dos fenômenos de movimentação da água na madeira de *Eucalyptus grandis*. Este valor (35% a 40% de umidade) está em desacordo com as recomendações de Stöhr (1977) e Campbell & Hartley (1988),

aproxima-se da citação de Northway (1996) e está dentro da faixa preconizada por Franzoni (2001) como um procedimento operacional.

Nas condições do ensaio, a umidade de equilíbrio dentro do secador foi de 14%, o que significa um potencial de secagem entre 3,6 (no início do ensaio) e 2,1 (quando a madeira estava com 30% de umidade). Na Figura 11, que apresenta a curva tradicional de secagem, observa-se que mesmo em condições mais severas de secagem (potencial de secagem acima de 3,0, para madeira de Eucalipto), a taxa de perda de umidade é reduzida (0,43% de umidade / hora de secagem). Dessa observação pode-se concluir que mesmo aumentando as condições do meio secante o material não responderia na mesma proporção, corroborando a característica de secagem lenta do material em questão.

Caso a madeira de *Eucalyptus grandis*, com teor de umidade acima do PSF, seja submetida a secagem em estufa convencional acima do PSF, terá como característica uma secagem lenta, e a tentativa de acelerar o processo poderá acarretar, neste caso, maior ocorrência de defeitos.

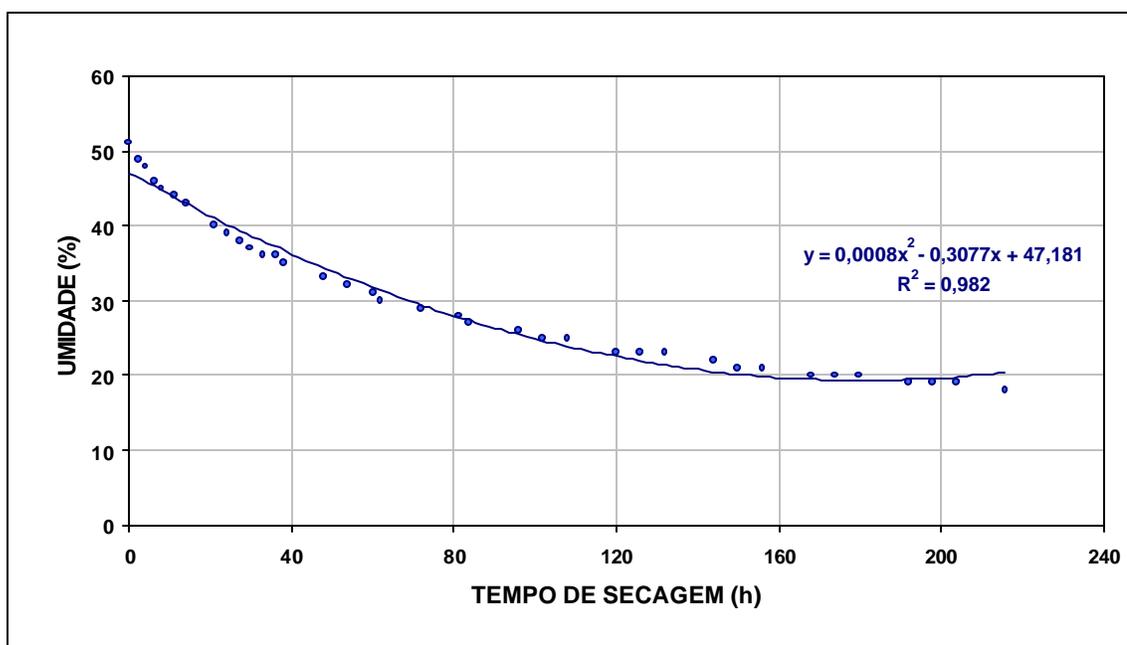


Figura 11 - Perda de umidade em função do tempo, para madeira de *Eucalyptus grandis*.

#### 4.2 Determinação do programa de secagem

Na Tabela 9 são mostrados os resultados médios (e respectiva amplitude de variação) das variáveis do ensaio a 100°C; a partir dos quais foram estimados os parâmetros do programa de secagem (Tabela 10), o qual pode ser visualizado na Tabela 11.

Tabela 9. Resultados do ensaio a 100°C, valores médios e amplitude de variação.

VARIÁVEL	MÉDIA	VARIAÇÃO
<b>Umidade inicial (%)</b>	71,74	80,7 - 63,0
<b>Tempos de Secagem (h)</b>		
T1	12,72	15,7 - 8,9
T2	4,01	4,6 - 2,3
T3	8,70	11,2 - 6,6
<b>Velocidade de Secagem (g/cm<sup>2</sup>.h)</b>		
V1	0,017	0,203 - 0,014
V2	0,0335	0,045 - 0,028
V3	0,0091	0,012 - 0,006
<b>Rachadura de topo (escore)</b>		
R1	1,2	3 - 1
R2	1,2	3 - 1
R3	1,1	3 - 1
<b>Rachadura interna (escore)</b>	1,9	4 - 1
<b>Colapso (escore)</b>	4,9	5 - 4

Onde:

T1 =Tempo de secagem U<sub>i</sub> a 5%

T2 =Tempo de secagem U<sub>i</sub> a 30%

T3 =Tempo de secagem 30% a 5%

V2 =Velocidade de secagem U<sub>i</sub> a 30%

V3 =Velocidade de secagem 30% a 5%

R1 =Rachadura de topo U<sub>i</sub> a 5%

R2 =Rachadura de topo U<sub>i</sub> a 30%

V1 =Velocidade de secagem U<sub>i</sub> a 5%      R3 =Rachadura de topo 30% a 5%

Tabela 10. Valores dos parâmetros para elaboração do programa de secagem.

PARÂMETRO	VALOR
Ti (°C)	40
Tf (°C)	65
PS	2,0

Onde: Ti = Temperatura inicial; Tf = Temperatura final; PS = Potencial de Secagem

Tabela 11. Programa utilizado em secagem de laboratório, para madeira de *Eucalyptus grandis* com 40 mm de espessura.

Umidade	Ts (°C)	Tu (°C)	UR (%)	UE (%)	PS
Aquecimento	40,0	38,0	88	18,4	-
Até 50	40,0	38,0	88	18,8	2,5
50	40,0	38,0	88	18,8	2,6
45	40,0	38,0	88	18,0	2,5
40	40,0	37,5	85	17,5	2,2
35	40,0	37,5	85	16,7	2,0
30	40,0	36,0	77	14,3	2,0
25	51,0	45,5	72	11,9	2,1
20	57,0	49,0	62	9,5	2,1
15	65,0	52,0	50	7,1	2,1
Uniformização	65,0	58,0	68	10,0	-
Condicionamento	65,0	62,0	85	15,0	-

Onde:

Ts = Temperatura de bulbo seco

Tu = Temperatura de bulbo úmido

UR = Umidade Relativa

UE = Umidade de equilíbrio

PS = Potencial de secagem

Apesar da madeira utilizada no ensaio estar saturada (condição verde), os valores da umidade inicial não foram elevados como os assinalados por Stöhr (1985) e Oliveira (1997) como característicos para a espécie. Da mesma forma, a amplitude da variação no teor inicial de umidade (17,7%) foi inferior aos resultados divulgados por Oliveira (1997), para *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis* (de até 80%), e por Doe & Lee (2000), para *Eucalyptus obliqua* (de até 90%).

Os resultados do ensaio a 100°C também comprovam que a madeira de *Eucalyptus grandis* avaliada nesta pesquisa é de secagem lenta e com propensão a defeitos, principalmente o colapso. É importante destacar que o escore médio obtido para o colapso foi de 4,9, sendo que o valor máximo é 5,0. Dentre as rachaduras o maior escore foi para a rachadura interna (média de 1,9), que é um tipo de defeito usualmente relacionado com o colapso e com o endurecimento superficial (defeitos característicos de madeiras impermeáveis).

Como era esperado, tendo em vista os resultados obtidos, o programa de secagem (Tabela 11) elaborado a partir do ensaio a 100°C é bastante conservador; com temperatura inicial de 45°C e potencial de secagem igual a 2,0. O programa de secagem é coerente com as recomendações da literatura para a madeira do gênero *Eucalyptus*, de uma forma geral (Pratt, 1974; Vermaas, 1995; Northway, 1996; Martins, 1999); e similar aos programas elaborados por Ciniglio (1998) e Andrade (2000).

É importante ressaltar que Ciniglio (1998) e Andrade (2000), trabalharam com a mesma espécie (*Eucalyptus grandis*), mas com idades e de procedências diferentes. Apesar de ter sido adotada a mesma metodologia para

a elaboração do programa de secagem, a similaridade do resultado final para madeiras de diferentes idades e procedências permitem sugerir o programa da Tabela 11 como um programa genérico para a madeira de *Eucalyptus grandis*.

### **4.3 Secagem convencional em laboratório**

A avaliação do programa da Tabela 11 foi realizada através da secagem de uma carga de madeira em laboratório, composta de 15 amostras com dimensões de 490 mm x 200 mm x 40 mm, comprimento, largura e espessura respectivamente.

A curva de secagem é apresentada na Figura 12, onde pode ser avaliada a perda de umidade durante o processo, medida por diferença de massa (gravimetria) e pela resistência elétrica (medidor elétrico). Esta secagem serve como indicativo do tempo de duração de uma secagem convencional, caso o material fosse submetido ao processo desde a condição de umidade acima do PSF até umidade final de 12%, em escala industrial .

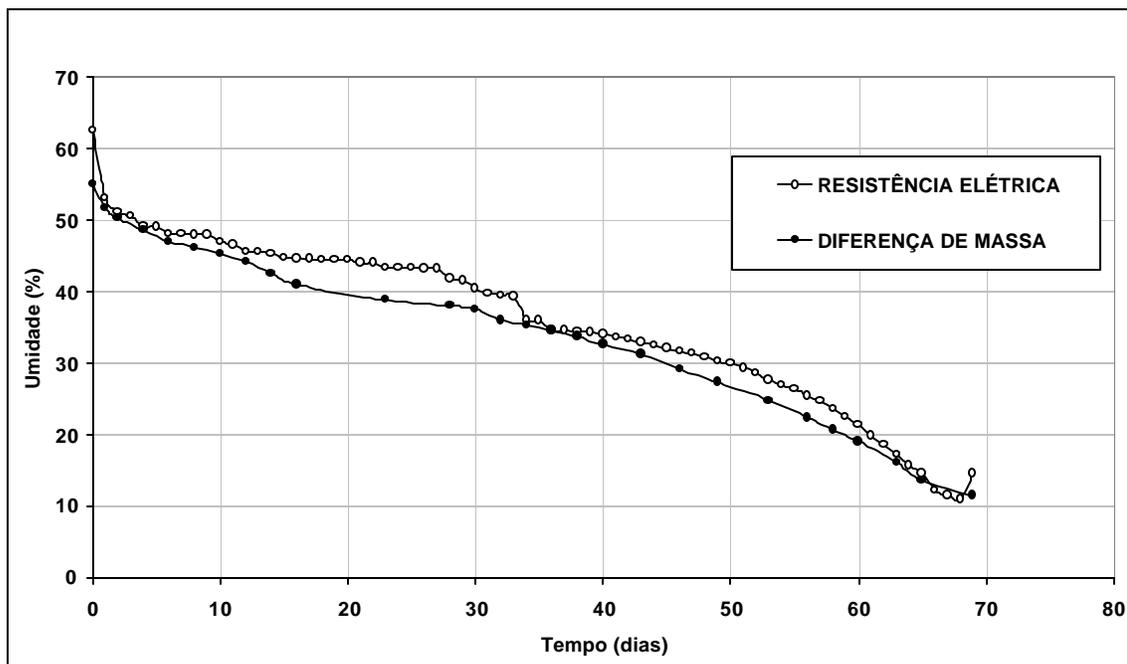


Figura 12 - Curvas da secagem convencional da madeira de *Eucalyptus grandis* (40 mm de espessura) em laboratório.

A duração do processo em laboratório foi em torno de 70 dias, tempo que, industrialmente, implicaria em menor operacionalidade dos secadores. Além de aumentar o custo operacional da secagem (proporcional ao tempo de operação do secador), seria necessário maior número de secadores em operação para manter, comparativamente a outras espécies de folhosas tropicais, o mesmo volume de produção.

Essas considerações mostram que, para o efetivo emprego da espécie é primordial a pré-secagem, como forma de reduzir tempo em estufa e, conseqüentemente, a necessidade de investimento e os custos de produção

A incidência de empenamentos verificados na secagem pode ser visualizada na Figura 13. Verifica-se que o encanoamento e o torcimento foram

os defeitos mais graves, com um aumento na intensidade do empeno; enquanto que o arqueamento apresentou comportamento inverso.

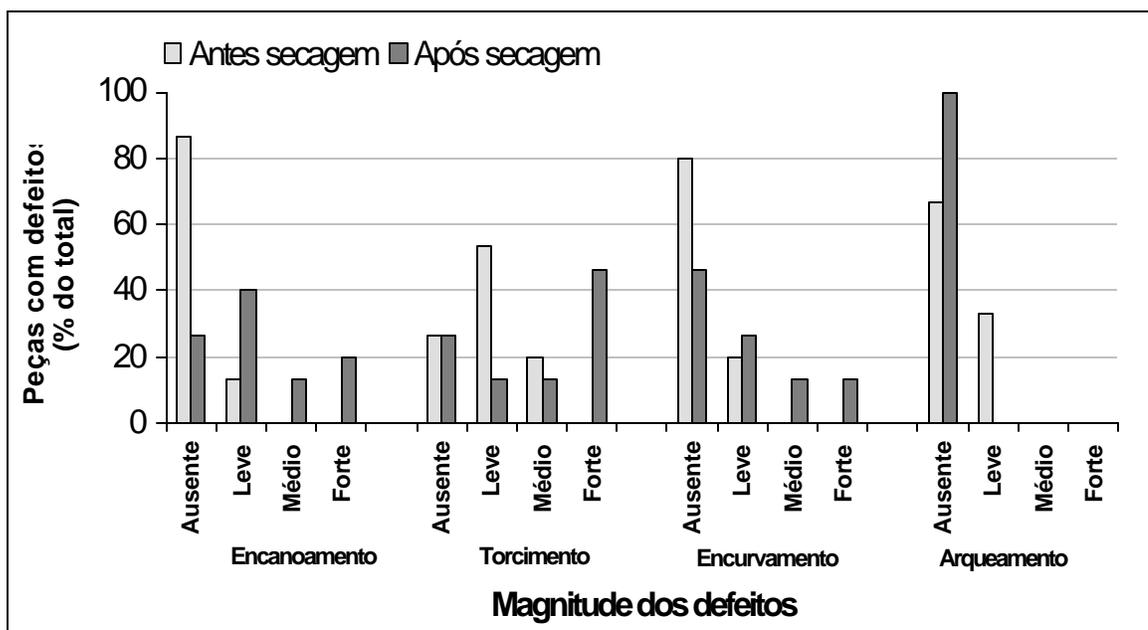


Figura 13 - Avaliação e quantificação dos empenamentos na secagem em laboratório.

Avaliando-se a tendência da madeira a apresentar um determinado tipo de defeito e a intensidade na qual ocorreu o defeito, adotando os critérios descritos na Tabela 6, conclui-se que o material em estudo apresentou, após secagem, tendência moderada para o encanoamento leve, pequena para o encurvamento leve e moderada para o torcimento forte. Em relação ao torcimento, que foi o tipo de empeno mais acentuado, é importante ressaltar que antes da secagem a madeira já apresentava uma tendência grande para o torcimento leve; o que permite inferir que a secagem em si não provocou o aparecimento do defeito, mas agravou a intensidade de um defeito pré existente.

Deve também ser feita a ressalva de que as peças submetidas a secagem são curtas, e a carga é pequena. Nessa situação a massa da madeira

empilhada não exerce pressão suficiente sobre as peças para reduzir a possibilidade de movimentação das mesmas e, conseqüentemente, reduzir a incidência e a magnitude dos empenamentos.

As rachaduras e o colapso não foram defeitos significativos, conforme pode ser observado na Figura 14. Considerando que a secagem foi lenta, já seria esperado a reduzida incidência desses tipos de defeito, que estão relacionados com as tensões capilares e de secagem, ou seja, tensões originadas na movimentação da umidade durante o processo de secagem.

O colapso, que normalmente é o defeito mais grave na secagem de Eucalipto, acusou apenas 20% de incidência após a secagem; o que é classificado como uma tendência pequena para apresentar o defeito.

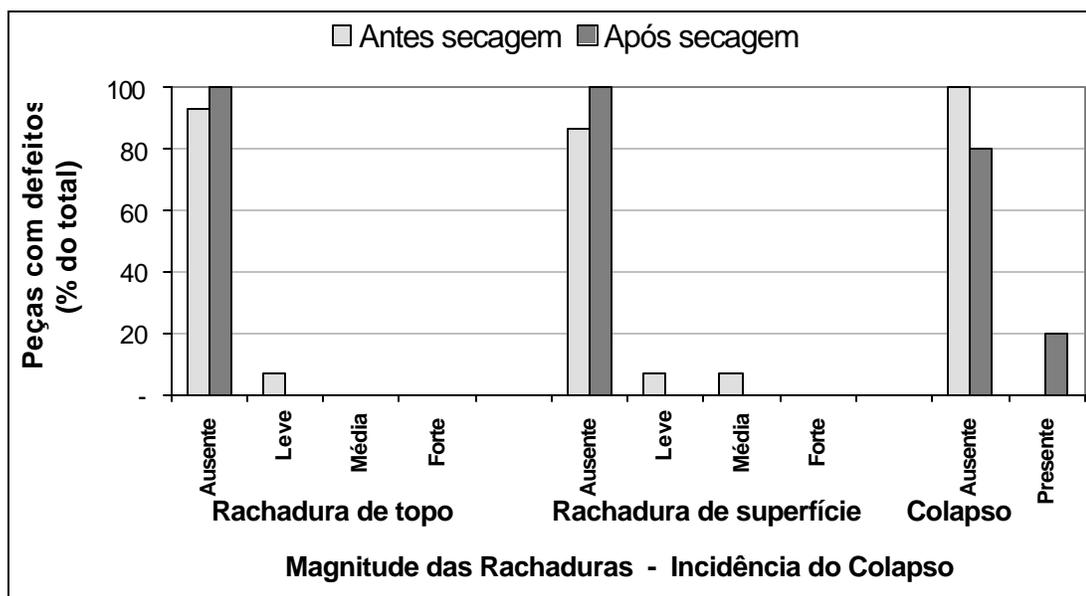


Figura 14 - Avaliação e quantificação das rachaduras e do colapso na secagem em laboratório.

Além da avaliação dos defeitos, a qualidade da madeira seca foi também avaliada quantificando-se a distribuição de umidade (Figura 15) e verificando-se a magnitude das tensões residuais de secagem (teste do garfo, Figura 16).

A umidade final média (10,6%) ficou abaixo da umidade desejada (que foi de 12,0%), e a carga apresentou uma amplitude de variação entre a peça mais seca e a mais úmida de 3,6%. Na Figura 15 verifica-se que a variação de umidade na parte externa das peças é da ordem de 1,0%, enquanto que na parte interna aproxima-se de 6,0%; o que indica com segurança que a variação encontrada no teor de umidade entre peças é decorrente da maior variação na parte interna.

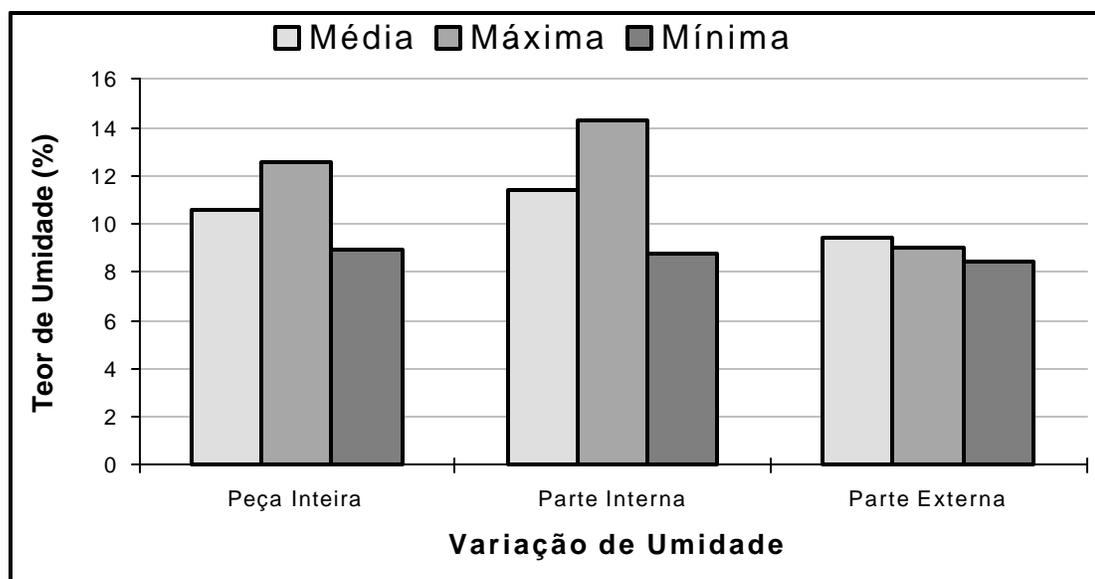


Figura 15 - Distribuição de umidade (secagem em laboratório).

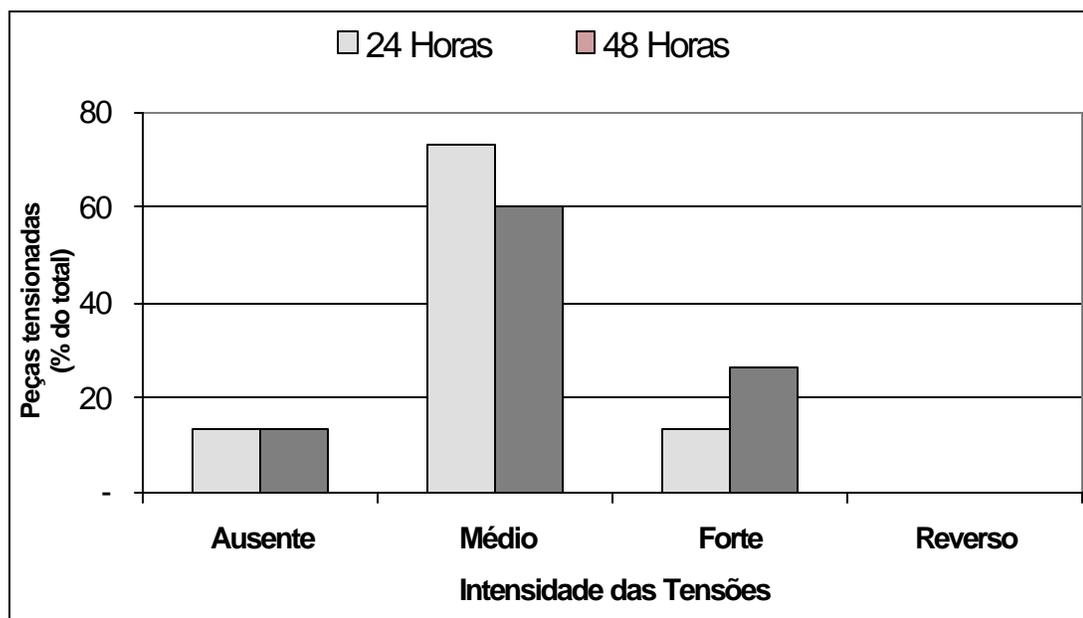


Figura 16 - Tensões residuais de secagem, avaliadas 24 e 48 horas após o corte dos corpos de prova (secagem de laboratório).

Esse resultado permite concluir que o período de uniformização foi insuficiente, ou seja, não houve tempo bastante para que a umidade interna migrasse para a superfície mais seca e, conseqüentemente, ocorresse a diminuição do gradiente existente no sentido da espessura das peças.

A diferença observada entre o teor de umidade obtido e o desejado (1,4%) não chega a caracterizar uma sobre secagem do material.

Adicionalmente, a alta incidência de peças tensionadas (85% de peças com tensões de intensidade média e forte) é um indicativo seguro que o condicionamento, ao final da secagem, também foi insuficiente.

O aumento no tempo de uniformização tornaria mais uniforme a distribuição de umidade dentro da peça e um tempo maior de condicionamento promoveria o reumidecimento da parte externa, contribuindo na melhor distribuição de umidade e, principalmente, aliviando as tensões de secagem.

Como benefício adicional diminuiria a diferença do teor final médio obtido e desejado.

Uma análise geral sobre a qualidade da madeira após a secagem convencional em laboratório leva a conclusão de que o programa adotado é razoável; pois os defeitos de maior incidência (empenamentos) estão mais vinculados a matéria-prima do que ao processo, e as fases de uniformização e condicionamento podem facilmente ser corrigidas em secagens posteriores.

Com base nos resultados obtidos em laboratório foram feitas as alterações no programa de secagem adotado para a secagem combinada.

#### **4.4 Secagem combinada**

Como o enfoque da secagem combinada foi avaliar a viabilidade do emprego da pré-secagem para otimizar a secagem convencional de madeira serrada de *Eucalyptus grandis*, torna-se relevante analisar o tempo de duração da secagem combinada, além dos defeitos decorrentes do processo.

##### **4.4.1 Tempo de secagem**

A secagem combinada teve uma duração total de 92 dias. A madeira ficou em pré-secagem durante 77 dias (início no final de dezembro de 1999 até meados de março de 2000), seguida de mais 15 dias em secador convencional. A curva de perda de umidade pode ser examinada na Figura 17.

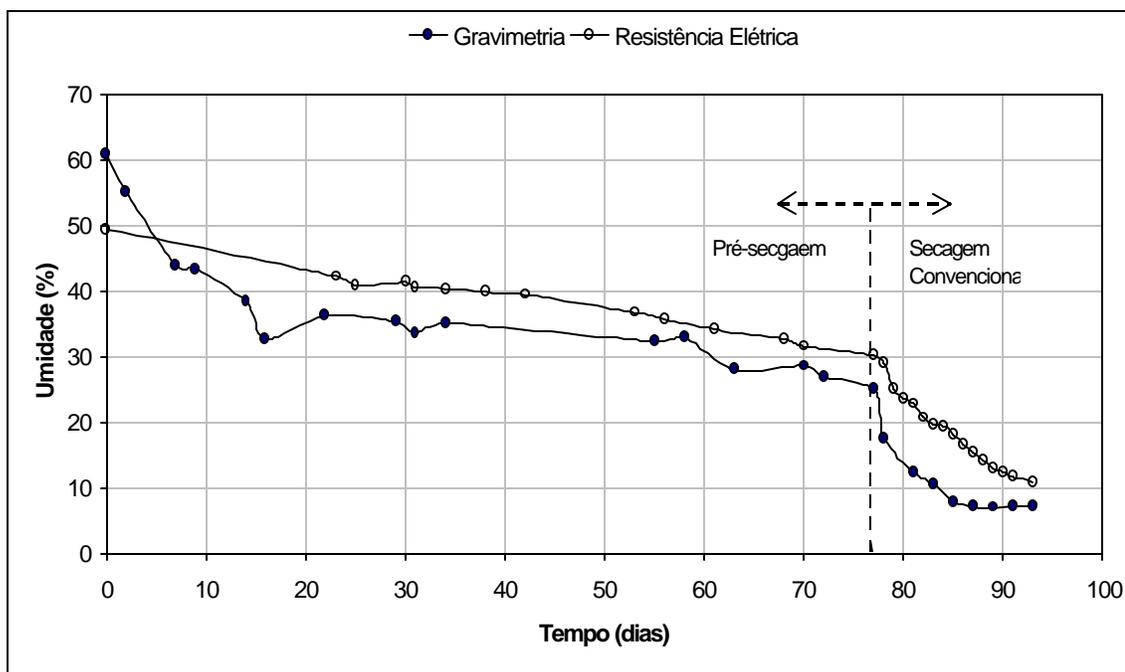


Figura 17 - Curva da perda de umidade durante a secagem combinada.

O tempo total da secagem combinada (92 dias) foi 31% superior ao tempo da secagem convencional em laboratório (70 dias). Comparando-se apenas as secagens convencionais (laboratório e industrial), verifica-se uma redução de 78% no tempo de ocupação do secador quando foi realizada a pré-secagem.

Desta forma, comprova-se que a grande vantagem da secagem combinada é a otimização no uso do secador. Nas condições da presente pesquisa, os resultados obtidos demonstram que um único secador poderia atingir facilmente a produção equivalente a 4 secadores. Essa possibilidade significaria uma redução significativa do investimento em secadores e menor custo de produção.

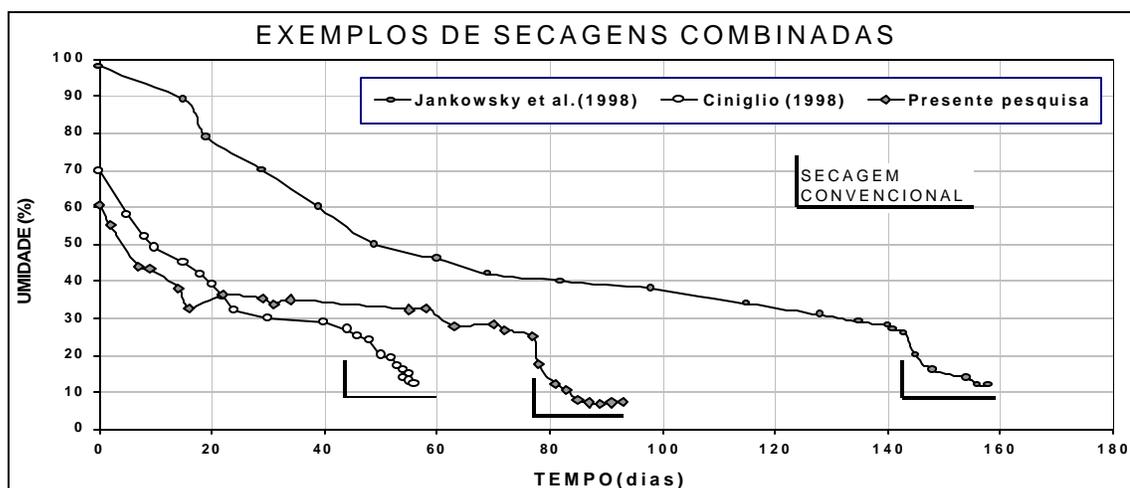


Figura 18 - Comparativo das curvas de secagem combinada (pré-secagem ao ar e secagem convencional)

Na Figura 18 é apresentado um comparativo de resultados de secagens combinadas (pré-secagem ao ar seguida de secagem convencional), os quais, aparentemente, são bastante discrepantes.

Um exame mais detalhado leva a conclusão que maior diferença é no tempo dispendido em pré-secagem. Como a secagem ao ar é dependente das condições climáticas do local, é de se esperar que as respectivas curvas de secagem sejam diferentes pois foram executadas em locais diversos.

Examinando o período de tempo correspondente a secagem convencional (destacado em vermelho na Figura 18), observa-se que o resultado da presente pesquisa é menor que o relatado por Ciniglio (1998) e similar ao obtido por Jankowsky et al.<sup>5</sup>. Deve ser salientado que Ciniglio (1998), utilizou peças com 25 mm de espessura (secagem mais rápida) e Jankowsky et al.<sup>6</sup>, utilizaram peças com 40 mm, fatores que justificam a comparação efetuada.

<sup>5</sup> JANKOWSKY, I. P.; DUCATTI, M. A.; ANDRADE, A. **Avaliação da secagem da madeira de *Eucalyptus grandis***. Convênio FIPA/FINEP 63960691-00. Relatório Final. Piracicaba. 1998.15p.

Assim, é possível afirmar que os resultados obtidos são coerentes com resultados disponibilizados por outros autores, e concluir que a combinação de métodos (pré-secagem ao ar e secagem convencional) permite otimizar o uso do secador convencional.

A análise da curva característica de secagem recomenda que a pré-secagem seja encerrada quando o teor de umidade estiver entre 35% e 40%, o que não pode ser feita nesta pesquisa por dificuldades operacionais.

Tomando como base a curva de secagem baseada no medidor elétrico (Figura 17), e com auxílio da análise de regressão, estimou-se a situação na qual seria encerrada a pré-secagem com teor de umidade em torno de 36%. O resultado desse exercício pode ser examinado na Figura 19.

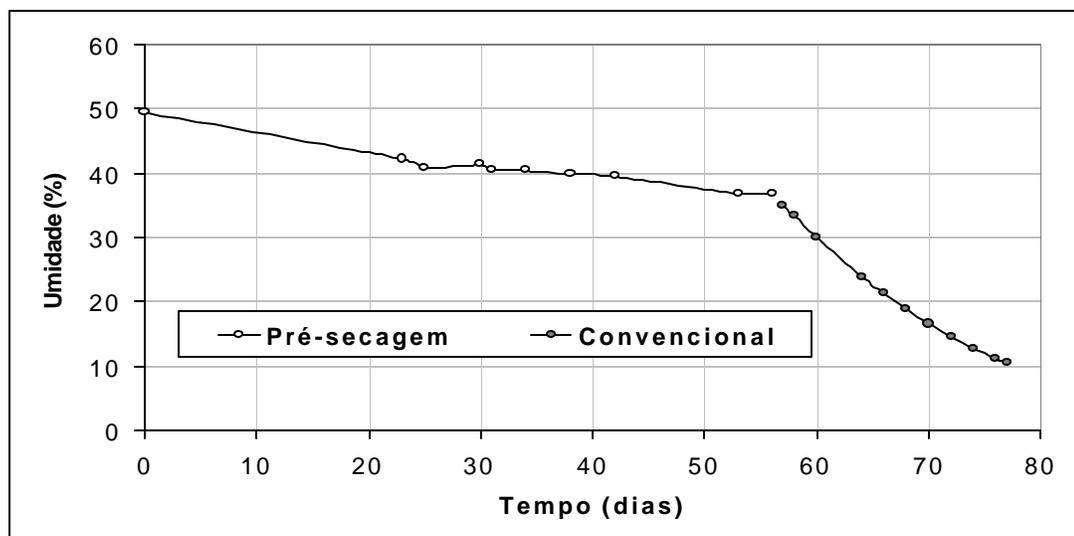


Figura 19 - Curva de secagem estimada com base na Figura 17, considerando o término da pré-secagem após 56 dias.

Nesta estimativa ter-se-ia o tempo total de secagem em 78 dias (equivalentes a secagem convencional em laboratório), com 56 dias em pátio e

22 dias no secador. A redução no tempo de pré-secagem seria em torno de 21 dias (27% do tempo observado no ensaio), com um aumento de 6 dias na secagem convencional (40% do tempo registrado na pesquisa).

Essa estimativa é útil para mostrar as alternativas da secagem combinada. Se o objetivo for o aumento na produtividade do secador, seria recomendável aumentar o tempo de pré-secagem, reduzindo o tempo de permanência da madeira no secador. Quando a necessidade fosse reduzir o capital representado pela madeira estocada em pré-secagem, a alternativa seria o procedimento oposto (menor tempo ao ar e secagem convencional mais longa).

Essas considerações evidenciam a flexibilidade da secagem combinada e reforçam a conclusão da sua viabilidade em operações industriais.

#### **4.4.2 Quantificação e qualificação dos defeitos**

A incidência e evolução das rachaduras ao longo da secagem combinada consta da Tabela 12, onde pode ser observado que, em uma análise geral, o número de peças defeituosas e a magnitude de defeitos aumentaram no decorrer do processo.

Comparando-se os empenamentos antes da pré-secagem (madeira recém serrada) com a situação após a secagem convencional, podem ser feitas as seguintes constatações :

- o arqueamento, com magnitude de médio a forte, já estava presente em 52,5% das peças úmidas, aumentando para 58,1% após a pré-secagem e para 74,4% após a secagem convencional;
- 55,8% das peças úmidas apresentavam torcimento de leve a médio, aumentando para 62,3% na secagem ao ar e diminuindo para 26,5% na secagem artificial. Já o torcimento forte, ausente na madeira recém serrada

(0,5% das peças), apresentou aumento constante e ao final da secagem estava presente em 67,9% das peças;

- o encurvamento forte já apresentava incidência de 93,0 na madeira úmida, aumentando para 98,6% ao final da secagem combinada.

Tabela 12. Incidência e magnitude dos empenamentos no decorrer da secagem combinada.

TIPO DE EMPENAMENTO	ANTES DA PRÉ-SECAGEM		APÓS A PRÉ-SECAGEM		APÓS A SECAGEM CONVENCIONAL	
	Quantidade de peças	%	Quantidade de peças	%	Quantidade de peças	%
<b>Arqueamento</b>						
Ausente	23	10,70	31	14,42	20	9,30
Leve	79	36,74	59	27,44	35	16,28
Médio	81	37,67	79	34,88	63	29,30
Forte	32	14,88	50	23,26	97	45,12
<b>Torcimento</b>						
Ausente	94	43,72	27	12,56	12	5,58
Leve	92	42,79	71	33,02	27	12,56
Médio	28	13,02	63	29,30	30	13,95
Forte	1	0,47	54	25,12	146	67,91
<b>Encurvamento</b>						
Ausente	4	1,86	1	0,47	0	0,00
Leve	4	1,86	4	1,86	1	0,47
Médio	7	3,26	2	0,93	2	0,93
Forte	200	93,02	208	96,74	212	98,60

Esses resultados mostram que a matéria-prima possuía tendência acentuada aos empenamentos, principalmente em relação ao encurvamento. O processo de secagem, tanto ao ar como em secador convencional, agravou a

magnitude do arqueamento e provocou um aumento na incidência e na intensidade do torcimento.

Os diversos tipos de empenamentos são ocasionados por diferenças das contrações existentes entre as camadas de crescimento, lenho juvenil e adulto, cerne e alburno, desvios na orientação das fibras e presença de madeira de reação. Se a madeira, em função da sua formação e posterior estrutura anatômica, apresenta tendência a distorções; o processo de secagem e a retração decorrente da perda de umidade tenderão a agravar as distorções.

Marques (2001), relatando a experiência da Aracruz no processamento da madeira de Eucalipto, informa que 61,5% dos defeitos que desclassificam a madeira no nível superior de qualidade são originados na matéria-prima; enquanto que 61,0% da desclassificação no nível mediano são originados na secagem. Esta informação confirma a importância da matéria-prima na posterior qualidade da madeira seca.

Em comparação com a secagem em laboratório, constata-se que os três tipos de empenos (arqueamento, torcimento e encurvamento) apresentaram maior incidência e magnitude. Como as peças em secagem industrial eram mais compridas (300 cm) do que as submetidas a secagem em laboratório (49 cm), é óbvio que a flecha decorrente de qualquer distorção em relação ao sentido longitudinal será de maior magnitude. O encanoamento, por sua vez, não foi observado na secagem combinada.

A alta incidência de empenamentos (índices acima de 50%) também foi relatada por outros autores (Jankowsky et al.<sup>6</sup> e Doe & Lee, 2000) para madeira do gênero *Eucalyptus*. Os resultados da Tabela 12 podem ter sido agravados por :

- tábuas provenientes de toras finas e, portanto, com maior proporção de madeira juvenil, a qual retrai mais no sentido longitudinal do que a madeira considerada adulta (Vermaas, 1998a);

- presença de tensões de crescimento nas árvores, cujo indício foi observado durante o processamento (rachaduras extensas, ao longo da medula, nas peças centrais), e que aumentam a propensão ao encurvamento;
- o fato da madeira ter sido desempilhada para o transporte até a ESUL, com a movimentação das tábuas facilitando a liberação das tensões internas (tanto as de crescimento como as de secagem).

As tensões de crescimento também podem ser apontadas como a causa do alto índice de peças com rachaduras de topo (Tabela 13), cuja evolução ao longo da secagem apresentou o mesmo padrão dos empenos.

Tabela 13. Incidência e magnitude das rachaduras no decorrer da secagem combinada.

TIPO DE RACHADURA	ANTES DA PRÉ-SECAGEM		APÓS A PRÉ-SECAGEM		APÓS A SECAGEM CONVENCIONAL	
	Quantidade de peças	%	Quantidade de peças	%	Quantidade de peças	%
<b>Topo</b>						
Ausente	5	2.33	7	3.26	16	7.44
Leve	4	1.86	8	3.72	6	2.80
Médio	81	37.67	55	25.58	60	27.90
Forte	125	58.14	145	67.44	133	61.86
<b>Superfície</b>						
Ausente	208	96.74	209	97.21	205	95.35
Leve	---	---	---	---	1	0.47
Médio	2	0.93	2	0.93	2	0.93
Forte	5	2.33	4	1.86	7	3.26

Observa-se, na Tabela 13, alta tendência da madeira ainda úmida apresentar rachaduras de topo classificadas como fortes (58,1% das peças), incidência que aumentou na secagem ao ar (67,4%) e regridiu um pouco após a secagem convencional (61,9%).

De acordo com Vermaas (1998b), as rachaduras são ditas como um dos principais fatores de perda de material, tendendo a serem mínimas durante a secagem, tendo como causa as tensões de crescimento, não sendo primariamente um defeito de secagem (Vermaas,1995). Como as rachaduras de superfície foram mínimas, não devem contribuir para perdas significativas.

O colapso foi observado em 42 peças (19,5% do total) após a secagem ao ar, sempre em tábuas que continham a medula; mantendo-se constante após a secagem convencional.

Para a produção de madeira sólida ainda é recomendável a exclusão de material próximo da medula, como assinalam Campbell & Hartley (1988), pois além de ser uma região com maior propensão ao colapso também significa maior proporção de madeira juvenil e, por serem tábuas centrais (radiais), possuem maior tendência a rachaduras de topo causadas pelas tensões de crescimento.

Da mesma forma que para a secagem em laboratório, a qualidade da madeira submetida a secagem combinada foi também avaliada quantificando-se a distribuição de umidade (Figura 20) as tensões residuais de secagem (teste do garfo, Figura 21).

A umidade final média (9,6%) ficou próxima a umidade desejada (que foi de 10,0%), e a carga apresentou uma amplitude de variação entre a peça mais seca e a mais úmida de 5,1%.

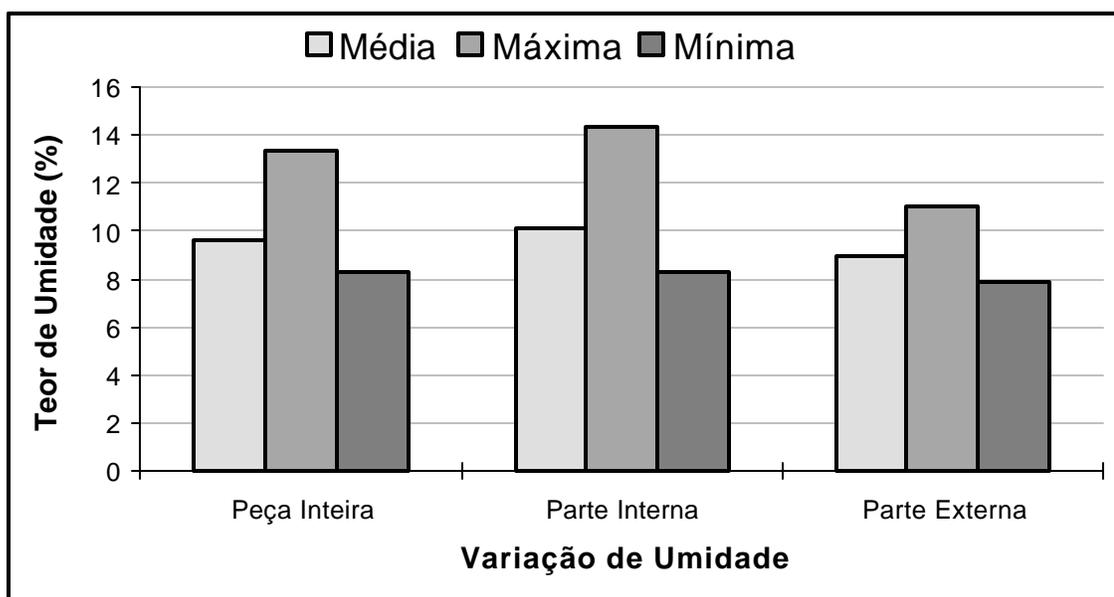


Figura 20 - Distribuição de umidade (secagem combinada).

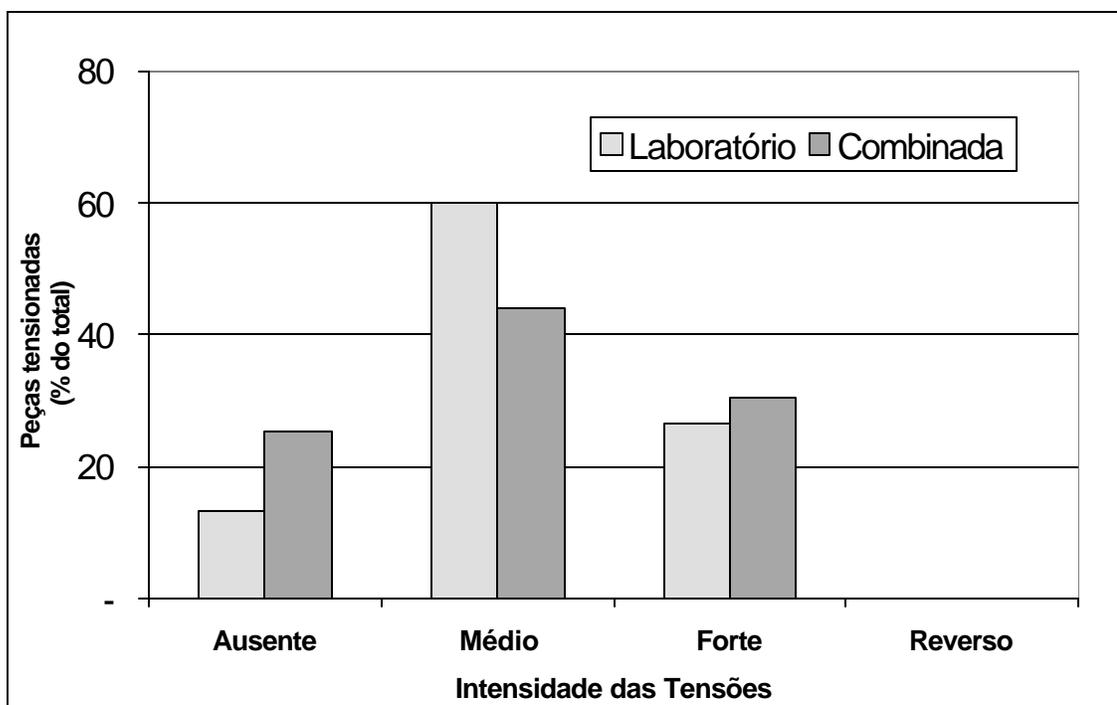


Figura 21 - Tensões residuais de secagem, avaliadas 48 horas após o corte dos corpos de prova (secagens combinada e em laboratório).

Se a distribuição de umidade dentro das peças submetidas a secagem combinada tem amplitude acima da verificada na secagem em laboratório, ocorreu o inverso com as tensões de secagem (Figura 21), embora 75,0% das peças estivessem tensionadas.

Esses resultados demonstram que a secagem convencional realizada na indústria também poderia ter dispendido mais tempo nas fases de uniformização e condicionamento.

Os resultados obtidos na presente pesquisa estão de acordo com as afirmações de Vermaas (2000), segundo o qual para se obter qualidade significativa da madeira de *Eucalyptus*, há dependência da eficiência dos sistemas atuais de secagem e a sua adequação futura, que somente pode ser alcançada quando os resultados de pesquisas genéticas, silviculturais e de processamento forem aplicados em conjunto, passando também pelo treinamento dos operadores.

Considerando que a quase totalidade dos defeitos de secagem constatados na madeira seca são provenientes da matéria-prima, e que o aumento do tempo nas fases de uniformização e condicionamento poderá melhorar a qualidade da secagem propriamente dita; é possível reafirmar a conclusão de que o programa de secagem adotado é razoável e pode ser indicado para a madeira de *Eucalyptus grandis*.

## 5 CONCLUSÕES

Com base na análise e discussão dos resultados obtidos, é possível concluir :

- a curva característica de secagem da madeira de *Eucalyptus grandis* não apresenta a taxa de secagem constante, o que permite caracterizar a espécie como sendo impermeável;
- na combinação dos métodos de pré-secagem ao ar e secagem convencional, é recomendável que a secagem natural seja interrompida quando o teor de umidade da madeira estiver entre 35% e 40%;
- o programa de secagem adotado nesta pesquisa é razoável, e pode ser indicado para a secagem convencional da madeira de *Eucalyptus grandis*;
- a secagem combinada (pré-secagem ao ar e secagem convencional) demandou 31% a mais de tempo do que a secagem convencional isoladamente, mas reduziu em 78% o tempo de ocupação do secador;
- a combinação de métodos (secagem combinada) permite otimizar a utilização do secador, flexibilizando o fluxo da matéria-prima na indústria;
- é viável a aplicação da secagem combinada em operações industriais;

- a matéria-prima utilizada na presente pesquisa apresentou tendência (de moderada a grande) a empenamentos e rachaduras de topo, cuja incidência e magnitude foram acentuadas pelo processo de secagem; realçando a importância da matéria-prima na obtenção de madeira seca isenta de defeitos.

Adicionalmente, é possível apresentar sugestões de temas para pesquisas futuras, que possam complementar os resultados obtidos neste trabalho :

- determinar a curva característica de secagem para outras espécies do gênero *Eucalyptus*, buscando generalizar a recomendação do teor de umidade mais adequado para a transição entre os métodos de secagem ao ar e convencional;
- efetuar a secagem conjunta de diferentes procedências da mesma espécie de *Eucalyptus*, visando um melhor conhecimento da influência da matéria-prima sobre a qualidade da madeira seca.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, A. Indicação de programas para secagem convencional de madeiras. Piracicaba, 2000. 72p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

BARRICHELLO, L.E.G. **Densidade básica**: subsídio para determinação (1ª parte). Piracicaba: ESALQ, Departamento de Silvicultura, 1983. 6p. (informações SQCE, 3).

BOONE, R.S.; KOZLIK, C.J.; BOIS, P.J.; WENGERT, E.M. **Dry kiln schedules for commercial wood**: temperate and tropical. Madison: USDA, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1988.158p.

BRANDÃO, A.T.O. Determinação de metodologia para a indicação de programas de secagem de madeiras. Piracicaba, 1989. 100p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal. **Madeiras da Amazônia**: características e utilização - Estação Experimental de Curuá-una. Brasília: IBDF, 1988. v. 2, 236p.

- CAMPBELL, G.S.; HARTLEY, J. Drying and dried wood. In: HILLIS, W.E.; BROWN, A.G. ***Eucalyptus for wood production***. Melbourne: Academic Press, 1988. cap. 16, p.328-336.
- CAVALCANTE, A. A. Ocorrência do colapso na secagem da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*. Piracicaba, 1991. 76p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- CINIGLIO, G. Avaliação da secagem de madeira serrada de *E. grandis* e *E. urophylla*. Piracicaba, 1998. 69p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- DOE, P.E.; LEE, M. Drying backsawn timber Tasmanian regrowth Eucalipt. In: IUFRO, THE FUTURE OF EUCALYPTS FOR WOOD PRODUCTS, Tasmania, 2000. **Proceedings**. Tasmania: IUFRO, 2000. p.256-264.
- FRANZONI, J.A. Utilização da madeira de eucalipto na indústria de móveis e padrões de qualidade de madeira para móveis de exportação. In: SEMINÁRIO MADEIRA DE EUCALIPTO: TENDÊNCIAS E USOS, Curitiba, 2001. **Anais**. Curitiba: FUPEF, 2001. p.50-52.
- 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. 76p.

HILDEBRAND, R. **Kiln drying of sawn timber**. Nuertingen: R.H. Maschinenbau GmbH, 1970. 198p.

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. **Anais**. Piracicaba: IPEF, 1995. p.109-118.

JANKOWSKY, I.P.; CAVALCANTE, A. A. Collapse prevention in the drying of eucalipto wood. In: INTERNATIONAL IUFRO WOOD DRYING CONFERENCE, 3., Viena, 1992. **Proceedings**. Viena: IUFRO, 1992. p.357-361.

KOLLMANN, F.F.P.; COTÊ, W.A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer-Verlag, 1968. v.1, 592p.

MARQUES, C.G. Controle de qualidade no processamento da madeira de eucalipto – uma experiência da Aracruz. In: SEMINÁRIO MADEIRA DE EUCALIPTO: TENDÊNCIAS E USOS, Curitiba, 2001. **Anais**. Curitiba: FUPEF, 2001. p.33-43.

MARTINS, V.A. **Secagem de madeira ao ar livre na região do Distrito Federal**. Brasília: IBDF, 1986. 18p. (IBDF. Série Técnica, 14).

MARTINS, V.A. **Secagem de madeira serrada**. Brasília: IBDF, 1988. 56p.

MARTINS, V.A.; MARQUES, M.H.B.; MENDES, A.S. Madeiras da Amazônia de secagem rápida. **Madeira & Tecnologia**, n.7. p.44-50. nov./dez. 1997.

- MARTINS, V.A.; GOUVEIA, F.N.; MARTINEZ, S. Secagem convencional de madeira de Eucalipto. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE ECOSISTEMAS FLORESTAIS, 5., Curitiba, 1999. **Anais**. Curitiba: Biosfera, 1999 (Poster).
- MENDES, A.S.; MARTINS, V.A.; MARQUES, M.H.B. **Programas de secagem para madeiras brasileiras**. Brasília: IBAMA, 1998. 114p.
- NEUMANN, R.J. Kiln drying young *Eucalyptus globulus* boards from green. In: IUFRO INTERNATIONAL WOOD DRYING CONFERENCE, 2., Seattle, 1989. **Proceedings**. Seattle: IUFRO, 1989. p.107-115.
- NORTHWAY, R.L. Drying strategies for plantation-grown eucalypts In: INTERNATIONAL IUFRO WOOD DRYING CONFERENCE, 5., Quebec, 1996. **Proceedings**. Quebec: IUFRO, 1996. p.289-296.
- OLIVEIRA, J.T.S. Caracterização da madeira de eucalipto para construção civil. São Paulo, 1997. 2v. 429p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica. Universidade de São Paulo.
- PONCE, R.H.; WATAI, L.T. **Manual de secagem da madeira**. São Paulo: STI; IPT, 1985. 70p. (Série Documentos, 22).
- PONCE, R.H. Madeira serrada de eucalipto: desafios e perspectivas. In: SEMINÁRIO DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, São Paulo, 1995. **Anais**. Piracicaba: IPEF, 1995. p.50-58.
- PRATT, G.H. **Timber drying manual**. London: Department of the Environment, Building Research Establishment, 1974. 152p.

- RASMUSSEN, E.F. **Drying kiln operator's manual**. Madison: USDA, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1968. 197p.
- ROSEN, H.N. Recent advances in the theory of drying lumber. In: IUFRO DIVISION V CONFERENCE, Madison, 1983. **Proceedings** : wood drying working party. Carbondale: Southern Illinois University; USDA, 1983. p.32-62.
- ROZAS M, E.C.E.; TOMASELLI, I. Secagem de madeira serrada de *Eucalyptus viminalis*. **Ciência Florestal**, v.3, n.1, p. 147-159. 1993.
- SIAU, J.F. **Transport Processes in Wood**. Berlin: Springer-Verlag, 1984.245p.
- SILVA, J.R.M; MENDES, L.M; TRUGILHO, P.F. Secagem ao ar livre da madeira de *Eucalyptus grandis* para a produção de móveis. **Cerne**, v.3, n.1, p.170-186. 1997.
- STÖHR, H.P. The seasoning of South African grown *Eucalyptus grandis* and *E. saligna*. **South African Forestry Journal**, n.102, p.61-66, Sept. 1977.
- STÖHR, H.P. Progress towards the efficient kiln drying of *E. grandis*. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FOREST PRODUCTS RESEARCH. ACHIEVEMENTS AND THE FUTURE, Pretoria, 1985. **Proceedings**. Pretoria: CSIR, 1985. v.3, p.6-8.
- TOMASELLI, I. Novas técnicas de secagem de madeira. In: SEMINÁRIO SOBRE PROCESSAMENTO E UTILIZAÇÃO DE MADEIRAS DE

REFLORESTAMENTO, Curitiba, 1983. **Anais**. São Paulo: SBS, 1984. p.25-30.

VERMAAS, H.F. Drying eucalipts 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, 1995. **Anais**. Piracicaba: IPEF, 1995. p.119-132.

VERMAAS, H.F. Interaction of wood, water and stresses during drying: a review. **Southern African Forestry Journal**, n.181, p.25-32, Mar. 1998a.

VERMAAS, H.F. Drying of eucalipts with special reference to young, fast-grown plantation material. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA DE ALTA TECNOLOGIA, 1.; ENCONTRO SOBRE TECNOLOGIAS APROPRIADAS DE DESDOBRO, SECAGEM E UTILIZAÇÃO DE MADEIRA DE EUCALIPTO, 2., Belo Horizonte, 1998. **Anais**. Viçosa: SIF, 1998b. p.106-118.

VERMAAS, H.F. A review of drying technology for young fast-grown eucalipts. In: IUFRO, THE FUTURE OF EUCALYPTS FOR WOOD PRODUCTS, Tasmania, 2000. **Proceedings**. Tasmania: IUFRO, 2000. p.225-237.