

EMMANUEL CARLOS ENRIQUE ROZAS MELLADO

**CONTRIBUIÇÃO AO DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO PARA A UTILIZAÇÃO DE  
MADEIRA SERRADA DE *Eucalyptus grandis* (Hill Ex Maiden) NA GERAÇÃO DE  
PRODUTOS COM MAIOR VALOR AGREGADO**

Dissertação submetida à consideração da Comissão Examinadora, como requisito parcial para a obtenção do Título de "Mestre em Ciências - M.Sc." no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Ivan Tomaselli.

CURITIBA

1993

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

P A R E C E R

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado apresentada pelo candidato **EMMANUEL CARLOS ENRIQUE ROZAS HELLADO**, sob o título "CONTRIBUIÇÃO AO DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO PARA A UTILIZAÇÃO DE MADEIRA SERRADA DE *Eucalyptus grandis* NA GERAÇÃO DE PRODUTOS COM MAIOR VALOR AGREGADO)." para obtenção do grau de Mestre em Ciências Florestais - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. Área de concentração em **TECNOLOGIA E UTILIZAÇÃO DE PRODUTOS FLORESTAIS**, após haver analisado o referido trabalho e arguido o candidato, são de parecer pela "**APROVAÇÃO**" da Dissertação, com nota final **9,5**

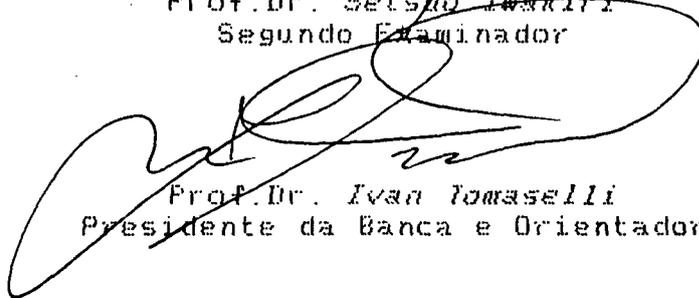
Curitiba, 24 de setembro de 1993



Pesq. Osmar José Romero de Aguiar  
Primeiro Examinador



Prof. Dr. Setso Laskiri  
Segundo Examinador



Prof. Dr. Ivan Tomaselli  
Presidente da Banca e Orientador

A minha mãe

pelo amor e dedicação na minha formação

à minha esposa Patrícia

pela motivação e compreensão,

ao meu filho Cristián

pelas alegrias proporcionadas

Aos meus irmãos

Cristina

Sergio

Marco

Mario

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Ivan Tomaselli, pela orientação e amizade.

Ao Professor Sidon Keinert Junior, pela Co-orientação e sugestões apresentadas.

Ao Professor Walter Kauman pelas suas valiosas contribuições e amizade.

Ao Professor Echard Schmidt, pelo seu incansável apoio e amizade.

À Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, pela aceitação no referido curso.

Ao DEUTSCHER AKADEMISCHER AUSTAUSCHDIENST (DAAD), pelo apoio financeiro.

À Universidad del Bío-Bío, que possibilitou a realização do Curso de Pós-Graduação.

À Fundação de Ensino e Tecnologia (FETEP), pela compra da matéria-prima e coordenação das diferentes etapas que envolveram a obtenção dos dados, e em particular ao Sr. Arthur Gollnick, pelo seu esforço e amizade.

À empresa ARTEFAMA S.A., por ceder uma das suas câmaras de secagem, para a realização da vaporização das toras.

À empresa TUPER S.A. (divisão móveis), pela realização do desdobro e transporte das toras.

Aos Funcionários do Curso de Engenharia Florestal, em particular aos Srs. Vitor e Pedro Herrera, e ao pessoal da Biblioteca do Setor de Ciências Agrárias, em especial à Bibliotecária Dorati M. de L. Andrade.

A todos aqueles que emprestaram sua amizade e apoio durante a realização deste curso, em particular a Paulo Pires, Edvá O. Brito, Augusto Cesar Fayet, Edilson B. Oliveira, Elio José Santini.

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

MUITO OBRIGADO

## SUMARIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	viii
<b>LISTA DE TABELAS</b>	x
<b>RESUMO</b>	xi
<b>ABSTRACT</b>	xii
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	1
<b>OBJETIVOS</b>	2
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b>	3
<b>2.1 FATORES QUE LIMITAM A UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE</b> <i>Eucalyptus</i> <b>E PERSPECTIVAS DE USO</b>	3
<b>2.2 TENSÕES DE CRESCIMENTO</b>	5
2.2.1 Origem das tensões de crescimento	5
2.2.2 Distribuição das tensões de crescimento nas árvores	7
2.2.3 Avaliação das tensões de crescimento	11
2.2.4 Liberação das tensões de crescimento	14
2.2.5 Variação das tensões de crescimento com a altura da árvore	18
<b>2.3 ASPECTOS GERAIS SOBRE A SECAGEM DA MADEIRA</b>	19
2.3.1 Tipos de água existente na madeira	20
2.3.1.1 Movimento de água capilar	21
2.3.1.2 Movimento de água higroscópica	24
<b>2.4 VAPORIZAÇÃO NA SECAGEM</b>	31
2.4.1 Pré-vaporização	31
2.4.2 Vaporização final	33
<b>2.5 O COLAPSO NA MADEIRA</b>	44
2.5.1 Origem do colapso	45
2.5.2 Causas do colapso	46

2.5.2.1 Tensão capilar	46
2.5.2.2 Tensões hidrostáticas	49
2.5.3 Mecanismo do colapso	50
2.5.4 Fatores que influem no colapso	53
2.5.4.1 Fatores inerentes à madeira	53
2.5.4.2 Fatores inerentes ao ambiente	56
2.5.5 Minimização do colapso	58
2.5.6 Recuperação do colapso	58
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>59</b>
3.1 COLETA DO MATERIAL	59
3.2 PRE-TRATAMENTO DAS TORAS	61
3.2.1 Preparação do material	61
3.2.2 Vaporização	61
3.3 DESDOBRO E AVALIAÇÃO DAS TENSÕES	63
3.4 SECAGEM	64
3.4.1 Programas de secagem	64
3.4.2 Seleção do material	68
3.4.3 Controle da secagem	68
3.4.4 Avaliação dos resultados da secagem	70
3.4.4.1 Defeitos de secagem	70
3.4.4.2 Teor de umidade	71
3.4.4.3 Tensões de secagem	72
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>74</b>
4.1 CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL COLETADO	74
4.1.1 Massa específica básica	74
4.1.2 Tensões de crescimento na altura da árvore	77
4.2 LIBERAÇÃO DAS TENSÕES DE CRESCIMENTO	80
4.2.1 Nas toras	80

4.2.2 Na madeira serrada	83
4.3 SECAGEM	90
4.3.1 Taxa de secagem	90
4.3.2 Defeitos de secagem	94
4.3.3 Efeito das vaporizações no teor de umidade da madeira	101
4.3.4 Gradientes de umidade e tensões de secagem	103
4.3.5 Testes pilotos de utilização	110
<b>5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	113
<b>ANEXOS</b>	116
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	126

## LISTA DE FIGURAS

### FIGURA

1	DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES DE CRESCIMENTO	8
2	PREPARAÇÃO DA PRANCHA DIAMÉTRICA PARA A MEDIÇÃO DAS TENSÕES DE CRESCIMENTO	10
3	ANELAMENTO COM MOTOSERRA DA ÁRVORE EM PÉ	16
4	MOVIMENTO SIMPLIFICADO DA ÁGUA CAPILAR	23
5	CAMINHOS DE DIFUSÃO	26
6	COMPORTAMENTO DAS TENSÕES, ACIMA DO PSF	34
7	COMPORTAMENTO DAS TENSÕES NA PRIMEIRA ETAPA DA SECAGEM	35
8	CONTRAÇÃO DA MADEIRA COM E SEM ESFORÇO EXTERNO	37
9	COMPORTAMENTO DAS TENSÕES NA ETAPA FINAL DA SECAGEM	38
10	MANIFESTAÇÃO DAS TENSÕES DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM	40
11	INTERPRETAÇÃO DO TESTE DE GARFO	42
12	AUMENTO DA BOLHA NO LÍQUIDO	47
13	MECANISMO DO COLAPSO	51
14	a) ANELAMENTO COM MOTOSERRA E ALTURA DAS AMOSTRAS PARA DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA BÁSICA (1, 2, e 3), b) ANELAMENTO REALIZADO NOS TORETES	60
15	FORMA DE CORTE UTILIZADO	63
16	MEDIÇÃO DAS RACHADURAS APÓS O DESDOBRO	64
17	OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA: a) TEOR DE UMIDADE, b) GRADIENTE DE UMIDADE c) TENSÕES DE SECAGEM	69

18	INTERPRETAÇÃO DO TESTE DE GARFO a) SEM TENSÃO, b) E c) COM TENSÃO	73
19	VARIAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA BÁSICA MÉDIA NA ALTURA DA ÁRVORE DE <u>Eucalyptus grandis</u> com 14 anos	76
20	TENSÕES NA ALTURA DA ÁRVORE (EM PORCENTAGEM DE RACHADURAS	79
21	TORAS DE <u>Eucalyptus grandis</u> LOGO APÓS A DERRUBADA	80
22	RACHADURAS PROVOCADAS PELO TRATAMENTO DE VAPORIZAÇÃO a) 18 horas e b) 36 horas	82
23	COMPRIMENTO MÉDIO DE RACHADURAS DURANTE O DESDOBRO, DAS TORAS TESTEMUNHA DE <u>Eucalyptus grandis</u>	85
24	ABERTURAS MÉDIAS DAS TÁBUAS DURANTE O DESDOBRO DE TORAS DE <u>Eucalyptus grandis</u> . 18 horas e 36 horas VAPORIZAÇÃO	88
25	CURVA DE PERDA DE UMIDADE PARA OS PROGRAMAS DE SECAGEM ( I E II )	91
26	PORCENTAGEM DE DEFEITOS PARA OS DOIS PROGRAMAS DE SECAGEM. TÁBUAS DE <u>Eucalyptus grandis</u> DE 30 mm DE ESPESSURA	96
27	EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NA DA MADEIRA. a) ANTES DE SER APLAINADA b) DEPOIS DE SER APLAINADA	100
28	TENSÕES INTERNAS EM MADEIRA DE <u>Eucalyptus grandis</u> NO FINAL DO PROCESSO DE SECAGEM (avaliação após 24 horas)	105
29	LIBERAÇÃO DAS TENSÕES DE SECAGEM EM MADEIRA DE <u>Eucalyptus grandis</u> APÓS A VAPORIZAÇÃO POR: a) 1 hora, b) 2 horas c) 4 horas (avaliação após 24 horas)	107
30	AVALIAÇÃO VISUAL DAS TENSÕES DE SECAGEM EM TÁBUAS DE MADEIRA DE <u>Eucalyptus grandis</u> REASERRADAS NA ESPESSURA DA PEÇA (avaliação após 24 horas).	108
31	ESCRIVANINHA EM MADEIRA DE <u>Eucalyptus grandis</u>	111

## LISTA DE TABELAS

### TABELA

1	TEMPERATURAS E TEMPOS DE VAPORIZAÇÃO	62
2	PROGRAMA DE SECAGEM I	66
3	PROGRAMA DE SECAGEM II	67
4	CRITÉRIO PARA AVALIAR AS RACHADURAS NAS TÁBUAS	70
5	MASSA ESPECÍFICA BÁSICA	75
6	VALORES MÉDIOS PERCENTUAIS DE RACHADURAS NA ALTURA DA ÁRVORE E NA ENTRADA E SAÍDA DA SERRA	78
7	TESTE TUKEY PARA MÉDIAS DO FATOR TEMPO ( 18 E 36 HORAS DE VAPORIZAÇÃO	86
8	DEFEITOS PRODUZIDOS DURANTE O DESDOBRO DAS TORAS PRODUTO DA LIBERAÇÃO DAS TENSÕES DE CRESCIMENTO	89
9	TEOR DE UMIDADE INICIAL E FINAL PARA CADA PROGRAMA DE SECAGEM	92
10	DEFEITOS RESULTANTES DA SECAGEM PARA CADA PROGRAMA APLICADO EM TÁBUAS DE <u>Eucalyptus grandis</u> 30 mm DE ESPESSURA	95
11	VARIAÇÃO DOS TEOR DE UMIDADE ANTES E DEPOIS DE CADA VAPORIZAÇÃO	102
12	GRADIENTE DE UMIDADE ANTES (A) E DEPOIS (D) DA VAPORIZAÇÃO FINAL	104

## RESUMO

O objetivo do presente estudo foi o de desenvolver tecnologia para dar suporte e viabilização da utilização da madeira de Eucalyptus grandis na fabricação de produtos de maior valor agregado, considerando a liberação das tensões de crescimento. Estas tensões foram liberadas através do tratamento combinado de anelamento com motosserra e vaporização (temperatura de 100°C). A quantificação das tensões de crescimento foi feita através das rachaduras e aberturas que as tábuas manifestaram durante e após o desdobro das toras. Foram testados dois programas de secagem, que consideraram uma secagem da madeira desde verde até um teor de umidade de 7%. Cada programa de secagem teve uma vaporização inicial, uma vaporização intermediária (recuperação do colapso) e uma vaporização final para a liberação das tensões de secagem, todas elas realizadas a uma temperatura de 100°C e 100% de umidade relativa. A madeira seca foi utilizada num teste piloto para a fabricação de um móvel.

Os resultados obtidos indicam que o anelamento com motosserra dificultou a propagação das rachaduras nos topos das toras durante a vaporização, impedindo que estas se estendessem ao longo da tora ou além do anelamento realizado. O tratamento de vaporização liberou as tensões de crescimento remanescentes nas toras, nos dois tempos de vaporização aplicados (18 e 36 horas). Comprovou-se que o método combinado de anelamento e vaporização é efetivo para a liberação das tensões de crescimento.

O tempo de secagem para o Programa I foi de 25,6 dias, desde 97,6% até 7,6%, teor de umidade inicial e final respectivamente. Para o Programa II, foi de 36 dias, desde um teor de umidade inicial de 127,5% até um teor de umidade final de 6,5%. A vaporização final diminuiu praticamente todas as tensões de secagem nos três tempos de vaporização aplicados (1, 2, 4 horas). Com os dois Programas de secagem aplicados obteve-se 94,4% de madeira aproveitável. No entanto, a porcentagem de colapso foi maior no Programa I (41,7%) que no Programa II (36,1 %). A porcentagem de fendas e rachaduras foi a mesma para os dois Programas de secagem (5,6%). Conclui-se que os Programas de secagem propostos, permitem secar madeira de Eucalyptus grandis desde verde, em um tempo razoavelmente curto e com um mínimo de defeitos.

Pelas qualidades apresentadas a madeira de Eucalyptus grandis pode ser considerada como uma boa alternativa para a fabricação de produtos de maior valor agregado, ou para a produção de madeira serrada, sempre e quando se liberem as tensões de crescimento, de tal forma a maximizar o aproveitamento da matéria prima.

## ABSTRACT

The objective of the present study was to develop a technology to provide support for the feasible use of wood from Eucalyptus grandis to manufacture value added products (furniture), taking into consideration the liberation of the growth tensions. These tensions were released through the combined treatment of kerf with a chainsaw, as well as vaporization (100°C). The quantification of the growth tensions was made according to the cracks and openings that the boards developed during and after sawing the logs. Two drying schedules were tested. Drying was carried out from green until a final moisture content of humidity of 7%. Each drying schedule had an initial vaporization, an intermediate vaporization (recuperation of the collapse) and a final vaporization (release of the drying tension), all of them developed with a temperature of 100°C and a relative humidity of 100%. The dry wood was used for manufacturing furniture. The results obtained indicate that the kerf with chainsaw made the propagation of checks on top of logs during the steaming, difficult, and impeded their extension. The steaming treatment released the tensions of growth in logs in the two times of vaporization applied (18 and 36 hours). Thus it was proved that the combined method is effective for the liberation of growth tensions.

The drying time for Schedules I was 25,6 days, from 97,6% up to 7,5%. For the Schedules II, it was 36 days, from 127,5% to a final humidity of 6,5%. The final steaming reduced completely the drying tensions on the three periods of vaporization applied (1, 2 and 4 hours). With the two Schedules of drying applied obtained 94,4% of useful wood. Nevertheless, the percentage of collapse was bigger in Schedules I (41,7%) than in Schedules II (36,1%). The percentage of cracks and checks was the same for both drying Schedules (5,6%). It was concluded that the Schedules proposed, permit to dry wood of Eucalyptus grandis from green, in a relatively short time and with minimum defects.

Based on quality obtained wood of Eucalyptus grandis may be considered as a good alternative for manufacturing value added, provided that growth stresses are released, and by doing so raw material utilization is increased.

## 1 INTRODUÇÃO

A importância do gênero *Eucalyptus* ao desenvolvimento sócio-econômico do setor industrial florestal é indiscutível. Esta madeira pode ser considerada como uma das melhores opções de matéria-prima para a indústria madeireira pelas suas características físicas e mecânicas, podendo ser utilizada para serrados, laminados, celulose, carvão, moirões, energia e para outros fins.

No entanto, apesar das amplas possibilidades de utilização, esta madeira é pouco aproveitada atualmente no Brasil no que se refere a madeira serrada, produção de lâminas, painéis e produtos acabados. Isto deve-se, em parte, à presença de certas características desfavoráveis da madeira, tais como uma elevada retratibilidade e principalmente à propensão ao colapso durante a secagem, e à presença de estas tensões de crescimento.

O conhecimento destas tensões e de alternativas para a sua liberação facilitará a obtenção de um maior aproveitamento da matéria-prima, tanto no desdobro como na laminação de toras. Estas tensões manifestam-se imediatamente após a derrubada da árvore e na confecção dos toretes, através de rachaduras nos topos das toras e, no desdobro, em empenamentos e rachaduras nas tábuas. Em geral as tensões de crescimento são de baixa intensidade nas coníferas e de maior grau nas folhosas, podendo alcançar níveis bastante elevados, especialmente em madeira de *Eucalyptus*, *Fagus* e *Populus* (NICHOLSON, 1973b). Assim como a liberação das tensões de crescimento, o processo de secagem da madeira é extremamente importante para viabilizar sua utilização, sobretudo para esta espécie de madeira que é propensa ao colapso. O colapso, de forma geral, define-se como sendo um achatamento ou deformação das células lenhosas durante a secagem, evidenciando uma contração excessiva e/ou desigual na madeira. Este defeito ocorre acima do ponto de saturação das fibras (28%), e para minimizá-lo, KAUMAN (1964) recomenda uma temperatura inicial de secagem não superior a 40°C.

Além, dos problemas apresentados soma-se a falta de informações por parte das empresas sobre o processamento mecânico mais adequado para o eucalipto, impedindo com isto que estas indústrias venham a beneficiar-se do aproveitamento desta matéria-

prima. Contudo, existe sem dúvida uma grande necessidade de maiores estudos, a fim de utilizar em maior escala a madeira de eucalipto.

Para a realização do presente trabalho utilizou-se madeira de Eucalyptus grandis, considerando as dificuldades apresentadas pelo gênero, tanto nas diferentes etapas do seu processamento mecânico como na secagem da madeira, de tal forma a aumentar o aproveitamento das tábuas durante o desdobro (através da liberação das tensões de crescimento) e minimizar os defeitos durante a secagem, principalmente o colapso. Com este trabalho espera-se contribuir para aumentar a expectativa de utilização da madeira de Eucalyptus grandis tanto para madeira serrada, como para produtos de maior valor agregado, considerando os seguintes objetivos:

**a.- Objetivo geral**

Objetiva-se com este estudo contribuir para o desenvolvimento tecnológico da utilização da madeira de Eucalyptus grandis na produção de madeira serrada e na fabricação de produtos de maior valor agregado.

**b.- Objetivos específicos**

- Avaliar a eficiência do método combinado de anelamento e vaporização (90°C) na liberação das tensões de crescimento.
- Avaliar a viabilidade técnica da aplicação de dois programas de secagem previamente elaborados na qualidade da madeira.
- Verificar a possibilidade de liberar as tensões de secagem com períodos curtos de vaporização ( $\approx 100^{\circ}\text{C}$ ).
- Verificar a viabilidade de utilização da madeira de Eucalyptus grandis na fabricação de produtos de maior valor agregado.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 FATORES QUE LIMITAM A UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE *Eucalyptus* E PERSPECTIVAS DE USO.

As madeiras tradicionalmente utilizadas para móveis, construção civil e outras finalidades tornam-se cada vez mais caras por estarem suas fontes mais distantes dos centros de processamento e consumo. Esse problema agravou-se com o esgotamento da principal espécie utilizada na indústria madeireira, a *Araucaria angustifolia*, deixando uma grande lacuna nas indústrias que necessitam de madeira a preço baixo, e de qualidade igual ou superior à do pinheiro.

Apesar da grande demanda de madeira serrada para a construção civil, móveis ou outros produtos de maior valor agregado, até agora os eucaliptos, que são as maiores reservas acessíveis e exploráveis, têm sido muito pouco utilizados com estes fins, sendo sua aplicação quase sempre limitada à produção de carvão, celulose e chapas de fibras. Isto se deve, em parte, à presença de certas dificuldades na sua conversão, provocadas por algumas características intrínsecas do gênero, tais como uma elevada retratibilidade, propensão ao colapso durante a secagem e principalmente à presença de tensões de crescimento.

As tensões de crescimento manifestam-se imediatamente após a derrubada da árvore e na confecção dos toretes, através de rachaduras nos topos das toras e através de empenamentos e rachaduras das tábuas no desdobro de toras e pranchões (NICHOLSON, 1973b).

De um modo geral, o eucalipto apresenta uma acentuada retração volumétrica e uma forte tendência ao colapso durante a secagem. A adoção das técnicas normalmente utilizadas na secagem tem como consequência uma perda significativa do volume de madeira aproveitável, desestimulando ainda mais a sua utilização. Para minimizar o colapso durante a secagem da madeira KAUMAN (1964) recomenda uma temperatura inicial não superior a 40°C.

Além dos problemas apresentados, soma-se a falta de informação por parte das empresas sobre o processamento mecânico mais adequado para o eucalipto, impedindo o aproveitamento desta matéria-prima por parte das indústrias.

No entanto, apesar dos problemas intrínsecos do gênero, esta madeira pode ser perfeitamente utilizada sem maiores problemas, sempre e quando se considerem suas limitações, representando assim, um grande potencial de matéria prima para o setor industrial florestal, pelas suas características físico-mecânicas e por encontrar-se os plantios perto dos grandes centros consumidores, diminuindo os custo de transporte.

Os plantios de *Eucalyptus*, por apresentarem uma elevada produtividade, permitem rotações relativamente curtas, quando comparadas com as madeiras nativas, podendo-se obter toras de bom diâmetros para serraria em 20 ou 30 anos, uma vez que o bom êxito da utilização desta madeira para serraria depende, estreitamente, da idade das árvores usadas; como já mostrado na prática, as árvores muito jovens têm uma maior facilidade para rachar e fendilhar.

A grande variedade de espécies de *Eucalyptus* plantadas no Brasil permitirá a substituição do uso de várias folhosas nativas, sendo imprescindíveis a identificação de espécies apropriadas aos diversos fins. É importante destacar a importância do desenvolvimento de programas de melhoramento genético com vistas à redução das tensões de crescimento, permitindo um maior aproveitamento da matéria-prima durante o desdobro, possibilitando sua utilização a grande escala como madeira serrada, laminados, móveis, vigas laminadas, e produtos de maior valor agregado, entre outros.

Por outro lado, a utilização da madeira de eucalipto, permitirá substituir a madeira de folhosas nativas, sendo esta uma tendência recente e, aparentemente, irreversível, podendo vir a diminuir a possibilidade de continuar importando espécies do Paraguai como é o caso, embora restrito, da peroba, cedro, e marfim, entre outras.

## 2.2 TENSÕES DE CRESCIMENTO

O Eucalyptus é uma madeira que requer certos cuidados por ocasião do seu processamento, pois possui algumas características desfavoráveis, tais como retratibilidade relativamente alta, susceptibilidade ao colapso durante a secagem da madeira serrada, e à presença das tensões de crescimento. A consideração destas tensões e sua liberação permitirão obter um maior aproveitamento da matéria-prima, tanto no desdobro como na laminação de toras. Estas tensões manifestam-se imediatamente após a derrubada da árvore e na confecção dos toretes, em rachaduras nos topos das toras, e, no desdobro, em empenamentos e rachaduras nas tábuas. Em geral as tensões de crescimento são de baixa intensidade nas coníferas e de maior grau nas folhosas.

### 2.2.1 Origem das tensões de crescimento

As tensões de crescimento são observadas em muitas espécies florestais (JACOBS, 1965). Estas tensões são intrínsecas ao crescimento das árvores, e em geral são de baixa intensidade em coníferas. Em folhosas podem alcançar níveis bastante elevados, especialmente em madeira do gêneros Eucalyptus, Fagus e Populus (NICHOLSON, 1973b). As tensões de crescimento podem ocorrer no sentido longitudinal, radial e tangencial (WILKINS, 1986). As tensões de crescimento estão presente na árvore, manifestando-se na tora no momento ou logo após a derrubada, ou durante o desdobro destas toras. Desta forma, diferenciam-se das tensões de secagem, que são causadas pela contração da madeira, devido a gradientes de umidade gerados no processo de secagem (DINWOODIE, 1966).

A primeira tentativa de explicar a origem das tensões de crescimento foi feita por MARTLEY em 1928 (DINWOODIE, 1966; BOYD, 1972; CHAFE, 1979 e CONRADIE, 1980), que observou que tábuas de olmo (Ulmus sp) curvavam-se logo após o desdobro, como resultado de tensões causada pelo aumento do peso da árvore durante o seu crescimento. Posteriormente, MUNCH (1938) citado por DINWOODIE (1986), sugeriu

que tais tensões se deviam à contração das paredes celulares da madeira em tração, devido ao inchamento das mesmas no sentido transversal, pela deposição de materiais sólidos nos espaços laterais intermicelares durante a lignificação. Com o aumento da pressão, ocorre o inchamento tanto da parede como da célula, e subsequente alteração da microfibrilas. Embora, esta hipótese seja desenvolvida para madeira de tração ela também tem sido usada para explicar as tensões de crescimento nos troncos de árvores normais e retas.

JACOBS (1938) citado por CONRADIE (1980), foi o primeiro que sugeriu que a origem das tensões é o resultado do possível encurtamento da nova camada de crescimento da madeira, e que esse fenômeno de mudança dimensional ocorre num determinado estágio de desenvolvimento da célula. O mesmo autor, em 1945, sugeriu que as tensões de crescimento eram causadas por uma reação ao fluxo da seiva.

Esta teoria foi criticada por BOYD (1950c) citado por AGUIAR (1986), que considerou que as forças de sucção nas árvores são maiores nos topos e, sendo assim, as tensões deveriam apresentar uma distribuição semelhante, o que não é o caso. Adicionalmente as forças de sucção, se consideradas como responsáveis pelas tensões, serão capazes de causar o colapso nas fibras, o que também não acontece normalmente. Em 1965, JACOBS reconheceu que sua hipótese não era adequada.

JACOBS (1965) e BOYD (1950a) citado por KUBLER (1987), concluíram que a lignificação das paredes celulares é a origem primária das tensões de crescimento, já que as fibras podem alongar-se ou contrair-se como resultado da lignificação, em decorrência do próprio crescimento da árvore, que tende a aumentar seu volume. A contração longitudinal da célula em crescimento é dificultada pelas células vizinhas mais velhas, pois são submetidas a um esforço de tração, enquanto as mais velhas recebem um esforço de compressão. Já o crescimento lateral das células vizinhas mais velhas, provocam o aparecimento de tensões transversais de compressão na periferia do tronco.

Posteriormente, WATANABE (1965) concordou com a hipótese de BOYD (1950c), também é aceita por BOYD (1972), CHAFE (1979), SALES (1986) entre outros. BOYD considerou que as tensões de crescimento estão relacionadas à lignificação

das células, já que a lignina é depositada e polimerizada na parede secundária da célula (S2), provocando um inchamento irreversível nesta parte da célula, tanto no sentido transversal como longitudinal, neste caso o tamanho da deformação depende do ângulo microfibrilar.

### 2.2.2 Distribuição das tensões de crescimento nas árvores

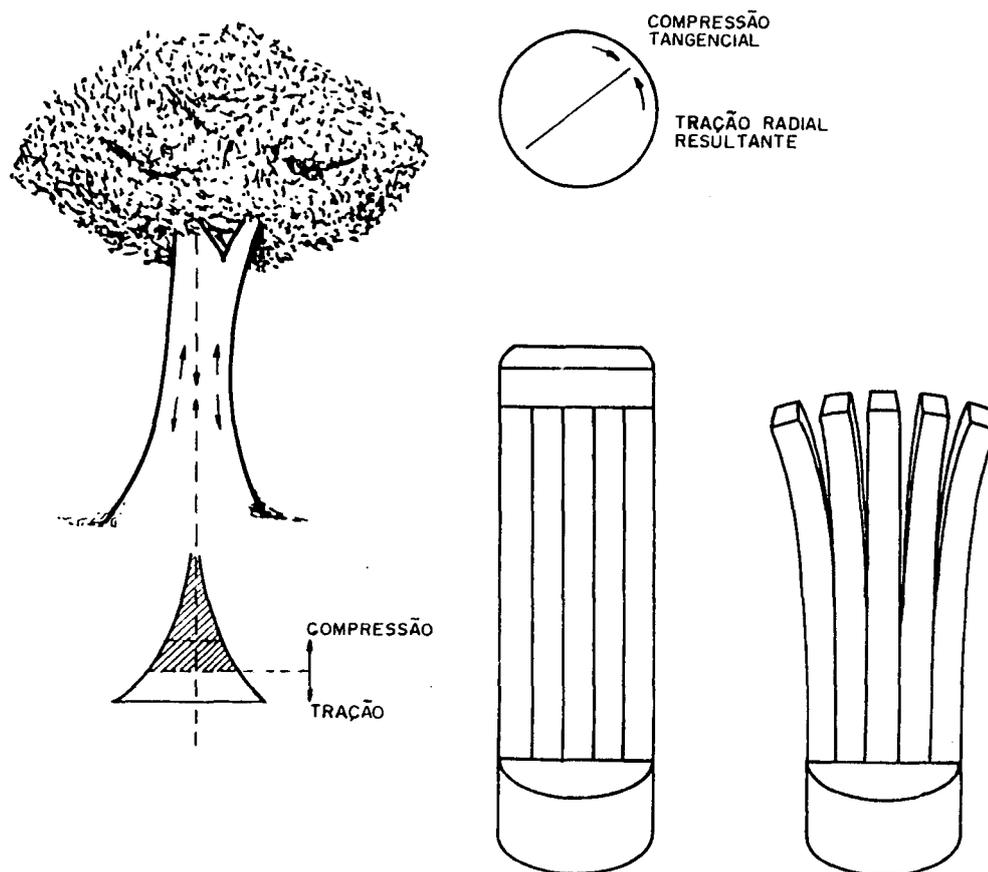
A magnitude e distribuição das tensões de crescimento resultam da fisiologia e das propriedades da madeira, que são tanto genéticas como modificadas pelo meio ambiente (NICHOLSON1973).

Os troncos das árvores, quando crescem em diâmetro, são submetidos a um ligeiro encurtamento entre dois pontos quaisquer, próximos à periferia e no sentido longitudinal, o que impõe uma compressão axial na madeira interna em direção à medula e uma progressiva tração na periferia da árvore (JACOBS, 1965). Isto é mostrado na figura 1. Este fenômeno deve-se à incorporação da lignina nos espaços intermicro-fibrilares da parede secundária, induzindo a uma contração longitudinal da célula como resultado da sua expansão no plano transversal nas camadas de crescimento. A quantidade de lignina polimerizada é diferente em diferentes áreas das tensões periféricas (WATANABE, 1965; BOYD, 1950c, citado por AGUIAR, 1986; BOYD, 1972).

Estudando a distribuição das tensões internas de crescimento, JACOBS (1965), observou este mesmo fenômeno de deformação tanto nos troncos como nos galhos e raízes de eucalipto.

## FIGURA 1 - DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES DE CRESCIMENTO

Fonte: KRILOV &amp; DOWDEN\*, 1987 (adaptação).



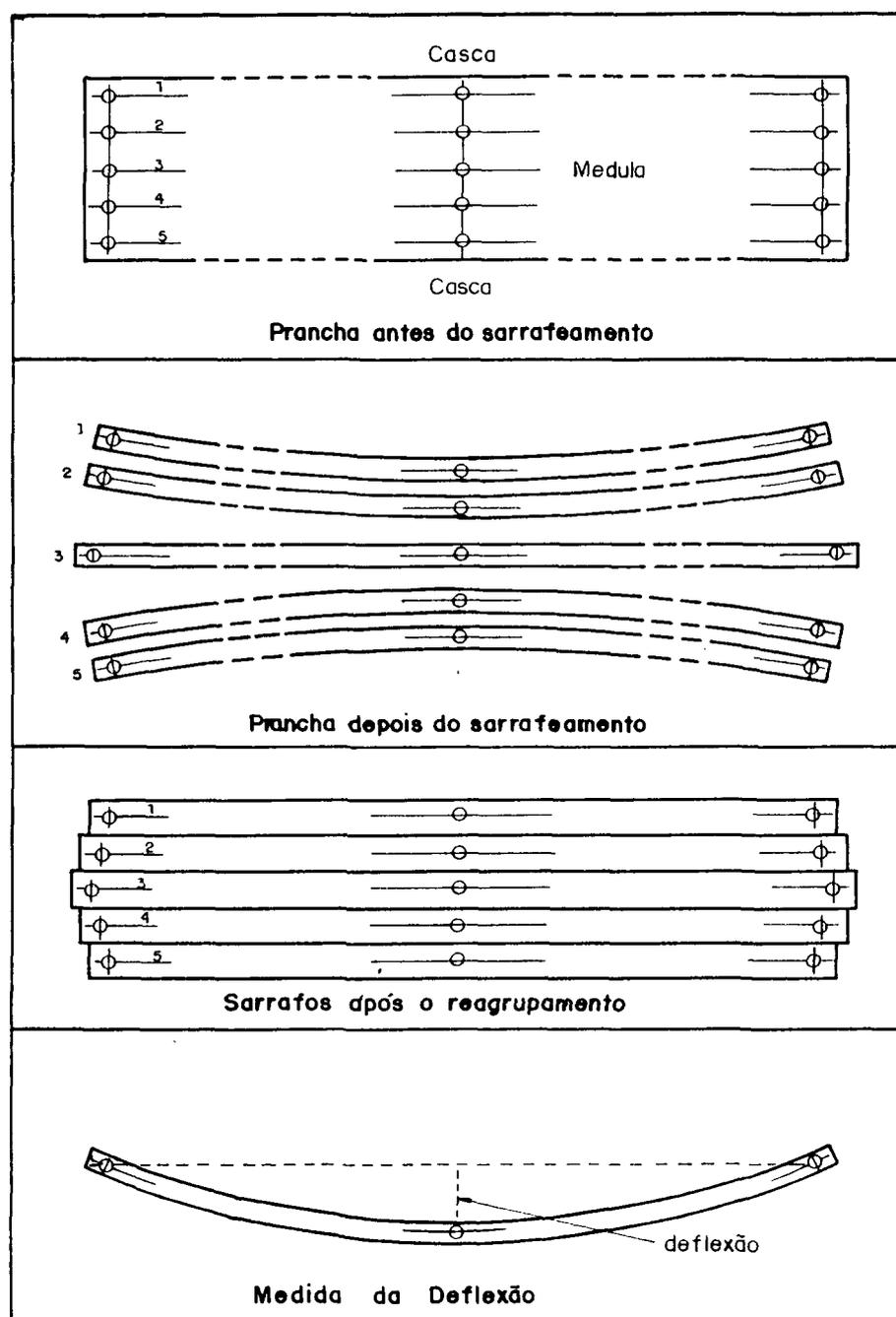
\* KRILOV A. & DOWDEN LL. The influence of defects on the utilization of small diameter logs. *Holz als Roch-und Werkstoff*. 45:375-378, 1987.

JACOBS (1938, 1939, 1945) e KUBLER (1959), citados por AGUIAR (1986), estudando o comportamento e distribuição das tensões de crescimento nos troncos das árvores, os quais observaram mudanças em extensão e na tendência a curvar-se das amostras, quando retiradas da prancha diamétrica (figura 2). A prancha diamétrica corresponde a uma peça de madeira retirada do centro da tora, com uma largura igual ao diâmetro da tora. De suas observações concluíram que a madeira próxima à periferia da árvore estava sob tração longitudinal e no centro, próximo à medula estava sob compressão. A distribuição das tensões de crescimento longitudinal variam de uma tração máxima na periferia até um valor zero por volta de  $1/3$  a  $1/2$  do raio, seguindo em compressão crescente até a medula (BOYD, 1950a citado por AGUIAR (1986) e JAKOBS, 1965). Como o crescimento em diâmetro das árvores é formado por novas camadas de células em diferenciação, surge no xilema, logo imediatamente ao câmbio, a formação da tensão de tração, que é considerada baixa quando analisada a nível de camada individual, mas que torna-se máxima na periferia das toras pelo acúmulo das camadas de crescimento no sentido radial. Em virtude do novo xilema encontrar-se em contato com o xilema diferenciado mais antigo (maduro), inicia-se progressivamente uma tensão de compressão longitudinal de crescimento no centro da tora (MALAN, 1984). Em algumas espécies, o aumento do diâmetro e o efeito acumulativo das camadas sucessivas de crescimento em estado de tração, induz a uma compressão na parte central do tronco, superior ao seu limite elástico, causando o desenvolvimento de inúmeras fendas de compressão tanto na madeira como nas paredes das células, fenômeno denominado de madeira quebradiça ("brittleheart") (DINWOODIE, 1966 e MALAN, 1984).

Imediatamente após a derrubada da árvore podem surgir rachaduras nos topos das toras, devido ao gradiente de tensão longitudinal que existe entre o lado interior e exterior do tronco, associada com o efeito das tensões transversais. As tensões de crescimento tangencial são forças de compressão próximas à periferia da árvore e a tensão radial, que é superior, está próxima à medula, estando balanceadas.

FIGURA 2 - PREPARAÇÃO DA PRANCHA DIAMÉTRICA PARA A MEDIÇÃO DAS TENSÕES DE CRESCIMENTO (JACOBS, 1945).

Fonte: AGUIAR, 1986.



JACOBS (1945) citado por AGUIAR (1986) demonstrou num estudo das tensões de crescimento transversal, pelo corte em espiral da periferia em direção à medula, num disco cortado transversalmente de um tronco, que houve uma expansão das camadas externas. O mesmo ocorre quando um círculo externo de um disco é cortado, enquanto o disco interno restante contrai-se.

A magnitude das tensões transversais apresentaram valores para compressão tangencial variando entre  $7 \text{ kg/cm}^2$  a  $28 \text{ kg/cm}^2$ , consideradas baixas segundo JACOBS (1945) e BOYD (1950), referenciados por AGUIAR (1986). Por ocasião do corte transversal as forças longitudinais são transferidas para o plano horizontal ocorrendo em consequência, um aumento maciço das tensões transversais, que alcançam um décimo das magnitudes das tensões longitudinais. No entanto, como a madeira é bem menos resistente transversalmente, as deformações transversais são maiores do que as longitudinais, provocando freqüentemente rachaduras em troncos e pranchões.

Outro efeito das tensões de crescimento longitudinais é o empenamento de peças serradas e a variação de seu comprimento quando cortadas em pequenas ripas ( JACOBS, 1945 citado por AGUIAR, 1986).

### 2.2.3 Avaliação das tensões de crescimento

A partir do momento em que as árvores são cortadas, as altas tensões de crescimento são liberadas e podem provocar três principais defeitos (NICHOLSON, 1973b ):

- 1.- Fendas ou rachaduras nos extremos das toras, após o corte das árvores.
- 2.- Empenamentos e rachaduras longitudinais durante o desdobro de toras e pranchões.
- 3.- Cerne quebradiço, resultado da excessiva tensão de compressão, limitando o uso desta madeira.

Dentre estes defeitos as rachaduras de topo são as mais evidentes manifestações das tensões de crescimento. O modo mais simples de avaliar o nível geral das tensões de crescimento é após a derrubada da árvore, onde se observa a evolução das rachaduras no topo seccionado transversalmente. Esta, entretanto, é uma avaliação qualitativa, não exata e dependente do próprio nível de tensão, do diâmetro da árvore, de fendas centrais pré-existentes e do impacto da derrubada. Além disso, é um método que altera o estado de equilíbrio das tensões que existem na árvore, e também impossibilita a repetição da medição por ser um método destrutivo (CHAFE, 1979).

De acordo com MAEGLIN et alii (1985), para a determinação da tensão de crescimento longitudinal (S) em uma peça de madeira é necessário medir na árvore o comprimento do segmento (L), logo removê-la e efetuar uma nova medição. O valor para a deformação de crescimento longitudinal é representado pelo quociente da divisão entre a deformação ( $\Delta L$ ) encontrada e o comprimento inicial (L) da peça medida no sentido longitudinal da árvore. Esse valor, quando multiplicado pelo módulo de elasticidade da madeira (E), é transformado em tensão de crescimento longitudinal (S) e representado pela seguinte equação:

$$S = E \times \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad \text{Equação 1}$$

Os primeiros trabalhos sobre a determinação da magnitude e variação das tensões de crescimento longitudinal nos troncos das árvores foram conduzidos por JACOBS (1938, 1939, 1945) e citados por AGUIAR (1986), onde foram medidas as mudanças dos comprimentos das ripas retiradas das pranchas diamétricas no sentido longitudinal, na direção medula-casca.

Apesar da utilização da prancha diamétrica ser um método bem conhecido, utilizado por autores como JACOBS (1965), WATANABE (1965) e GIORDANO et alii (1969), e ter apresentado resultados mensuráveis sobre a distribuição das deformações e

tensões longitudinais nas árvores, vários pesquisadores vêm chamando atenção para o efeito da redistribuição das tensões, que ocorrem nas transformações das toras em pranchas diamétricas; como consequência, os resultados das tensões não representam as mesmas magnitudes das encontradas nas árvores em pé.

Nenhum dos métodos utilizados até agora para avaliar os níveis das tensões de crescimento contempla a medição direta destas tensões. Todos eles se baseiam no princípio da liberação parcial das tensões de crescimento, seja num ponto ou ao redor da tora, onde são medidas as tensões.

Vários métodos de medição de superfície têm sido utilizado nos últimos anos, onde as deformações podem ser obtidas através de medidores de deformação, convenientemente ajustados em pontos pré-selecionados.

NICHOLSON (1971) desenvolveu um método rápido para determinar as tensões longitudinais de crescimento na superfície das toras ou árvores. O método consiste em medir a tensão de deformação longitudinal de pequenos segmentos extraídos da superfície da madeira. Os segmentos são retirados de vários pontos ao redor da tora, seguindo como referência uma linha pré-desenhada ao redor da tora. Em amostras localizadas na superfície, foram medidos três pontos no sentido axial da tora, sendo retiradas posteriormente as amostra contendo estes três pontos. Antes e após a remoção dos segmentos os pontos foram medidos, e determinadas as deformações através da diferença em comprimento que estes segmentos apresentam. Posteriormente, o mesmo autor (1973a) utilizou a mesma técnica para determinar as tensões de crescimento em toras armazenadas sob aspersão de água.

Em outro método, utilizado por SAURAT & GUENEAU (1976) citado por KUBLER (1987), remove-se primeiro a casca num determinado local do tronco, onde posteriormente se coloca um ou vários medidores de deformação, em pontos pré-selecionados, tomados como referência para a medição de deformação longitudinal, segundo o procedimento adotado por NICHOLSON (1971). A liberação das tensões é

obtida a partir de dois orifícios feitos em ambos os lados do bloco a ser removido, ou removendo-se completamente o bloco sobre o qual o medidor está colocado.

Outra versão do método anterior é proposta por CHARDIN & SALES (1983), usada para o estudo das tensões residuais. Marca-se quatro pontos numa determinada parte da árvore, posteriormente é realizado um furo no centro destes quatro pontos e mede-se o deslocamento existente entre eles. Para medir este deslocamento existem diferentes medidores de deformação.

O método utilizado na Guiana Francesa pelo C.T.F.T. (CHARDIN et alii, 1986, citado por SALES, 1986), usa micro-ripas longitudinais com área de 2-3 mm<sup>2</sup> para avaliar as tensões de crescimento, determinadas através da variação em dimensão destas áreas medidas antes e depois de ser cortadas.

SASAKI et alii (1981) citado por SALES (1986), determinaram as tensões de crescimento por meio do incremento diametral que sofre um orifício feito no centro de toras de 45 cm de comprimento.

Os outros métodos que existem, além dos anteriormente indicados, trabalham com a variação dimensional que sofre uma ripa de madeira cortada longitudinalmente. Pode-se também determinar a curvatura das peças (radiais) obtidas durante o desdobro (GUENEAU, 1973 citado por SALES, 1986). Outra alternativa seria medir as rachaduras longitudinais produzidas nas tábuas, durante e após o desdobro das toras (ROZAS, 1992).

#### 2.2.4 Liberação das tensões de crescimento

Várias formas são utilizadas no mundo todo para aliviar as tensões de crescimento; no entanto, por uma razão ou por outra, nenhuma delas é considerada inteiramente satisfatória (CHAFE, 1979). O ideal para a neutralização das tensões de crescimento seria a utilização de técnicas aplicadas nas árvores em pé, de tal forma de reduzir as rachaduras que ocorrem por ocasião da derrubada da árvore e de sua transformação em toras.

Entre os métodos utilizados para aliviar as tensões de crescimento, estão o uso de fitas metálicas ou plásticas, que são colocadas ao redor do tronco da árvore, antes da sua derrubada (WILHELMY & KUBLER, 1973 citados por KUBLER, 1987, KUBLER & CHEN, 1975, DE VILLIERS, 1973).

Outro método aplicado corresponde ao uso de conectores metálicos antirachaduras, tipo "gang nail" e ganchos em forma de S ou C aplicados imediatamente após o corte da árvore. Estes apresentaram um efeito positivo na diminuição do desenvolvimento das rachaduras de topo, segundo TISSEVERAISEQUE (1967), MAYER-WEHEELIN (1955), citados por MALAN (1984) e AGUIAR (1986). Para GERALDO & SODRÊ (1983) citado por AGUIAR (1986), os conectores metálicos tipos "gang nail" são os que mais contribuíram para a redução das rachaduras de topo.

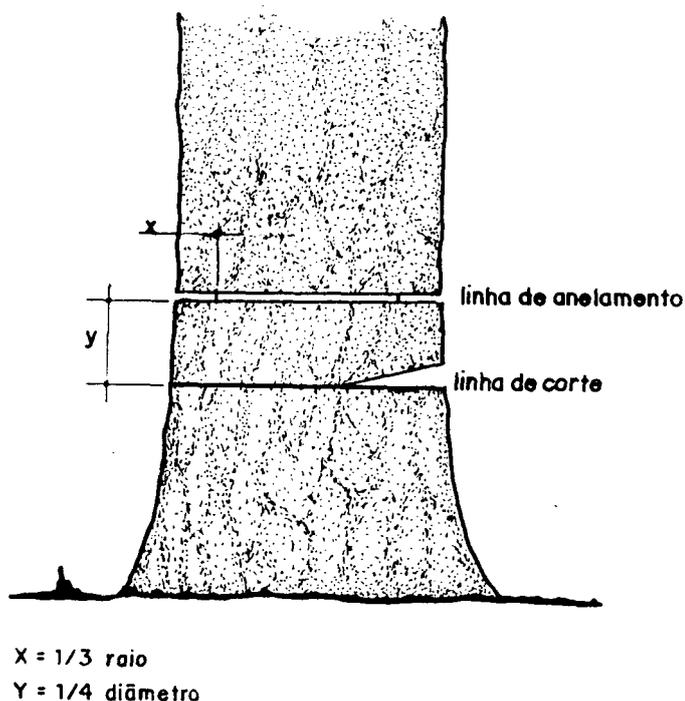
DE VILLIERS (1973) e NICHOLSON (1973a) aplicaram a técnica de secagem da árvore em pé, realizando um anelamento do alburno. Este método apresentou bons resultados na diminuição das rachaduras de topo. Trabalho semelhante foi desenvolvido por GIORDANO et alii, (1969) e GIORDANO & CURRO (1972), que avaliaram o efeito do anelamento do alburno nas árvores em diferentes intervalos de tempo, sendo estas cortadas após realizado o anelamento aos 5, 8 e 17 meses.

Um outro método aplicado na árvore em pé é o anelamento (figura 3), que consiste em efetuar um corte com motosserra em torno do tronco, antes da derrubada e na posterior confecção dos toretes. Este corte deve ser feito acima do corte de derrubada da árvore, a uma determinada profundidade e altura (GIORDANO & GHISI, 1965) citados por KUBLER, 1987. Este método mostrou uma significativa redução nas rachaduras de topo (HILLIS, 1978) e tem sido estudado por vários pesquisadores, tais como BARNACLE & GOTTSTEIN (1968); GIORDANO & CURRO (1972), VAN VYK (1978) citado por MALAN (1984), KUBLER & CHEN (1975), CONRADIE (1980), AGUIAR (1986) e KEINERT Jr. et alii (1992).

WILHELMY & KUBLER (1973) citados por KUBLER (1987), analisaram o efeito do anelamento com motosserra sobre a força transversal através do corte. De acordo

com estes estudos, a eficiência do anelamento com motosserra aumenta com o aumento da profundidade deste, como esperado. A distância entre o anelamento e o topo da tora é menor quanto mais profundo for o anelamento. Por exemplo, para um anelamento com uma profundidade de  $1/3$  do raio da árvore, a distância mais efetiva para realizar o corte de derrubada, será de  $1/4$  do diâmetro da tora, distância esta entre o corte de anelamento e o corte de derrubada. (KUBLER, 1987). De forma geral a profundidade do corte varia de  $1/3$  a  $1/2$  do raio. Cada anelamento, de qualquer modo, cria uma nova e parcial rachadura de topo, sendo iniciadas novas forças de tensão tangencial ao anelamento. Por esta razão, é inútil fazer um anelamento maior de  $1/3$  de profundidade.

FIGURA 3 - ANELAMENTO COM MOTOSERRA DA ÁRVORE EM PÉ



Com o propósito de liberar as tensões de crescimento, têm sido desenvolvidas técnicas de desdobro, tais como de corte radial, corte tangencial, corte tangencial de dois lados simétricos utilizando serras múltiplas e girando a tora para o próximo corte. Em 1990, MONTGNA et alii, estudando a liberação das tensões de crescimento em Eucalyptus punctata, através de cortes simétricos com uma serra de fita geminada, realizaram primeiro um corte a 1/3 do raio e, girando a tora, repetiram a operação no segundo corte. Concluíram que as costaneiras (sob tração) e o bloco central (sob compressão) ficaram sob o efeito de apenas uma força de crescimento. Desta forma, pode-se obter tábuas com índices de rachaduras menores e até mesmo nulos.

O armazenamento sob água têm sido freqüentemente recomendado como um método para reduzir as rachaduras de topo. Eucalyptus robusta armazenado sob aspersão por 3,5 meses, reduziu grandemente as rachaduras, manchas e o ataque de insetos (SKOLMEN, 1965 citado por MALAN, 1984). Também o armazenamento de toras de Eucalyptus regnans reduziu as rachaduras em 20 %, quando armazenadas por um período de 300 dias sob aspersores (NICHOLSON, 1973a). Trabalho semelhante foi desenvolvido por AGUIAR (1986), em madeira de Eucalyptus grandis, que foi mantida por dois e doze meses, tanto sob aspersão como sob imersão total. Concluiu que o tratamento de imersão total é mais efetivo que o tratamento de aspersão no controle das rachaduras de topo e do ataque de insetos e fungos.

AGUIAR (1986), entre outros autores, manifestou a possibilidade de aliviar as tensões de crescimento nas toras verdes pela aplicação de calor e umidade, de tal forma a plasticizar a lignina na madeira. A principal desvantagem deste método, é que, em certos casos, ajuda no desenvolvimento de rachaduras de topo ou aumenta as já existentes. Estudos desenvolvidos por LUTZ & PANZER (1969) citado por KUBLER (1987), indicaram que o aquecimento de toras em água a 93°C por dois dias, liberou completamente as tensões de crescimento, e a uma temperatura de 65°C o tratamento aliviou 2/3 destas tensões. O mesmo autor (LUTZ, 1974), confirma este fato, ao constatar que, quando a madeira é aquecida a uma temperatura de 82°C, aproximadamente 90 % ou

mais das tensões de crescimento são liberadas. A imersão das toras verdes em água quente por seis semanas também tem um efeito positivo sobre as tensões de crescimento (IMAN & HEIKAL, 1972, citados por HILLIS, 1978). Um tratamento por 24 horas em água quente, a uma temperatura de aproximadamente 96°C, em madeira de Eucalyptus viminalis, tem um efeito satisfatório na liberação das tensões de crescimento (SKOLMEN, 1967). Uma considerável diminuição nas tensões de crescimento longitudinais, foi observado em madeira de Eucalyptus camaldulensis e Eucalyptus viminalis, quando armazenados em um ambiente rico em vapores amoniacais a 60°C, por um período de 5 e 7 meses (GIORDANO & CURRO, 1973).

A aplicação de vapor a 110°C por mais de 10 horas, reduzem as tensões de crescimento em madeira serrada de Yellow poplar (WEIK et alii, 1984). Da mesma forma em 1967 SKOLMEN obteve bons resultados com a aplicação de vapor a 96°C por 48 horas em toras de Eucalyptus saligna. OKUYAMA et alii (1987) tiveram resultados favoráveis na liberação das tensões de crescimento em toras de Zelkova serrata Makino, quando aquecidas por meio de vapores (fumaça) quentes à temperatura de 150-200°C por mais de 40 horas.

Outra tentativa foi sugerida por CHAFE (1979), que se baseava na utilização de um processo de bloqueamento da lignina na árvore, uma vez que esta é um fator que contribui para a formação das tensões de crescimento. Em certas espécies de árvores uma infecção virótica que resulta uma lignificação incompleta, o que resulta na deformação do tecido lenhoso conhecida por "madeira elástica". Dessa maneira, o autor espera que as tensões de crescimento nas árvores tratadas sejam extremamente baixas ou até mesmo inexistentes.

#### 2.2.5 Variação das tensões de crescimento com a altura da árvore

A correlação entre as tensões de crescimento e a posição na árvore, tem sido estudadas por vários pesquisadores. JACOBS citado por BOYD (1950 III) e referenciado

por MALAN (1984), não observou nenhum efeito da altura nas tensões de crescimento. SALES (1982) comenta que não há nenhuma variação apreciável entre a primeira e a segunda tora. YAO (1979), trabalhando com três árvores de folhosas da América do Norte, encontrou uma baixa correlação entre a altura e as tensões de crescimento longitudinais, que aumentaram até 8 metros e diminuíram para os 11 metros. NICHOLSON (1971) observou aumento em madeira de Eucalyptus regnans e Eucalyptus nitens. CHAFE (1981) observou um aumento das tensões de crescimento longitudinais com a altura da árvore em madeira de Eucalyptus regnans, embora não estatisticamente significativo, concluindo, portanto, que as toras obtidas das regiões mais altas da árvore, podem ser mais propensas a rachaduras. Contradizendo os três últimos autores, MALAN (1984) observou que as rachaduras em madeira de Eucalyptus grandis foram consideravelmente maiores nos primeiros 2-3 metros, diminuindo de intensidade com a altura da árvore, concluindo que as toras acima de 3 metros podem ser mais adequadas para serraria ou laminação.

### 2.3 ASPECTOS GERAIS SOBRE A SECAGEM DA MADEIRA

A madeira é um material higroscópico que mantém relações dinâmicas com a água do meio ambiente. Em função do seu próprio teor de umidade, da umidade relativa e da temperatura do ambiente, pode adquirir ou ceder água ao meio.

Na madeira, de uma forma bastante simplificada, pode-se considerar que a água se desloca das regiões de alto para as de baixo teor de umidade. Na forma líquida e como vapor, movimenta-se pelas aberturas naturais da madeira e através das paredes celulares. Basicamente a secagem da madeira consiste na remoção da umidade de sua superfície, ao mesmo tempo em que ocorre o movimento da água do interior para esta superfície.

### 2.3.1 Tipos de água existente na madeira

Para entender como a água se movimenta na madeira por ocasião da sua secagem, é necessário conhecer as condições sob as quais ela ocorre nas células lenhosas. Os tipos de água existentes na madeira são frequentemente classificados da seguinte forma (BROWN et alii, 1952; KOLLMANN & CÔTE, 1968; CECH & PFAFF, 1977):

**a.-** Água livre ou capilar: é aquela localizada nos lúmens celulares e espaços intercelulares, retida por forças capilares.

**b.-** Água de impregnação ou higroscópica: é aquela água que se encontra nas camadas polimoleculares nos espaços submicroscópicos da parede celular, ligada por forças elétricas.

No processo de secagem, a primeira água a ser removida é a água contida nas cavidades celulares (vasos, canais resiníferos e nos lúmens das células), que é denominada de água livre ou água de capilaridade, que se encontra retida por forças capilares, apreciavelmente menores do que as que mantêm a água na parede celular (SKAAR, 1972). A retirada da água capilar ocasiona apenas uma perda de peso na madeira, e normalmente ela se encontra a teores de umidade superiores ao ponto de saturação das fibras (P.S.F.) (KOLLMANN, 1959).

O ponto de saturação das fibras é aquele ponto no qual os lúmens celulares da madeira estão vazios e apenas as paredes celulares possuem água. Segundo SKAAR (1972), o P.S.F. varia normalmente entre 25 e 35 % de umidade em relação peso seco do material. KOLLMANN (1959), considera que o P.S.F. pode ser fixado teoricamente como sendo 28 %. O P.S.F. é de grande importância prática, uma vez que as variações dimensionais da madeira se manifestam apenas abaixo deste ponto.

A água de impregnação encontra-se nos espaços submicroscópicos da parede celular, e a sua saída afeta a maioria das propriedades físicas e mecânicas da madeira. Por esta razão, esta água exerce um papel importante na utilização da madeira, e se manifesta

normalmente entre o intervalo de 6 a 28 % de teor de umidade, adsorvida em camadas polimoleculares ligadas por forças elétricas polares (KOLLMANN, 1959). Abaixo deste teor de umidade encontra-se a água de adsorção físico-química, molecular (0 a 6%), aderida às interfaces entre moléculas de celulose e hemicelulose por forças de valências secundárias (Van der Waals e pontes de hidrogênio), TOMASELLI, 1974.

### 2.3.1.1 Movimento de água capilar

O movimento da água capilar, também denominado movimento de umidade acima do ponto de saturação das fibras, é causado pelas forças capilares, e segue a lei de Hagen-Poiseuille (KOLLMANN & CÔTÉ, 1968). Este movimento capilar envolve durante a secagem o deslocamento da água (ou outro líquido) pelo ar na estrutura porosa da madeira (CHOOG et alii, 1989)

Num capilar cheio o movimento da água capilar é produzido pelas diferenças existentes em tensão devido às forças existentes na superfície do menisco dentro do capilar. Esta tensão “T” num menisco balanceado dentro de um capilar de raio, “r”, pode ser determinada através da Equação 2 Esta equação não considera as diferenças na pressão do ar existentes dentro do capilar (KOLLMANN & CÔTÉ, 1968).

$$T = H \times \rho = \frac{2\sigma}{\rho \times r} \times r = \frac{2\sigma}{r} \quad (\text{g/cm}^3) \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

**T** : Tensão capilar (g/cm<sup>3</sup>)

**H** : Altura a que o líquido sobe no capilar (cm)

**ρ** : Densidade do líquido (g/cm<sup>3</sup>)

**σ** : Tensão superficial do líquido (g/cm).

**r** : Raio do capilar (cm).

Estabelece-se por esta equação que a tensão capilar é diretamente proporcional à tensão superficial da interface ar-água, e inversamente proporcional ao raio da curvatura.

Na figura 4 mostra-se a existência de um menisco balanceado e outro não balanceado dentro de um capilar. Neste capilar existe um movimento na direção do menisco mais côncavo (menisco balanceado), sendo este movimento causado pelas diferenças em tensão que existe entre estes dois meniscos, uma vez que a pressão de vapor sob uma superfície esférica é menor do que a pressão numa superfície plana. Desta forma quando a pressão de vapor diminui com o decréscimo do diâmetro do capilar, a tensão superficial aumenta.

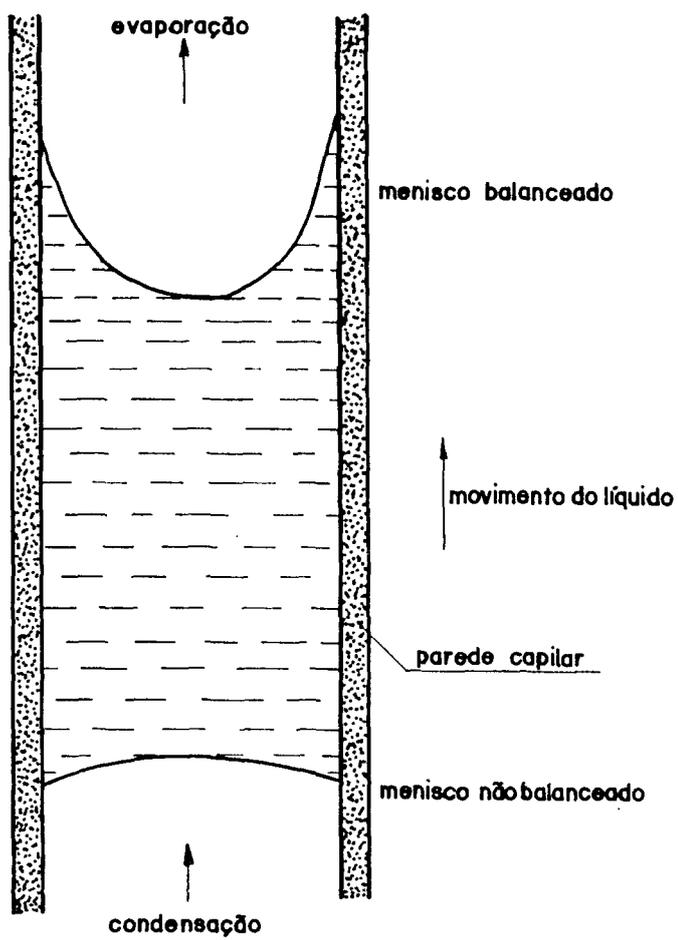
SIAU (1971) menciona que o movimento de água capilar segue a Lei de Poiseuille, que considera o fluxo através dos capilares como uma função do raio do capilar elevado à quarta potência. As leis capilares consideram ainda que quanto maior o raio do capilar, maior é a tração da coluna de água no mesmo e, em consequência disso, menor é a tensão capilar, o que resulta numa redução do fluxo.

O fluxo capilar é aproximadamente 50 vezes maior no sentido longitudinal que no sentido transversal (radial e tangencial), devido que nesta direção existe um menor número de pontoações, como também uma menor presença de substâncias que possam obstruir a livre passagem da água.

Segundo SIAU (1977) citado por TOMASELLI (1981), a existência de bolhas de ar no interior da madeira diminuem significativamente o fluxo capilar. Quando uma bolha de ar é forçada a passar por uma pontoação, a interface ar-água desta bolha é obrigada a deformar-se, adquirindo uma nova forma esférica e, teoricamente, o raio do menisco ficará igual ao raio da pontoação, aumentando de modo significativo a tensão capilar; portanto, uma pressão muito maior deve ser exercida para que o movimento do líquido se realize.

FIGURA 4 - MOVIMENTO SIMPLIFICADO DA ÁGUA CAPILAR.

Fonte: KOLLMANN &amp; CÔTÉ, 1968



De acordo com BRAMHALL & WELLWOOD (1976) o fator mais importante que afeta o fluxo capilar é a permeabilidade da madeira. No entanto, segundo o mesmo autor a temperatura da madeira também afetaria este movimento, pois nas altas temperaturas a viscosidade da água é reduzida, provocando um movimento mais rápido da água capilar. Segundo SIAU (1971) o fator limitante durante a secagem da madeira é freqüentemente a remoção da água capilar retida em forma líquida nas cavidades celulares. Baixas temperaturas devem ser freqüentemente utilizadas durante as etapas iniciais da secagem devido ao risco (defeitos) associado à remoção rápida da água a altas temperaturas.

### 2.3.1.2 Movimento de água higroscópica

O movimento da água higroscópica corresponde ao movimento da água abaixo do ponto de saturação das fibras, que é geralmente considerado como um fenômeno de difusão. Este fenômeno de forma geral é um processo que envolve o movimento espontâneo de um material para outro, desde uma zona de maior concentração para uma de menor concentração, num esforço de alcançar o equilíbrio. No caso da madeira, a difusão pode envolver um movimento de um gás ou vapor entre os espaços celulares ou como líquido através da parede celular da madeira (STAMM, 1964). A diferença do movimento capilar o movimento por difusão é um processo lento (RASMUSSEN, 1961) e considerado complexo porque no movimento da água higroscópica ocorrem simultaneamente difusão de vapor através das cavidades celulares, e difusão de água higroscópica nas paredes celulares da madeira (KOLLMANN & CÔTÉ, 1968).

O movimento de difusão pode ocorrer por três caminhos diferentes (figura 5), dependendo do estado e o local em que se encontra a água na madeira. O movimento pode ser por difusão de vapor, difusão de água higroscópica e como uma combinação de ambos (BRAMHALL et alii, 1976).

a) Difusão de vapor

A água no estado de vapor movimenta-se através do fenômeno de difusão. Neste processo, as moléculas de vapor de água movimentam-se de forma desorganizada em todas as direções, desde uma região de alta concentração para uma região de baixa concentração, diminuindo assim o gradiente de concentração existente entre elas. A velocidade deste movimento é proporcional ao gradiente de pressão de vapor existente entre as duas regiões. Este gradiente de pressão de vapor faz com que o vapor de água movimente-se através das cavidades celulares, das câmaras de pontoação, da abertura da membrana e dos espaços intercelulares (CECH & PFAFF, 1977). Este movimento está representado de forma simplificada na figura 5b (lúmem-pontoação-lúmem).

b) Difusão de água higroscópica

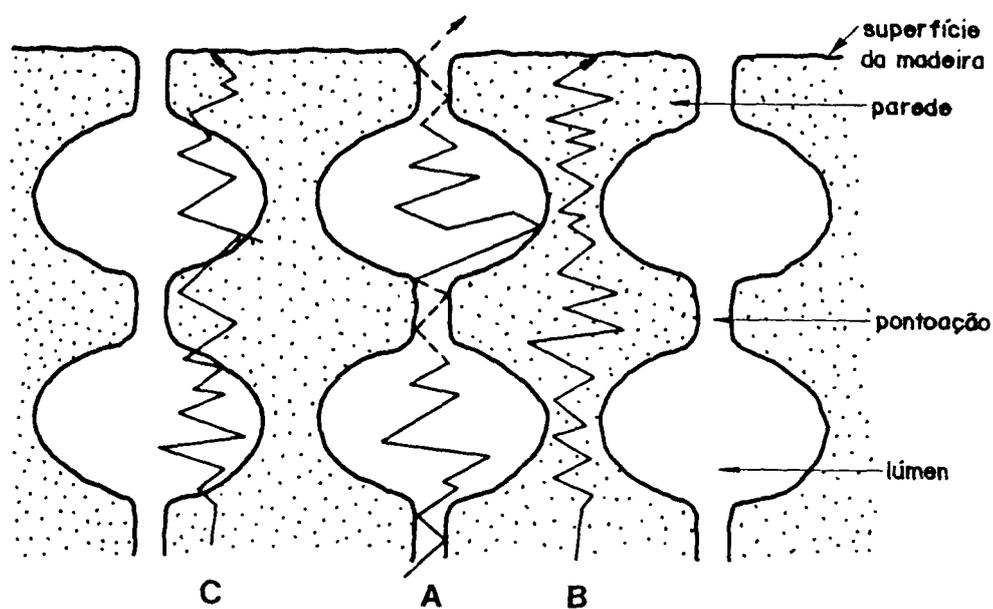
O movimento da água higroscópica se dá através das paredes celulares e pode também ser considerado como um processo de difusão (figura 5c). Durante este processo, as moléculas de água movimentam-se de uma região (parede celular) de alto teor de umidade para uma região de baixo teor de umidade, devido à existência de um gradiente de umidade entre estas duas regiões. Este gradiente de umidade entre as paredes mais externas e internas das células se desenvolve à medida em que a umidade começa a evaporar das paredes das células próximas à superfície da peça de madeira, absorvendo estas últimas por estarem mais secas, a umidade das paredes mais úmidas, resultando num fluxo de água das células internas da madeira para as externas.

O gradiente de pressão de vapor entre estas duas regiões também é responsável pela concretização deste mecanismo. No entanto, a difusão da água higroscópica é um processo sensivelmente mais lento que o processo de difusão de vapor.

## FIGURA 5 - CAMINHOS DE DIFUSÃO

- a) Difusão de vapor de água (Lúmen/Pontoação/Lúmen)
- b) Difusão de água higroscópica (Parede)
- c) Difusão combinada de água higroscópica e vapor de água (Parede/Lúmen/Parede).

Fonte: BRAMHALL et alii (1976)



c) Difusão combinada de água higroscópica e vapor de água

Durante a secagem da madeira, tanto a difusão de água higroscópica como a difusão de vapor de água podem ocorrer simultaneamente. Ao ser deslocada desde o centro da madeira até a superfície, grande parte desta umidade passa através das paredes celulares pelo processo de difusão da água higroscópica, a que evapora dentro das cavidades da célula (lúmen), e por sua vez este passa através do lúmen pelo mecanismo de difusão de vapor. Na continuidade da sua migração para a superfície, a água no estado de vapor nos lúmens é adsorvida por uma outra parede celular, passando através dela por difusão de água higroscópica, e assim sucessivamente, até atingir a superfície da peça (figura 5a).

De acordo com HART (1966) citado por GALVÃO & JANKOWSKY (1985), a difusão de vapor de água é de 10 a 1.000 vezes maior que a difusão da água higroscópica nas paredes celulares. Entretanto, a difusão de vapor de água em temperatura abaixo do ponto de ebulição tem menor contribuição no processo de secagem devido ao pequeno número de aberturas que ligam as células entre si. Dessa forma, apesar da facilidade de difusão do vapor de água através das aberturas naturais da madeira, a maior parte do movimento de água por difusão ocorre através da parede celular. Assim, a contribuição do vapor de água para o total de água movimentada pode ser desprezada nas condições normais de secagem.

Segundo SIAU (1971), a massa específica, a permeabilidade e a temperatura influenciam o processo de difusão. Da mesma forma, a direção estrutural também afeta o movimento de água higroscópica. O coeficiente longitudinal é aproximadamente duas a quatro vezes maior que o coeficiente transversal, a uma umidade de 25%, e de 50 a 100 vezes maior a uma umidade de 5%. Já a difusão no sentido radial é cerca de 17 a 25% maior que na direção tangencial. A velocidade com que ocorre o processo de difusão do interior para a superfície das tábuas afeta diretamente a velocidade de secagem (BROWN & BETHEL, 1975).

O fluxo de água ocorre longitudinal e transversalmente, e apesar de ser 10 a 15 vezes mais rápido ao longo da grã, a maior parte da água é evaporada pelas faces transversais a esta, isto porque a distância envolvida é menor. Em termos simples, a secagem ocorre da superfície para o interior, evaporando inicialmente a umidade superficial e posteriormente a interna. Deste modo, a secagem é um processo essencialmente de movimento de umidade das camadas internas para a periferia da madeira (CECH & PFAFF, 1977).

O movimento de água abaixo do ponto de saturação das fibras, quando considerado num estado constante, é governado pela primeira Lei de Fick, que tem uma forma matemática análoga às Leis de Darcy e Fourier (SIAU, 1971). A primeira Lei de Fick estabelece que o fluxo de umidade é proporcional ao gradiente de concentração na direção do fluxo, onde a constante de proporcionalidade é o coeficiente de difusão, que aplicada ao transporte do vapor de água na madeira pode ser representada matematicamente pela seguinte equação:

$$K_d = \frac{m / t \times A}{du / L} = \frac{m \times t}{du \times L \times A} \quad (\text{g/cm s \%}) \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

**$K_d$** : Coeficiente de condutividade por difusão de água na madeira (g/cm s %)

**m**: massa de vapor de água transportada através do corpo de prova (g)

**L**: Comprimento do corpo de prova na direção do fluxo (cm)

**t**: Tempo do fluxo (s)

**A**: Área da secção transversal perpendicular ao fluxo (cm<sup>2</sup>)

**du**: Diferença de umidade entre duas superfícies de distância L, em %.

Pode-se inferir que o fluxo é diretamente proporcional ao gradiente de concentração de umidade, e que o coeficiente de condutividade para o movimento da água de impregnação é igual ao fluxo dividido pelo gradiente.

O coeficiente de difusão na madeira pode ser determinado para estado constante utilizando a seguinte equação :

$$D = \frac{100 K_d}{G \rho} \quad (\text{cm}^2/\text{s}) \quad \text{Equação 4}$$

Onde

**D:** Coeficiente de difusão de vapor de água na madeira (cm<sup>2</sup>/s)

**G:** Massa específica da madeira (cm<sup>3</sup>)

**ρ:** Densidade da água (1 g/cm<sup>3</sup>)

Os valores calculados teoricamente pela equação da Lei de Fick, representam aproximadamente o dobro dos valores experimentais no sentido longitudinal e trinta vezes no sentido tangencial da madeira, uma vez que o fluxo não é constante no espaço nem no tempo. Discrepância que segundo TOMASELLI (1974) foi atribuída ao fenômeno de difusão impedida, que ocorre nas aberturas minúsculas das membranas das pontoações, cujo diâmetro é menor do que o “caminho livre médio” das moléculas de gás (vapor de água) para que ocorra o fluxo sem turbulência. Portanto, o caminho livre deve ser maior de 400 Å. Neste caso, as moléculas que entram na abertura da membrana da pontoação, com qualquer ângulo de inclinação, chocam-se com a parede lateral do capilar, sendo adsorvida temporariamente nessas paredes. Uma vez adsorvidas, estão sujeitas a mais colisões, tanto com a parede como com outras células. É evidente que a probabilidade das moléculas avançarem nestas condições é baixa, em comparação com a difusão através de capilares de diâmetros maiores que o “caminho livre médio”, a exemplo das cavidades das fibras.

O fluxo por difusão na madeira na verdade é considerado como um fluxo variável. Neste caso, fluxo e gradiente são variáveis no espaço e no tempo, e em qualquer processo que implique uma mudança. A Equação 5 é conhecida como a Segunda Lei de Fick, e é aplicável ao fluxo em estado não constante. Segundo COMSTOCK (1963) citado por TOMASELLI (1981), esta equação é derivada assumindo-se que o coeficiente de difusão seja constante, o que na realidade não é totalmente correto, pois ele depende da concentração. Portanto a equação considera um coeficiente de difusão médio.

$$\frac{dM}{dt} = D' \frac{d^2M}{dx^2} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

$dM/dt$  : Quantidade de umidade removida (M) na unidade de tempo (t)

$D'$  : Coeficiente de difusão médio ( $cm^2/s$ )

$d^2M/dx^2$ : Variação de umidade na distância (x)

Esta equação estabelece que a taxa de concentração ( $dM/dt$ ) é proporcional à variação do gradiente de concentração ( $d^2M/dx^2$ ) na direção do fluxo.

Ao contrário do movimento capilar o movimento de água por difusão é bastante complexo, devido principalmente a uma integração existente entre o movimento de água por difusão nas cavidades celulares (lúmens de células) e ao movimento da água de impregnação na parede celular (STAMM, 1962 citado por TOMASELLI, 1981).

De acordo com STAMM (1964) os coeficientes de difusão para madeira podem ser obtidos, na prática, de três maneiras:

- Determinação dos gradientes de umidade formados na madeira sob condições controladas.
- Medição da taxa de passagem de água através da madeira, sob um estado constante.
- Determinação da taxa de secagem.

## 2.4 VAPORIZAÇÃO NA SECAGEM

A vaporização da madeira é uma técnica que tem sido explorada para uma grande variedade de propósitos. Estes incluem a redução dos níveis de tensão de crescimento (WEIK et alii, 1984), o aumento na permeabilidade (CUTTER & PHELPS, 1986; MACKAY, 1971; CHEN, 1975), o melhoramento na estabilidade dimensional (PERKING et alii (1959), citado por CHAFE (1990) e o melhoramento na penetração de preservativos (BARNES, 1986). A vaporização também é usada para recondicionar espécies propensas ao colapso (TIEMANN, 1929; GREENHILL, 1935 citado por CHAFE, 1990), e na redução do tempo de secagem (CAMPBELL, 1961; ELLWOOD & ERIKSON, 1962; HASLETT & KININMONTH, 1986). Embora tais aplicações sejam importantes para melhorar a utilização da madeira, segundo alguns autores a vaporização tem desvantagens: pode reduzir as propriedades mecânicas da madeira, quando utilizados tempos prolongados (CAMPBELL, 1961) e aumentar a contração, colapso e a susceptibilidade a rachaduras durante a secagem (KAUMAN, 1961 citado por CHAFE, 1990, HASLETT & KININMONTH, 1986). Existem, no entanto, discordâncias com respeito ao efeito da pré-vaporização sobre a contração e a degradação da madeira.

### 2.4.1 Pré-vaporização

CAMPBELL (1961), estudando Eucalyptus regnans observou uma redução do tempo e uma diminuição dos defeitos de secagem, quando utilizada a pré-vaporização, sem afetar a resistência mecânica da madeira. A pré-vaporização por 12, 24 e 36 horas de madeira de imbuia (Ocotea porosa) de 30 mm de espessura, permitiu melhorar a velocidade de secagem em torno de 35-40%, além de uma redução tanto no teor de umidade de equilíbrio como no coeficiente de contração da madeira em 20-33,3% (NOCK, 1974). Da mesma forma, ensaios feitos com vaporização por ALEXIOU et alii (1990) em madeira de Eucalyptus pilularis demonstraram que a taxa de secagem aumenta significativamente (7-16 %) em madeira de cerne, como consequência de alterações no

conteúdo e disposição dos extrativos. Além disto, o pesquisador observou reduções no gradiente de umidade e nas tensões de secagem na madeira, sendo a vaporização mais efetiva nos primeiros oito dias de secagem. HASLET & KININMONTH (1986) mostraram que a vaporização acelera a secagem em madeira de Nothofagus fusca. Observações em microscópico eletrônico mostraram modificações na organização dos extrativos após a vaporização, o que favorece a taxa de secagem. SIMPSON (1976) também observou que o tempo de secagem em madeira de Quercus rubra, de uma polegada de espessura, se reduz em 23 % quando pré-vaporizada a 100°C por quatro horas. Em estudos anteriores, o mesmo autor verificou que a diminuição é independente da duração do tratamento (SIMPSON, 1975). CAMPBELL (1960) por outro lado recomenda que para madeira de 25 mm de espessura, o tempo de vaporização a 100°C deve ser de aproximadamente duas horas, não devendo exceder a quatro horas, pois períodos longos (superiores a seis horas) aumentam consideravelmente a contração e o colapso, e sua remoção será mais difícil.

A pré-vaporização da madeira de Eucalyptus regnans por cerca de 30 minutos reduz a variação dimensional da madeira e permite melhorar os níveis de recuperação do colapso. Tendência similar é observada desde a medula à casca na árvore (CHAFE, 1990). Trabalhando com a mesma espécie, MACKAY (1971) observou que a pré-vaporização da madeira verde permite aumentar a difusão de vapor através da madeira e favorece a recuperação do colapso. O mesmo autor mostrou também que o coeficiente de difusão aumenta 9 % após a vaporização.

Um tratamento de 2-4 horas de vaporização pode causar uma descoloração na madeira de Eucalyptus quando tratada em condições verdes (CAMPBELL, 1960). ANANIAS (1982), trabalhando com Eucalyptus globulus, verificou que a vaporização favorece a taxa de secagem e reduz os defeitos de secagem, mas produz uma forte descoloração na madeira. O mesmo autor observou que, abaixo de 15 % de teor de umidade, a aplicação de temperaturas superiores a 70°C não mostraram nenhum efeito

negativo sobre a madeira. CAMPBELL (1961) observou poucas rachaduras em madeira de Eucalyptus obliqua depois da pré-vaporização, embora o colapso tenha sido maior.

#### 2.4.2 Vaporização final

WRIGHT (1961) define a tensão como uma força interna que se origina num material pela aplicação de uma carga. No caso das tensões geradas durante o processo de secagem da madeira, estas se devem à diferença em contração entre zonas ou partes adjacentes de uma peça de madeira. Quando esta força interna tende a esticar o material (ou resistir à redução do tamanho) é denominada tensão de tração, e quando tende a comprimir (ou resistir a seu alongamento) é chamada de tensão de compressão.

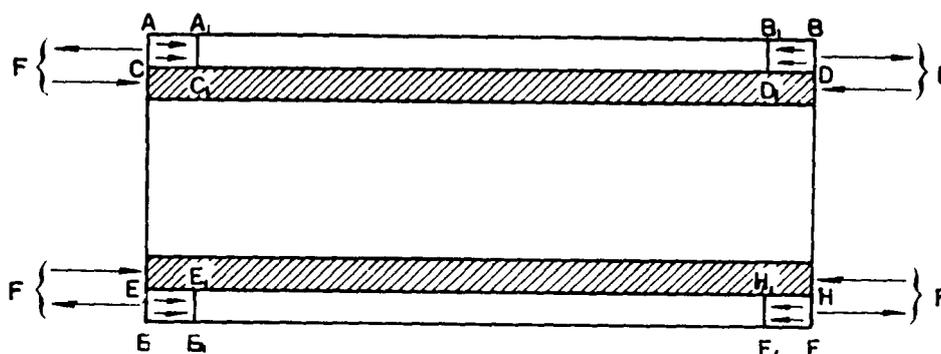
No início do processo de secagem, quando o teor de umidade da madeira está acima do ponto de saturação das fibras, o fornecimento de umidade do interior da peça para a superfície é bastante intenso e rápido. No entanto, a medida que o teor de umidade diminui, o transporte de umidade das zonas internas não são suficientes para repor a água que se evapora da superfície, criando-se desta forma, um gradiente de umidade entre a superfície e o centro da peça. Este gradiente de umidade origina a formação de tensões na madeira, e conseqüentemente defeitos tais como fendas ou rachaduras (VILLIÈRE, 1966).

A formação das tensões de secagem foram explicadas por vários autores, entre eles: Mc MILLEN (1958), citado por SKAAR (1972), WRIGHT (1961), STAMM (1964), VILLIERE (1966), KOLLMANN & CÔTÈ (1968), SKAAR (1972) e GALVÃO & JANKOWSKY (1985), e é explicada a seguir.

O comportamento das tensões de secagem que se originadas acima do ponto de saturação das fibras, pode ser entendida com a ajuda da figura 6. Quando a umidade na superfície da madeira é inferior ao PSF e as camadas mais internas encontram-se acima deste ponto, forma-se um gradiente de umidade entre estas duas zonas. As camadas superficiais, abaixo do PSF, tenderão a contrair-se. Na figura 6 as camadas superficiais (décimos de milímetro) estão representadas pelas letras **ABCD** e **EFGH**. Considerando

que as camadas superficiais podem ser separadas das outras, estas poderão contrair-se livremente, transformando-se em  $A_1B_1C_1D_1$  e  $E_1F_1G_1H_1$  respectivamente. No entanto, como existe a união com as camadas mais internas, que não lhe permitem contrair-se livremente, ocorre como se em seus extremos  $A_1B_1C_1D_1$  e  $E_1F_1G_1H_1$  houvesse uma força  $F$  que as obrigam a permanecer na posição  $ABCD$  e  $EFGH$  respectivamente. Desta forma, as camadas superficiais encontram-se submetidas a esforços de tração e as camadas mais internas estarão, pelo contrário, submetidas a forças de compressão, como consequência da contração das primeiras.

FIGURA 6 - COMPORTAMENTO DAS TENSÕES, ACIMA DO PSF.

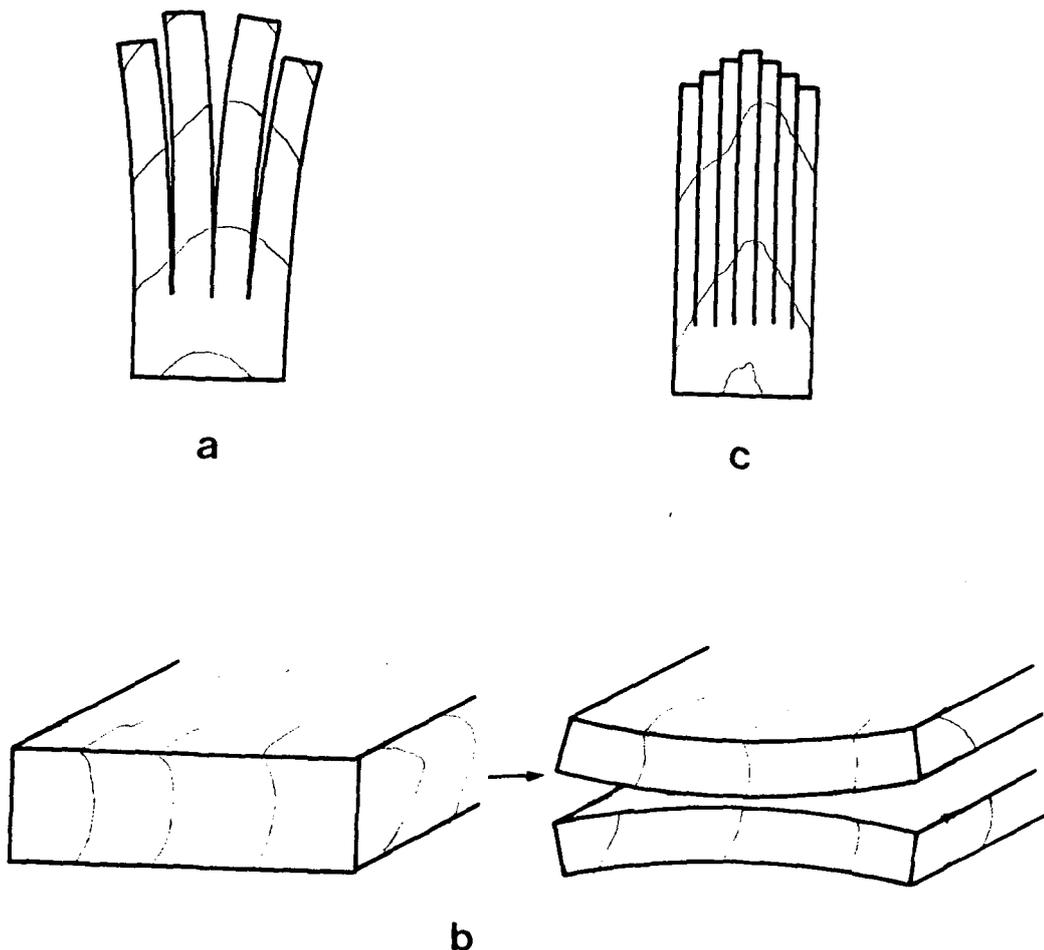


Se a evaporação nas camadas superficiais for mais intensa, pode ocorrer num dado momento que a força de tração ( $F$ ) seja suficientemente grande para ultrapassar a resistência da madeira à tração, e portanto, provocará o aparecimento de fendas ou rachaduras, e se a parte central tiver uma força de compressão maior que a força de tração, o centro entrará em colapso (STAMM, 1964). De forma geral a maioria dos autores concordam que nesta etapa da secagem pode ocorrer o aparecimento de fendas ou

rachaduras e empenamentos. Se nesta etapa da secagem uma peça de madeira é serrada como indicado na figura 7 (a ou b), suas partes externas se curvarão porque as camadas superficiais contraem-se ante a liberação da tensão de tração. Se a mesma peça de madeira for serrada em seções relativamente finas (figura 7c), de tal forma que cada uma destas seções seja aproximadamente constante tanto em umidade como em tensão, não se curvarão apreciavelmente, mas as seções exteriores se encurtarão e as interiores se alongarão.

FIGURA 7 - COMPORTAMENTO DAS TENSÕES NA PRIMEIRA ETAPA DA SECAGEM.

- a) Teste do garfo,    b) Corte da tábua ao meio,  
c) Corte da madeira em seções finas



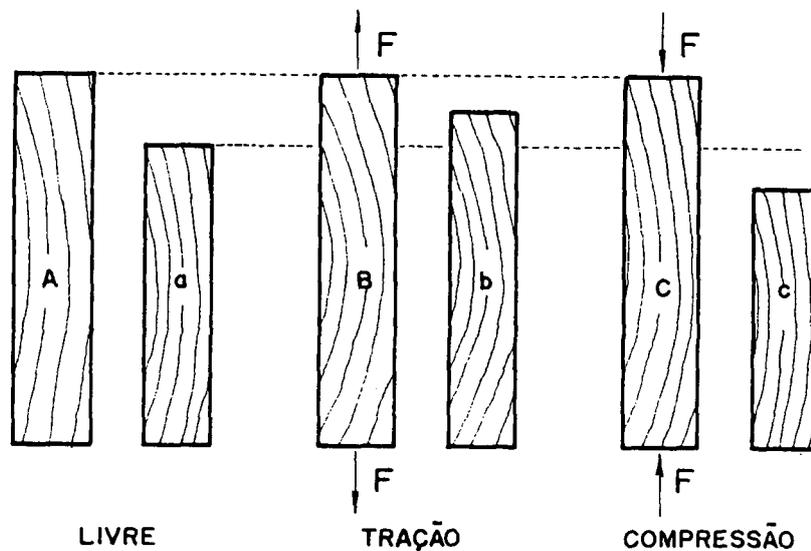
Ao final da secagem (abaixo do PSF), as condições dos esforços se invertem, ficando o interior em tração e o exterior em compressão. Mc MILLEN (1963) citado por GALVÃO (1976), explica que quando uma peça de madeira é impedida de retrair, surgem tensões de tração, que são balanceadas por tensões de compressão que se originam em outro local da peça. Quando a madeira é tensionada se deforma; esta deformação elástica é produzida por tensões de curta duração, abaixo do limite de proporcionalidade, desaparecendo com a retirada da carga. Entretanto, tensões acima do limite de proporcionalidade ou exercidas durante um longo período de tempo, produzem deformações que não desaparecem com a retirada da carga. Essas deformações permanentes podem ocorrer na secagem, podendo ser denominadas "fixação". Portanto, a madeira com fixação, caracteriza-se por apresentar deformações permanentes ou tensões não aliviadas. Para o mesmo autor, o fenômeno das tensões de secagem é mais complexo, porque as tensões de tração e compressão estão num jogo constante e simultaneamente em diferentes partes da mesma peça de madeira. KAUMAN, 1992 (comunicação pessoal), define este fenômeno (tension set) como um fluxo visco-plástico que se produz durante a primeira etapa da secagem na parte exterior (perto da superfície) das tábuas, que se encontram sob tração, resultante das tensões de secagem. Como resultado deste fluxo em tensão, as camadas exteriores da tábua se fixam ("set") ficando estas em forma dilatada. Este fenômeno é responsável pela reversão das tensões na segunda etapa da secagem, onde há compressão na parte externa e tração na parte interior da tábua. Se estes esforços forem superiores à resistência mecânica da madeira, podem provocar tanto fendas internas como externas (VILLIERE, 1966 e INZUNZA & JUACIDA, 1987).

O fenômeno de fixação (tension set) pode ser explicado com a ajuda da figura 8. Esta figura representa o comportamento de três peças de madeira exatamente iguais (A,B,C) serradas de tal forma que a sua maior dimensão está orientada no sentido tangencial da madeira, posteriormente submetida a uma secagem lenta, de modo que a peça A seca sem estar submetida a esforços externos; a peça B seca submetida a um esforço de tração e a peça C a um esforço de compressão.

No final da secagem observa-se que as peças se contraíram de forma diferente (a, b e c), sendo que a contraiu mais do que b e menos do que c, concluindo-se, portanto, que a madeira sob a ação de um esforço constante de tração, contrairá em menor grau em relação àquela livre de esforços e em maior grau quando submetida a um esforço constante de compressão. À medida em que progride o processo de secagem, o centro da peça de madeira adquirirá um teor de umidade abaixo do PSF, e sofrerá contração. A superfície que possui um tamanho maior do que teria se hovesse secado livre de tensões, impedirá em parte a contração do centro, que seca em condições alongadas. Assim, o centro estará sob esforços de tração e as camadas exteriores sob esforços de compressão.

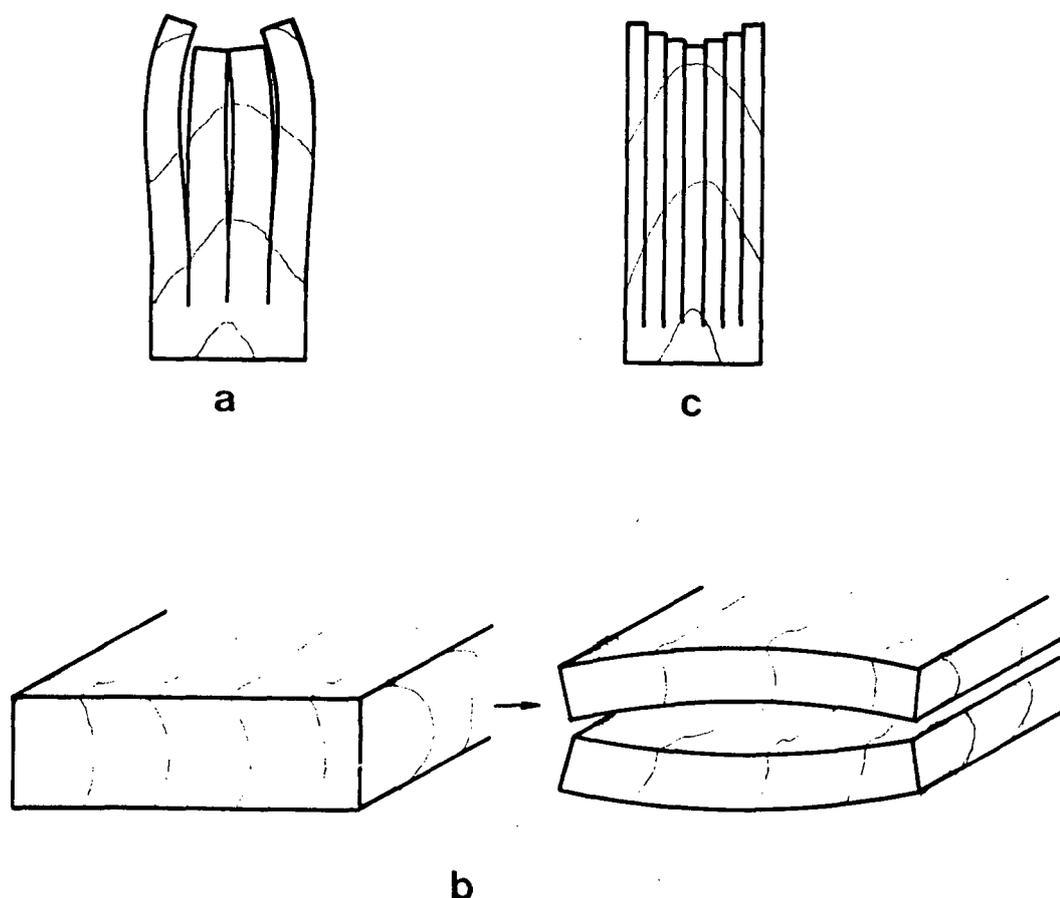
FIGURA 8 - CONTRAÇÃO DA MADEIRA COM E SEM ESFORÇO EXTERNO.

Fonte: Adaptado de VILLIÈRE (1966).



Nesta etapa da secagem, no final do processo, se uma peça de madeira for serrada da forma indicado na figura 9 (a ou b), as camadas exteriores se curvarão para dentro, devido à liberação das tensões de compressão induzida no centro da peça. A figura 6c mostra uma peça de madeira cortada em seções; finas, neste caso, as seções internas contraem-se como produto da liberação da restrição proporcionada pelas camadas externas. Aqui é apropriado utilizar o termo encruamento superficial (case-hardening), que corresponde à etapa final da secagem, estando a madeira em tensão de compressão na superfície e tração no centro

FIGURA 9 - COMPORTAMENTO DAS TENSÕES NA ETAPA FINAL DA SECAGEM. a) Teste do garfo, b) Corte da tábua ao meio c) Corte da madeira em seções finas



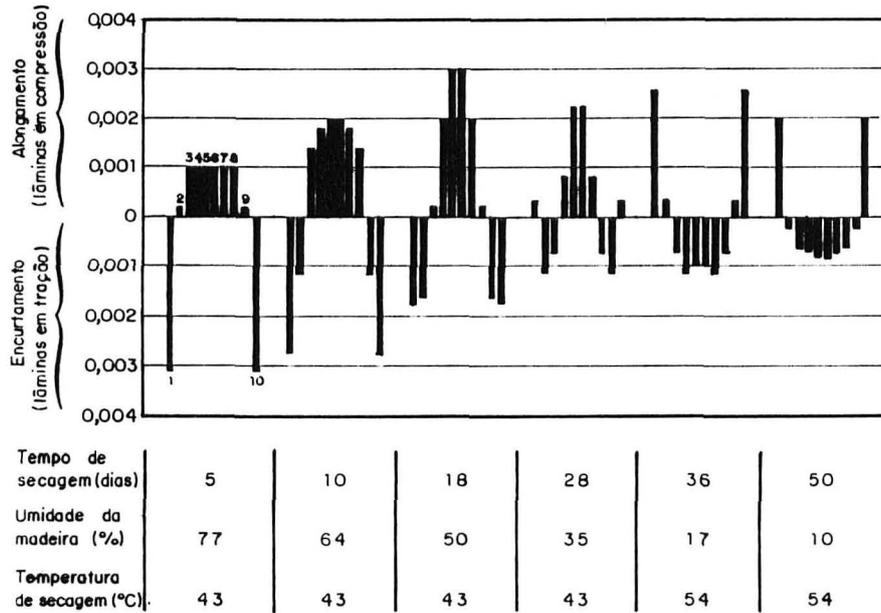
A figura 10a mostra uma forma resumida do comportamento das tensões durante o processo de secagem e fornece uma ideia do seu valor relativo, através da variação dimensional de dez seções finas obtidas como indicado na figura 10b (VILLIÈRE, 1966 e SKAAR, 1972). As condições de secagem no momento da determinação destas seções estão imediatamente abaixo de cada gráfico (tempo, umidade da madeira e temperatura), sendo que a parte inferior e superior do gráfico representam, respectivamente, as seções submetida a esforços de tração e compressão.

Durante o início da secagem as camadas superficiais secam abaixo do PSF, contraindo-se. No entanto, esta contração é limitada pelas camadas centrais que estão acima do PSF, situação esta que caracteriza o comportamento das tensões após 5 dias de secagem (figura 10a). Entre os dias 10-18 a tensão de compressão no interior da peça aumenta com a secagem das camadas intermediárias, e conseqüentemente começa a contrair (abaixo do PSF). A tensão de tração nas camadas externas diminui nesta etapa da secagem. Após 28 dias de secagem as camadas superficiais estão sob o esforço de compressão e as camadas internas sob tração, o qual permanecerá até o final do processo de secagem (SKAAR, 1972).

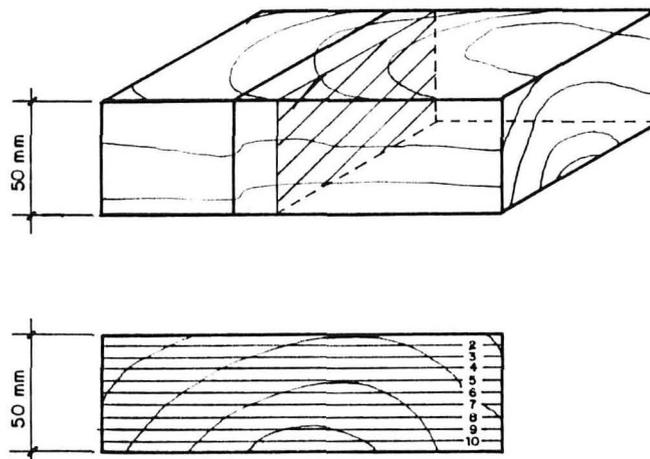
A presença dessas tensões podem ser determinadas através do "Teste de garfo", que possibilita avaliar a existência e distribuição das tensões de secagem numa peça de madeira. A avaliação definitiva só é possível quando os gradientes de umidade nesses "garfos" são eliminados. Deste modo, os corpos de prova devem permanecer no ambiente durante um período de 24 horas antes da avaliação final. O teste de garfo pode ser realizado durante todo o processo de secagem, de forma de estabelecer um controle mais exato da evolução das tensões.

FIGURA 10 - MANIFESTAÇÃO DAS TENSÕES DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM. a) Diagrama das tensões de secagem, madeira de 50 mm de espessura. b) Forma de obtenção das lâminas.

Fonte: VILLIÈRE, 1966



(a)



(b)

A figura 11 mostra os diversos comportamento possíveis destes garfos imediatamente após ser serrada e após um determinado tempo (WRIGHT, 1961), sendo:

- **1** Superfície em tração e centro em compressão.

**1A** Distribuição desuniforme da umidade, superfície mais seca que o interior; ocorre no início da secagem. Aumentar a umidade relativa do ar com o aparecimento de fendas.

**1B** Distribuição uniforme de umidade, superfície em tensão e centro em compressão. Produz-se depois de uma vaporização a baixo teor de umidade. Tratamento de vaporização muito severo.

- **2** Superfície em compressão e centro em tração

**2A** Distribuição desuniforme da umidade, superfície mais seca do que o centro; ocorre logo após o centro secar abaixo do PSF. Adequado para realizar um tratamento com vapor, para liberação das tensões de secagem.

**2B** Distribuição desigual da umidade, interior mais seco do que a superfície; ocorre depois de aplicado um tratamento de vaporização.

- **3** Madeira livre de tensões

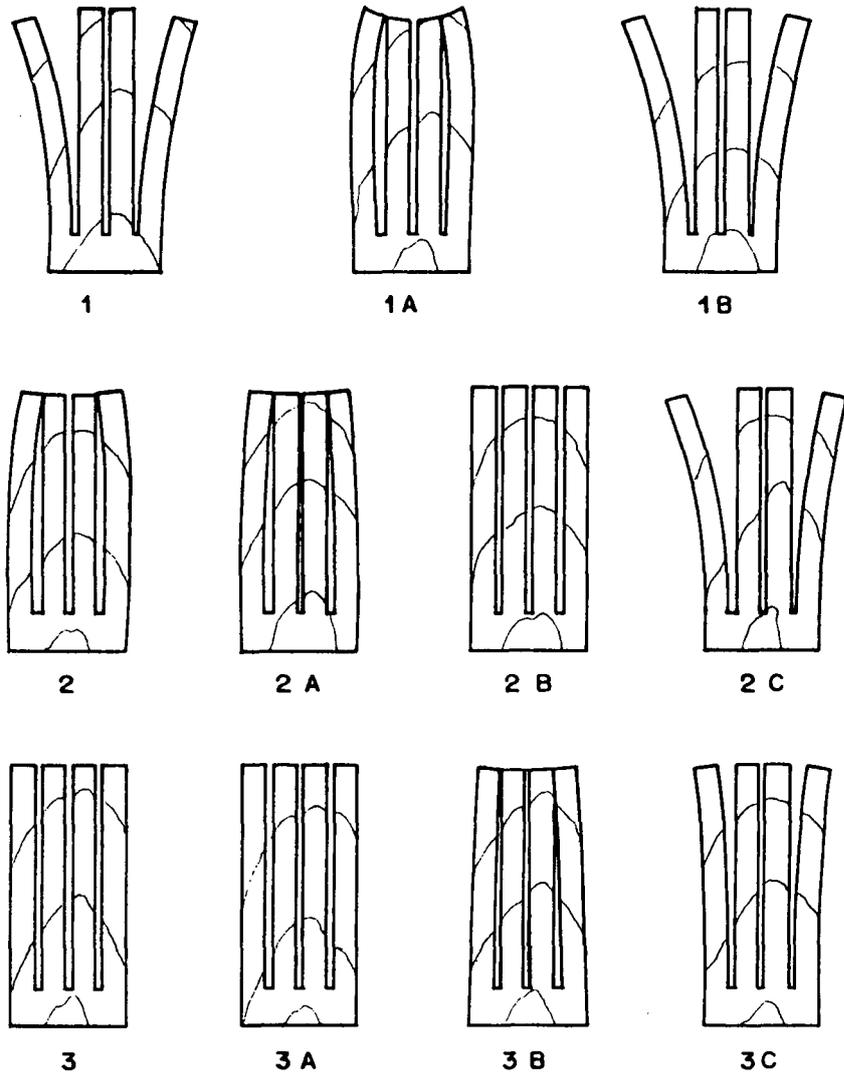
**3A** Distribuição uniforme da umidade, condição final correta.

**3B** Distribuição desuniforme da umidade, superfície mais seca do que o centro. Um curto período de vaporização equilibrará a umidade e eliminará as tensões de secagem.

**3C** Distribuição desuniforme da umidade centro mais seco do que a superfície; ocorre depois de aplicado um tratamento de vaporização.

FIGURA 11 - INTERPRETAÇÃO DO TESTE DE GARFO

Fonte: WRIGHT (1961)



Havendo tensões internas, a madeira deverá ser submetida a um tratamento de condicionamento, que consiste basicamente em elevar a umidade relativa e a temperatura dentro da câmara de secagem. Segundo GALVÃO & JANKOWSKY (1985), este tratamento tem como objetivo principal aliviar as tensões de secagem (através da plasticização da madeira) e evitar deformações permanentes (fixação das tensões) nas peças em secagem, mas também tem um efeito sobre o gradiente de umidade das peças, pela umectação das suas superfícies. De acordo com WRIGHT (1961), os tratamentos aplicados para aliviar as tensões de secagem dependem da aplicação de calor, podendo ser divididos em dois grupos:

a) Tratamento com vapor saturado a 100°C por poucas horas.

O mesmo autor não recomenda este tratamento para liberar as tensões no final do processo de secagem. Quando uma madeira é submetida a esta condição, as camadas superficiais absorverão umidade rapidamente e incharão, sendo este processo limitado, em parte, pelo centro da peça ainda não afetado. Se a retenção de umidade pelas camadas superficiais for grande, o inchamento será proporcional, provocando tensões de compressão. Durante a subsequente secagem (após a vaporização), as camadas superficiais tenderão a contrair-se excessivamente por causa da tensão de compressão, que será impedida pela parte central, colocando desta forma as camadas superficiais sob tração e o centro sob compressão, produzindo-se, portanto, uma reversão das tensões, também denominado encruamento invertido.

Este método é recomendado por WRIGHT (1961) para liberar as tensões nos primeiros estágios do processo de secagem; de uma forma geral, o teor de umidade não pode ser menor a 18-20% e o centro não deve estar abaixo do PSF.

b) Tratamento com alta umidade relativa (85 %) e uma alta temperatura (71-82°C), por um tempo que varia entre 8-48 horas ou mais, dependendo das condições das tensões, espécie, espessura e uso final da madeira.

Este tratamento (condicionamento), segundo RASMUSSEN (1968), deve ser iniciado quando o teor de umidade da amostra mais úmida dentro da câmara seja igual ao teor de umidade final desejado. Deve-se considerar os seguintes critérios:

a.- *Requerimento de temperatura:* Será a mais alta temperatura utilizada no programa de secagem (temperatura de bulbo seco), ou tão alta quanto seja possível ao controle de umidade de equilíbrio.

b.- *Requerimento de Umidade Relativa:* Esta deve corresponder ao teor de umidade de equilíbrio, que a madeira teria com um 3 % (Coníferas) ou 4 % (Latifoliadas) superiores ao teor de umidade desejado.

Com os dados de temperatura e umidade de equilíbrio pode determinar-se a umidade relativa na qual o tratamento deve ser feito. O tratamento de condicionamento pode durar de 4 a 48 horas, dependendo do grau de tensões na madeira, da espécie, da espessura da peça e do teor de umidade. PRATT (1974) citado por GALVÃO & JANKOWSKY (1985), recomenda uma umidade relativa de 90 % e um aumento simultâneo da temperatura de bulbo seco de 10°C a 15°C, quando a temperatura for inferior a 80°C.

## 2.5 O COLAPSO DA MADEIRA

Por ser um processo amplamente relacionado com a capilaridade, que depende da existência de água livre no interior dos lúmens celulares, conclui-se que o colapso só ocorre quando a madeira possui teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras.

KAUMAN (1964), cita que o termo colapso foi criada por TIEMAN (1915), o qual foi o primeiro a desenvolver estudos relacionados com a contração excessivamente alta em madeira de Eucalyptus e também evidenciou que esta contração era distinta daquela que normalmente ocorre nos processos de secagem.

O colapso foi definido de várias maneiras e por vários pesquisadores, destacando-se:

- a.- BRITISH COMMONWEALTH FOREST TERMINOLOGY (1957) citada por SANTINI & TOMASELLI (1980): o colapso é definido como sendo um achatamento ou deformação das células lenhosas durante a secagem, evidenciando uma contração excessiva e/ou desigual na madeira.
- b.- KAUMAN (1964): o definiu como a diferença entre a contração total de um corpo de prova e a contração na mesma direção estrutural de uma extremidade equiparada da seção transversal de 1 mm de espessura na direção da fibra.
- c.- Para VILLIÈRE (1966): o colapso é um defeito de secagem que consiste numa contração excessiva e irregular da madeira, acima do PSF.

O colapso se manifesta principalmente por ocasião da secagem de peças de madeira espessa, particularmente com espessura acima de 50 mm; entretanto, em determinados casos pode surgir em madeiras mais finas e até mesmo em lâminas. O colapso se caracteriza freqüentemente por uma superfície mais ou menos ondulada e por aparecimento de fendas internas, no caso de ocorrer forte colapso (VILLIÈRE, 1966).

### 2.5.1 Origem do colapso

De acordo com KOLLMANN & CÔTÉ (1968) e PANSIN & De ZEEUW (1980), existem duas teorias que podem explicar a origem do colapso na madeira. A primeira delas deve-se à tensão produzida pelas forças capilares nas células da madeira, as quais estão cheias de água e sem bolhas de ar que possam aliviar a tensão. A segunda teoria postula que o colapso ocorre quando existe tensão de compressão provocada pelas tensões de secagem, devido a um gradiente de umidade na peça de madeira durante a secagem. Ambas as condições ocorrem nos primeiros estágios do processo de secagem.

A tensão capilar ou as tensões de secagem (em compressão) ou a combinação de ambas podem causar o colapso na madeira, sempre e quando a tensão aplicada nas cavidades das células da madeira seja maior que a resistência em compressão perpendicular à grã. Segundo STAMM (1964), a origem do colapso seriam as tensões de secagem. Uma madeira úmida, quando exposta ao ar, seca rapidamente na superfície e, sendo conseqüentemente submetida a esforços de tensão. Se essas tensões não forem compensadas com fendas, elas exercerão uma força de compressão sobre a parte interna da madeira e se as mesmas excedem o valor limite da resistência à compressão perpendicular da madeira úmida à temperatura considerada, as paredes das fibras colapsarão.

## 2.5.2 Causas do colapso

### 2.5.2.1 Tensão capilar

A tensão superficial é uma característica da interface líquido-ar, como por exemplo no caso água-ar ou mercúrio-ar. A superfície de um líquido está aparentemente num estado de tensão e pode ser considerada como uma membrana elástica tensionada sobre a superfície (SIAU, 1971). Segundo o mesmo autor, a tensão superficial ( $\sigma$ ) pode ser definida como energia por unidade de área ou energia superficial específica. Por causa da tensão superficial, uma quantidade de líquido procurará a menor área superficial possível, equivalente ao menor estado de energia. Portanto, é necessário certo trabalho para aumentar a área de uma interface, sendo que toda a energia gasta pode ser recuperada quando a área for novamente reduzida.

Com a ajuda da figura 12 pode-se desenvolver a equação da tensão capilar. Presumindo a existência de uma bolha de gás esférica dentro de um líquido, o aumento da bolha pelo movimento do pistão exige um certo trabalho. A quantidade necessária de

trabalho pode ser calculada como um produto da diferença entre as pressões  $P_0$  e  $P_1$ , com o aumento do volume da bolha.

De acordo com a definição de tensão superficial:

$$\sigma = \frac{dw}{dA} \quad (\text{Erg/cm}^2) \quad \text{Equação 6}$$

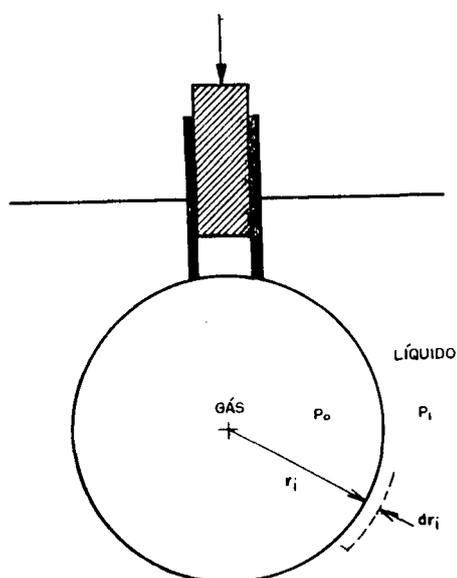
Onde:

$\sigma$  : Tensão superficial do líquido (Dinas/cm<sup>2</sup>)

$dw$ : Quantidade de trabalho requerido para a mudança de área  $dA$ , Erg

FIGURA 12 - AUMENTO DA BOLHA NO LÍQUIDO.

Fonte: SIAU, 1971



e

$$\frac{dw}{dA} = \frac{(P_0 - P_1) dv}{dA} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

$dv$ : Mudança de volume

$P_0$ : Pressão dentro da fase gasosa (Dinas/cm<sup>2</sup>)

$P_1$ : Pressão dentro da fase líquida, adjacente ao menisco (Dinas/cm<sup>2</sup>)

O volume da esfera e a área da mesma são determinadas respectivamente por:

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 \quad \text{Equação 8}$$

$$A = 4\pi r^2 \quad \text{Equação 9}$$

e a mudança de volume e área são respectivamente dados por:

$$dv = 4\pi r^2 dr \quad \text{Equação 10}$$

$$dA = 8\pi r dr \quad \text{Equação 11}$$

Substituindo as equações ( 10 ) e ( 11 ) em ( 7 ) obtém-se:

$$\frac{dw}{dA} = \frac{(P_0 - P_1) r}{2} \quad \text{Equação 12}$$

e igualando ( 6 ) e ( 12 ) obtém-se:

$$\sigma = \frac{(P_0 - P_1) r}{2} \quad \text{ou} \quad (P_0 - P_1) = \frac{2\sigma}{r} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

$r$  : Raio da interface líquido-gás

$(P_0 - P_1)$ : Diferença de pressão entre os dois meios (tensão capilar)

$\sigma$  : Tensão superficial do líquido

A tensão capilar é diretamente proporcional à tensão superficial, e a tensão superficial é função do raio e da diferença de pressão.

A pressão é sempre maior no lado côncavo de um menisco, onde está localizado o centro do raio da curvatura. No caso de água num tubo de vidro, a pressão do líquido  $P_1$  é menor do que a pressão do ar  $P_0$ . Se o raio do tubo capilar é suficientemente pequeno,  $P_1$  pode ter um valor negativo e esta pressão negativa é chamada de tensão capilar.

KAUMAN (1958) citado por SIAU (1971), investigou as causas do colapso durante a secagem de Eucalyptus regnans, constatando que um dos fatores importantes na formação do defeito, eram as tensões de secagem (tensão de compressão), reconhecendo contudo, que a tensão capilar ( $P_0 - P_1 = 2\sigma/r$ ) foi a principal causadora do colapso.

Uma das causas de altas tensões capilares são as aberturas das pontoações, uma vez que pequenas aberturas estão relacionadas a uma baixa permeabilidade e a alta tensão capilar (SIAU, 1971).

ELLWOOD et alii (1960) citado por SANTINI & TOMASELLI (1980), demonstraram que o colapso pode ser eliminado na secagem de folhosas propensas a este defeito através da troca da água da madeira ( $\sigma = 76,75$  dinas/cm) por metanol ( $\sigma = 22,60$  dinas/cm) e etanol ( $\sigma = 22,32$  dinas/cm). Estes autores se basearam no princípio de que a tensão capilar resultante da secagem pode ser reduzida se a água da madeira for substituída por um líquido de menor tensão superficial. Como indicado anteriormente, o colapso ocorre quando a tensão capilar excede a resistência à compressão perpendicular à grã.

#### 2.5.2.2 Tensões hidrostáticas

Uma das teorias mais aceitas como a causa do colapso são as tensões hidrostáticas, nos lumens celulares. Evidências experimentais mostram que um líquido contido num capilar sob a face convexa do menisco curvo apresenta valores de pressão negativa (SANTINI & TOMASELLI, 1980).

Durante a secagem de madeiras acima do P.S.F., a água capilar virtualmente livre nas cavidades celulares é removida através de pequenas aberturas intersticiais existentes nas paredes celulares.

TIEMANN, citado por KAUMAN (1964), diz que um menisco formado na interface ar-água numa destas aberturas produzirá uma tensão hidrostática na água (ou

outro líquido) no lado oposto a sua face convexa; se esta tensão excede a resistência à compressão da parede celular, a célula sofrerá colapso.

O menisco que origina o colapso provavelmente está localizado nas membranas de pontuações entre fibras ou entre fibras e parênquima radial. Estes meniscos têm um raio variando entre 600 e 1.000 Å. A estrutura relativamente porosa da membrana de pontuações das Gimnospermas poderia explicar a ausência quase que geral de colapso nestas madeiras, mas não existem no momento, evidências suficientes de diferenças na estrutura das membranas de pontuações de Angiospermas para esclarecer a grande variação de intensidade de colapso nas diferentes espécies lenhosas.

Para a tensão hidrostática agir na parede celular, é necessário:

- a.- Que o lúmen esteja completamente preenchido pela seiva e que não contenha bolhas com raio maior do que a do menisco, já que estas, por expansão, aliviarão a tensão.
- b.- Que a seiva tenha força de coesão suficiente para transmitir a tensão sem cavitação.

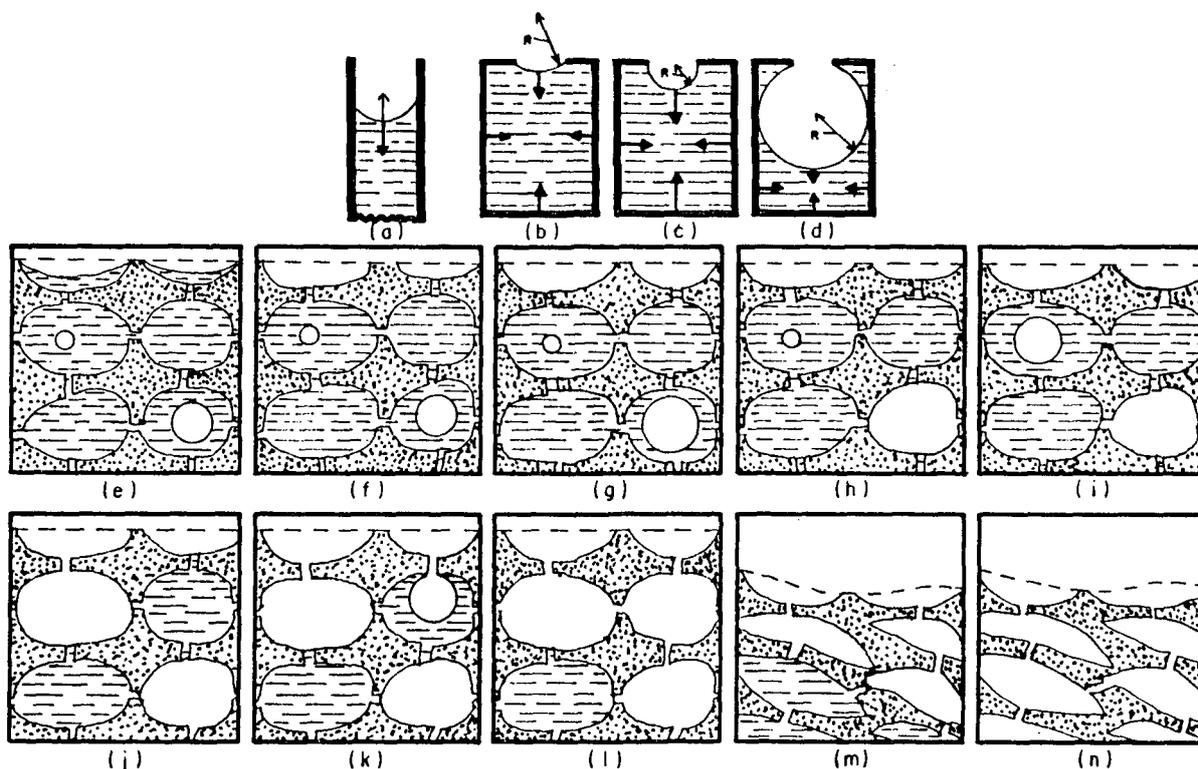
### 2.5.3 Mecanismo do colapso

O fator limitante na secagem da madeira propensa ao colapso consiste, freqüentemente, na remoção da água capilar retida na forma líquida das cavidades da madeira. Portanto, é importante entender como a água capilar move-se de célula para célula no interior da madeira durante o processo de secagem.

O mecanismo do colapso na madeira descrito abaixo, foi elaborado por SKAAR com base nos estudos de HAWLEY (1931) citado por SIAU (1971), figura 13. As forças capilares causam a subidas de líquidos em tubos de pequeno diâmetro; a tensão superficial e a interface água-ar causam a tração (representada pela seta dirigida para cima, figura 13a) da água imediatamente abaixo desta interface. No equilíbrio, a água exerce uma tração igual na superfície e na direção oposta, como indicado pela seta mais larga. Esta tração da água tensiona tanto as paredes do tubo, como a superfície líquida.

FIGURA 13 - MECANISMO DO COLAPSO

Fonte: SIAU 1971.



A figura 13b mostra a superfície capilar, a partir da qual o líquido está se evaporando para o ar. O raio da curvatura  $R$  é grande nesta etapa e, portanto, a tensão capilar é pequena. Esta tensão ocorre em todo o capilar e exerce uma tração para dentro sobre as paredes do tubo e sobre o menisco da interface ar-água. Se continua a evaporação, o raio da curvatura decresce até atingir o raio do orifício de evaporação (figura 13c).

Devido à diminuição do raio a tensão capilar aumenta proporcionalmente, como indicado pelo tamanho aumentado das setas mais largas. A continuação da evaporação resulta no aumento do raio capilar e, portanto, no decréscimo da tensão capilar (figura 13d). É evidente que a tensão máxima ocorre quando o raio do menisco torna-se igual àquele da abertura, como ocorre na figura 13c.

As figuras 13e até 13l mostram como se supõe ocorrer a remoção da água capilar na madeira verde. No modelo, as células estão no início, completamente cheias de água com exceção de duas bolhas de ar (figura 13l).

Observe-se que as bolhas são de tamanhos diferentes. A secagem ocorre somente na superfície superior da madeira que está exposta ao ar. As células da madeira circundam os outros três lados da ilustração. À medida em que a água capilar evapora-se das células expostas, formam-se meniscos recurvados nas interfaces ar-água. A tensão capilar é pequena nesta etapa, devido ao raio relativamente grande das superfícies em secagem.

Quando as células superficiais estão vazias, as superfícies evaporantes surgem nas aberturas (figura 13f). As superfícies de evaporação são reduzidas e se aproximam do raio da bolha maior. Quando o raio diminui, a força de tração aumenta e passa a atuar nas paredes celulares e no menisco ar-água, agindo inteiramente sobre todo o sistema. A tensão aumentada ocasiona a expansão das bolhas. Como a bolha maior é mais fraca, aumenta primeiro. À medida em que a bolha se expande, a célula é esvaziada (figura 13h).

A água da célula migra principalmente através da célula contígua para a superfície evaporante. Portanto, é possível para uma célula profunda da madeira perder sua água capilar mais cedo do que uma localizada próxima à superfície. Isto pode explicar a presença de bolsas úmidas em madeira parcialmente seca.

Depois de ter-se expandido a bolha maior, enchendo a célula, as curvaturas das superfícies são novamente reduzidas quando o menisco penetra nas aberturas da membrana. Mais uma vez a tensão no sistema aumenta até ser suficientemente grande para forçar a expansão da bolha menor. À medida que essa bolha menor se expande (figura 13i), a água que é deslocada migra através da parede celular adjacente e evapora-se na superfície. Conforme a evaporação continua (figura 13i), a tensão na água capilar aumenta para valores maiores que os anteriores, desde que não haja nenhuma bolha de ar para aliviar a tensão por meio da expansão. A tensão máxima é determinada pelo tamanho da maior abertura do sistema, de acordo com a equação da tensão capilar. Geralmente, a madeira pode suportar a tensão capilar máxima. Neste caso, o menisco retrai-se da célula

vazia para a célula cheia através das aberturas da pontoação. Quando a superfície evaporante atinge a célula cheia, ela se expande dentro da célula (figura 13k).

Isto resulta no aumento gradual do raio de curvatura, acompanhado por uma redução na tensão capilar. A água se evapora para o espaço de ar e migra para fora da madeira na forma de vapor de água, esvaziando-se, assim, a célula (figura 13l). Outras células mais profundas na madeira perdem sua água capilar de maneira semelhante. Em certas circunstâncias, as forças de tensão capilar podem causar colapso nas células cheias de água, se as aberturas da membrana forem suficientemente pequenas e a parede celular fraca. Uma única célula ou um grupo destas pode sofrer colapso (figuras 13m e 13n). Este efeito é mais pronunciado a altas temperaturas, quando a parede celular é bastante enfraquecida com o aumento da temperatura.

#### 2.5.4 Fatores que influem no colapso

##### 2.5.4.1 Fatores inerentes à madeira

a.- *Espécie*: A maioria das madeiras sofre colapso em pequeno grau durante a secagem; porém, o colapso é largamente restrito a certas Angiospermas de média densidade e a muitas madeiras de elevado teor de umidade de algumas Gimnospermas. Contudo, também pode ocorrer em algumas folhosas de baixa densidade. A intensidade em diferentes espécies do mesmo gênero é muito variável. Deste modo, o colapso é geralmente insignificante em Eucalyptus marginata, mas é severo em Eucalyptus globulus, embora tenham uma densidade bastante semelhante (KAUMAN, 1964).

Para NOCK (1974) a imbuia (Ocotea porosa) é uma das espécies mais problemáticas no que se refere à presença de colapso. Além desta espécie, segundo estudo conduzido nos Laboratórios de Tecnologia da Madeira da Universidade Federal de Paraná (SUDESUL/ IBDF /GOVERNO DO ESTADO DO PARANÁ, 1971), que submeteram 15 espécies nativas a três temperaturas de secagem (50, 75 e 100<sup>o</sup>), chegaram às seguintes conclusões:

- A bracatinga (Mimosa scabrella), o pessegueiro-bravo (Prunus sellowii) e a urucurana (Hieronima alchorneoides), sofreram colapso mesmo quando utilizada uma temperatura de 50°C.

- Certas canelas (Ocotea pulchella, puberula), o guanandi (Calophyllum brasiliensis) e a cangerana (Cabralea cangerana), apresentaram colapso, embora não acentuado, a uma temperatura de 75°C e 100°C .

b.- *Distribuição Geográfica*: Dentro de uma mesma espécie o colapso varia freqüentemente com sua distribuição geográfica. Por exemplo, os eucaliptos do grupo "Ash", oriundos de Tasmânia, geralmente sofrem consideravelmente mais colapso do que as mesma espécie oriundas de Victoria e Eucalyptus camadulensis de plantações de Israel mostra, mais colapso do que o material australiano. Não há porem evidências válidas que correlacionem a intensidade de colapso com características do habitat (SANTINI & TOMASELLI, 1980).

c.- *Idade*: De acordo com os autores acima citados, consideráveis variações no colapso são encontradas com certa freqüência entre árvores da mesma espécie, mesmo quando cultivadas no mesmo local. Madeiras de árvores imaturas geralmente sofrem mais colapso severo, freqüentemente observado em material de reflorestamento.

d.- *Posição na árvore*: Vários pesquisadores encontraram maior intensidade de colapso na extremidade mais desenvolvida do que no topo da tora. Segundo KAUMAN (1964), o colapso severo parece ser mais frequente no lenho formado no início da vida da árvore do que no lenho mais recente de árvores maduras. As paredes celulares finas de lenho primaveril têm uma resistência à compressão inferior e, de um modo geral, sofrem colapso mais facilmente do que as resistentes paredes espessas das fibras do lenho outonal. Este efeito é responsável pelas pequenas fendas de colapso observadas nas

superfícies de corte transversal, pela deformação de lâminas de madeira com colapso, e pelo colapso intenso em madeiras de rápido crescimento.

e.- *Presença de Extrativos*: O colapso se relaciona com os extrativos da madeira, pois estes extrativos reduzem a permeabilidade da madeira, o mesmo efeito é provocado pela obstrução dos vasos por tilose (BRAMHALL & WELLWOOD, 1976). Esta obstrução limita o fluxo capilar e as pequenas pontuações das fibras geram altas tensões capilares, capazes de vencer a resistência da parede celular em compressão perpendicular à fibra, ocasionando o colapso na madeira. Este defeito é maior na direção tangencial (1,5-3 vezes) que na direção radial, devido provavelmente à restrição exercida pelos raios, nesta direção e também pode ser atribuído à perda preferencial da água que existe nas fibras em direção aos raios através das pontuações (KAUMAN 1964). No entanto, segundo SANTINI & TOMASELLI (1980), se deve ao fato que as paredes tangenciais das células são mais grossas que as paredes radiais e portanto com uma maior resistência mecânica. Possivelmente esta diferença possa dever-se a uma combinação dos três fatores anteriormente descritos.

f.- *Teor de Umidade*: O teor de umidade da madeira também exerce uma certa influência na formação do colapso. Este se inicia a um teor de umidade de 100-120 % e é completo quando as células atingem o ponto de saturação das fibras. Seu desenvolvimento atinge o máximo entre 50 e 70 % de umidade.

A importância de altos teores de umidade na formação do colapso é evidente, indicando que tanto os extrativos como o teor de umidade devem ser considerados quando da avaliação da suscetibilidade da madeira ao colapso (MEYER & BARTON, 1971 citados por SANTINI & TOMASELLI, 1980).

#### 2.5.4.2 Fatores inerentes ao ambiente

a.- *Temperatura*: A maioria dos pesquisadores verificou que o colapso aumenta com a temperatura. As altas temperatura exercem tanto efeitos irreversíveis como reversíveis.

Os efeitos irreversíveis são devidos à degradação térmica, enquanto os reversíveis são devido à plasticidade transitória das paredes celulares, reduzindo mais acentuadamente sua resistência do que a redução da tensão hidrostática com a temperatura (KAUMAN, 1964). Da mesma forma, VILLIÈRE (1966) mostra que quanto maior a temperatura de secagem mais plástica se torna a madeira, reduzindo a resistência à compressão perpendicular das células, em consequência seu esmagamento.

ELLWOOD et alii (1960) citado por SANTINI E TOMASELLI (1980), mostraram que a temperatura real da madeira, e não a temperatura do ambiente de secagem, representa a variável importante. De acordo com KAUMAN (1960), o colapso devido à tensão do líquido é proporcional à temperatura da madeira, dentro do limite de 20 - 90°C; no entanto, o colapso provocado por esforços de compressão (produto das tensões de secagem) apresentou divergências da relação linear .

Segundo SANTINI & TOMASELLI (1980), a temperatura da madeira de espécies propensas a colapsar precisam ser mantido abaixo de 60°C durante a secagem, até que todas as partes das tábuas estejam abaixo do P.S.F. Deste modo, é possível evitar a contração excessiva e rachaduras severas.

b.- *Umidade relativa e Tempo de secagem*: Frequentemente o colapso é tanto maior quanto maior a umidade relativa durante a secagem. Experiências mostraram que o efeito não é altamente significativo. Na realidade, a influência da umidade relativa é indireta: baixas umidades causam tensão residual e, neste caso tendem a reduzir a contração na largura de corpos de prova retangulares, aumentando porém o colapso em espessura e favorecendo o aparecimento de rachaduras. Altas umidades mantém a plasticidade da superfície e minimizam as rachaduras, mas permitem mais colapso na largura (KAUMAN, 1964).

Segundo SANTINI & TOMASELLI (1980) o tempo de secagem até que se atinja o ponto de saturação das fibras é de pouca influência em madeira serrada, já que o tempo de liberação do esforço do colapso é usualmente menor do que aquele do processo de secagem, exceto a temperatura em torno de 100°C ou maiores. Assim, o colapso em lâminas de 1,5 mm de eucalipto "Ash" foi proporcional ao tempo de secagem, do estado verde até o ponto de saturação das fibras.

c.- *Esforços de Contração*: Existem duas fontes de esforços que contribuem para o colapso de células de madeira: a tensão produzida pelas forças capilares e o esforços devidos ao gradientes de umidade. Tanto a tensão capilar como o gradiente de umidade ou ambos, podem estar envolvidos quando a resistência ao esforço aplicado na compressão perpendicular à grã é excedida, as células sofrem colapso (STAMM, 1964; KOLLMANN & CÔTÉ, 1968).

CLARKE (1927) citado por SANTINI & TOMASELLI (1980), foi o primeiro a sugerir que o colapso poderia ser provocado pelos esforços de compressão originados durante a secagem. Estes se devem à contração desigual causada pela presença de um gradiente de umidade, podendo estes esforços de compressão comprimir a parte central de uma tábua ou superfície, causando colapso. STAMM & LOUGHBOROUGH (1941) citado por KAUMAN (1964), consideraram que os esforços de compressão são a causa principal do colapso; no entanto, isto foi refutado tanto por TIEMANN (1941) e KAUMAN (1958) citados pelo autor anterior, pois este efeito também pode ocorrer em madeira seca sob tensão. Contudo, KAUMAN (1960) mostrou que o colapso devido a esforços de compressão pode corresponder a 1/3 ou mais do colapso total.

#### 2.5.5 Minimização do colapso

O colapso pode ser minimizado em espécies propensas ao defeito, usando-se temperaturas iniciais baixas, em torno de 45°C, até que o P.S.F. seja alcançado (SANTINI & TOMASELLI, 1980). Da mesma forma, BLUHM & KAUMAN (1965) recomendam

uma temperatura de 45° para secagem de madeiras de Eucalyptus. Para KAUMAN (1964), a umidade relativa do ambiente de secagem e o formato da madeira são de importância secundária na ocorrência do colapso. Assim, as madeiras susceptíveis a colapsar não devem ser expostas a temperaturas superiores a 40°C, até que alcancem uma umidade média de 25% e de 30 % no centro das tábuas. Temperaturas muito elevadas intensificam o colapso por degradação térmica, e limitam sua recuperação. VILLIÈRE (1966) sugere uma secagem ao ar livre das madeiras com elevados teores de umidade, ou uma secagem artificial a temperaturas baixas (40 a 50°C), até o ponto de saturação das fibras.

O colapso é agravado quando a madeira é secada em estufa logo após a serragem, e quando as temperaturas iniciais de bulbo seco estão acima de um determinado ponto crítico para aquela madeira (BRAMHALL & WELLWOOD, 1976).

#### 2.5.6 Recuperação do colapso

A madeira que sofreu colapso durante a secagem pode ser restaurada a sua forma "original", submetendo-a a altas temperaturas e umidades relativas durante um determinado período de tempo, sendo denominado de recondicionamento (SIAU, 1971). Tratamento que é feito com vapor a uma temperatura de 100°C e a uma umidade relativa de 100%.

Para KOLLMANN & CÔTÉ (1968) o recondicionamento de madeiras com colapso é possível quando não se desenvolvem rupturas na madeira. Ele tem sido positivo quando a umidade da madeira está em torno de 15 %, pois altas temperaturas permitem uma plasticização nas células, o que pode recuperar o colapso. Para MACKAY (1972), que trabalhou com madeira de Eucalyptus delegatensis colapsada, secada a teores de umidade de 5, 12 e 18 %, com amônia, o teor de umidade de 12% foi o mais adequado para a recuperação do colapso. No entanto, como demonstrados por vários pesquisadores o recondicionamento, é mais eficiente quando aplicado às madeiras com 15 a 18 % de teor

de umidade e a 100°C de vapor saturado (SANTINI & TOMASELLI, 1980). Segundo BLUHM & KAUMAN (1965), a recuperação do colapso deve ser feita preferencialmente quando a madeira atingir 17% de teor de umidade. Deve-se ter presente a duração do tratamento de acondicionamento, que segundo recomendações varia de 3-6 horas para madeira radial de 25 mm de espessura. Dependendo da intensidade do colapso, o tempo pode ser aumentado.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 COLETA DO MATERIAL

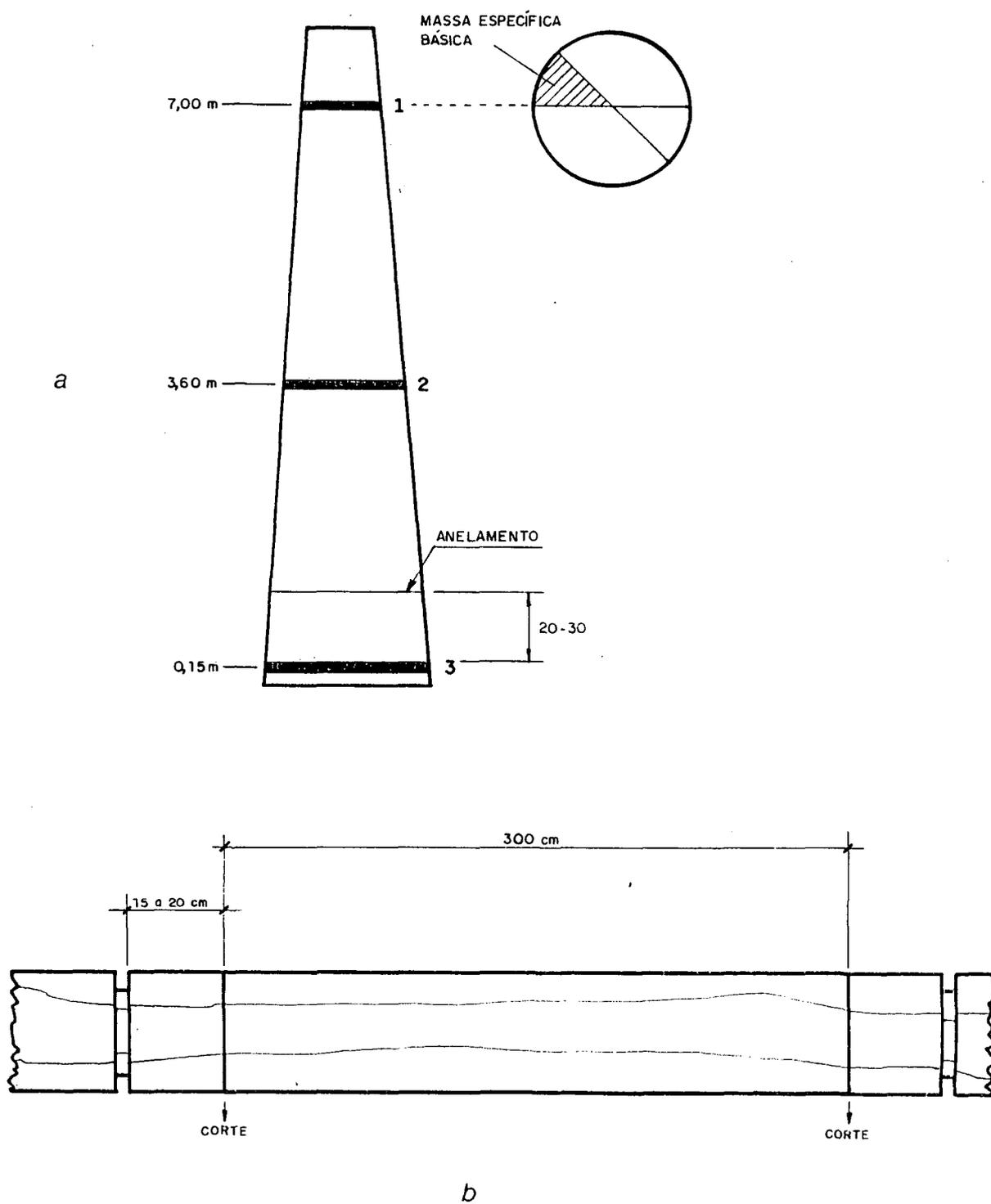
O material utilizado para este estudo foi proveniente de plantios de propriedade da CONFLORESTA (Projeto SAIMIRIM), no Município de Itapoá - Estado de Santa Catarina, com uma área total plantada de 165,5 hectares. As sementes são de procedência da DURAFLORA e foram plantados com um espaçamento de 2,5 X 2,5 m.

Foram coletadas ao acaso 19 árvores de Eucalyptus grandis (Hill Ex-Maiden) de 14 anos de idade e com um diâmetro (DAP) aproximado de 40 cm.

Na derrubada e na confecção das toras utilizou-se o método de anelamento com motosserra, a uma profundidade de 1/3 do raio da árvore, deixando uma distância de 20-30 cm entre o anelamento e o corte transversal da árvore. Na confecção das toras, a profundidade do anelamento foi a mesma utilizada na derrubada das árvores, deixando-se, neste caso, 15-20 cm a cada extremo do torete. A técnica adotada é apresentada na figura 14.

FIGURA 14- a) ANELAMENTO COM MOTOSERRA E ALTURA DAS AMOSTRAS PARA DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA BÁSICA (1, 2, e 3).

b) ANELAMENTO REALIZADO NOS TORETES



O presente trabalho foi realizado em duas etapas. Na primeira etapa, utilizaram-se sete árvores para a determinação da variação das rachaduras na altura da árvore, obtendo-se de cada uma delas três toretes de 3,40 m de comprimento. Na segunda etapa, 12 árvores foram utilizadas para o estudo de vaporização. Estas árvores foram divididas em 2 grupos de 6 árvores, obtendo-se de cada uma delas dois toretes de 3,40 m de comprimento, sendo uma considerada como testemunha e a outra para efetuar o tratamento de vaporização. A escolha entre os dois toretes por árvore foi ao acaso.

Após o corte, o material foi transportado até a cidade de São Bento do Sul, onde realizou-se a vaporização e o desdobro. Foram obtidas amostras de cada uma das árvores para a determinação da densidade básica, para tal efeito cortaram-se 3 discos de 5 cm de espessura a diferentes altura da árvore (figura 14).

## 3.2 PRÉ-TRATAMENTO DAS TORAS

### 3.2.1 Preparação do material

Para a preparação do material, foram adotadas as sugestões de ROZAS (1992), que fez um estudo preliminar em madeira de *Eucalyptus viminalis* para avaliar a aplicação do método combinado de anelamento com motosserra e posterior vaporização das toras, para a liberação das rachaduras provocadas durante o desdobro. Após a derrubada das árvores, todos os toretes foram devidamente identificados e sofreram uma avaliação visual dos possíveis defeitos provocados na derrubada da árvore (principalmente fendas ou rachaduras nos topos destas), como os defeitos inerentes à própria espécie.

### 3.2.2 Vaporização

Após separar-se os toretes testemunha dos que seriam vaporizados, estes últimos foram submetidos ao tratamento de vaporização segundo as condições estabelecidas na tabela 1. Em cada um dos tratamentos aplicados controlou-se o tempo e a temperatura.

Após concluído o tratamento de vaporização dos toretes, foi observada a evolução das rachaduras nos topos das toras.

TABELA 1: TEMPERATURA E TEMPOS DE VAPORIZAÇÃO

TEMPERATURA: 90°C		
Tempo	Toretos Vaporizados	Toretos Testemunhas
18 h	6	6
36 h	6	6

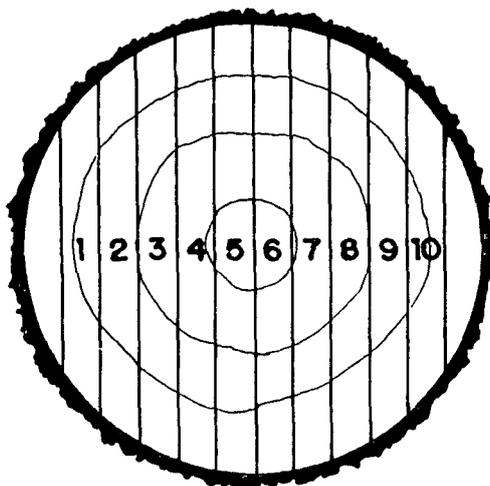
Total de Toretos: 24

### 3.3 DESDOBRO E AVALIAÇÃO DAS TENSÕES

Quatro horas após o tratamento de vaporização, os toretes foram desdobrados mediante cortes paralelos (cortes tangenciais), como indicado na figura 15. As toras-testemunha também foram desdobradas pelo mesmo método, um dia após a derrubada das árvores.

Todos os toretes foram desdobrados em tábuas de 30 mm de espessura, e posteriormente cortados numa largura de 132 mm. Todas as tábuas foram transportadas para o Laboratório de Tecnologia de Madeira da UFPR e separadas em dois grupos de 36 peças cada um.

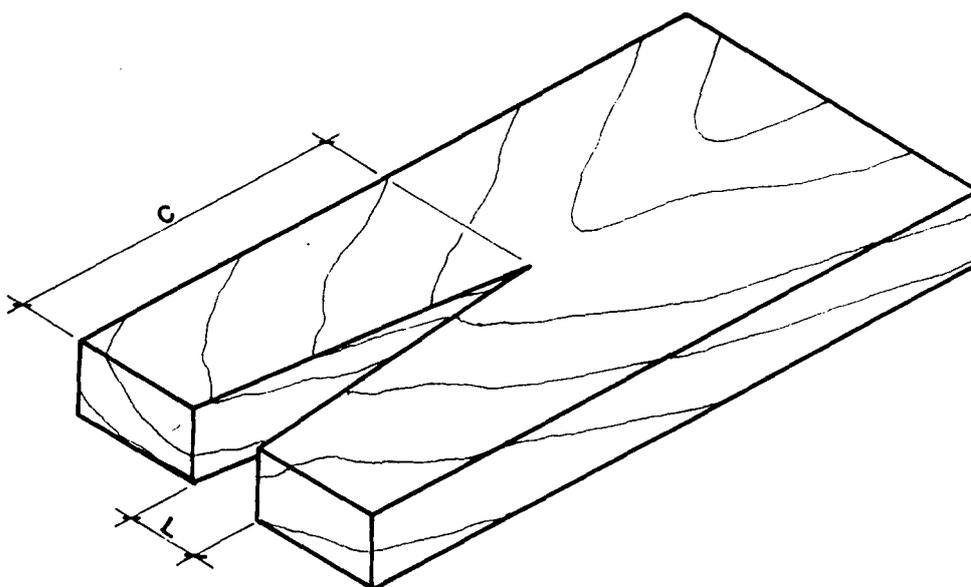
FIGURA 15 - FORMA DE CORTE UTILIZADO



A avaliação das tensões de crescimento foi realizada através da forma como estas tensões se manifestam durante o desdobro dos toretes, que corresponde a rachaduras nos extremos das tábuas. As rachaduras foram medidas tanto no comprimento como na largura, conforme representado na figura 16. Foi medida também a abertura das tábuas em relação à tora, medida obtida quando a tora é serrada a 3 metros de seu comprimento.

Observou-se também o comportamento das rachaduras nos topos dos toretes após a vaporização.

FIGURA 16 - MEDIÇÃO DAS RACHADURAS APÓS O DESDOBRO



### 3.4 SECAGEM

#### 3.4.1 Programas de secagem

A madeira de eucalipto apresenta uma série de defeitos durante a secagem, principalmente o colapso. Assim considerando este defeito, se aplicaram dois programas (tabelas 2 e 3) com o objetivo principal de evitar ou diminuir a formação de colapso, as fendas e os empenamentos no processo de secagem. Para o primeiro programa, utilizaram-se as recomendações dadas por BLUHM & KAUMAN (1965), que recomendam iniciar a

secagem com uma temperatura não superior a 45°C, posteriormente aumentando-a de forma gradativa. Já para o segundo programa utilizou-se uma temperatura menor (40°C), segundo recomendações de KAUMAN (1964). Como diminuiu-se a temperatura, optou-se por diminuir também a umidade relativa do ar, considerando o bom resultado obtido no primeiro programa de secagem, quando a madeira não apresentou nenhum tipo de fendas. O objetivo era manter a mesma velocidade de secagem obtida no primeiro programa mesmo tendo sido reduzida a temperatura. Para reduzir empenamentos, optou-se por restringir as pilhas com blocos de concreto, de modo a submetê-las a uma pressão aproximada de 140 Kg/m<sup>2</sup>. Os dois programas contaram com a aplicação de uma vaporização inicial de duas horas, com o objetivo de aumentar a velocidade de secagem, de uma vaporização intermediária, para a recuperação das madeiras colapsadas (a 17 % de umidade) e de uma vaporização final, durante três diferentes tempos (1, 2 e 4 horas). Todas as vaporizações foram feitas próximo de 100°C e 100% de umidade relativa. O objetivo da vaporização final foi poder determinar qual destes três tempos de vaporização seria mais adequado para a liberação das tensões de secagem, que são altamente desfavoráveis na continuidade do processo de industrialização. As três vaporizações foram adotadas pelos bons resultados obtidos na secagem de madeira de Eucalyptus viminalis (ROZAS & TOMASELLI, 1993).

Buscando avaliar os dois programas de secagem, foram utilizadas 36 tábuas para cada um deles. Para acompanhar o processo de secagem foram selecionadas 6 amostras controle. Durante a secagem acompanhou-se a perda de umidade, o gradiente de umidade, as tensões de secagem, os defeitos de secagem e o tempo.

TABELA 2 - PROGRAMA DE SECAGEM I

Umidade Madeira (%)	Temperatura °C		Umidade Relativa (%)	Tempo (Horas)
	Bulbo Seco	Bulbo Úmido		
Vaporização inicial	100	100	100	2
Verde .... 50	45	43	89	
50 ..... 40	45	42	83	
40 ..... 35	45	41	78	
35 ..... 30	45	40	73	
30 ..... 25	50	43	65	
25 ..... 20	55	47	64	
20 ..... 17	60	50	59	
Recuperação colapso	100	100	100	6,5
Início .... 15	60	50	59	
15 ..... 10	70	52	40	
10 ..... 06	80	60	39	
Vaporização final	100	100	100	1, 2 e 4

TABELA 3 - PROGRAMA DE SECAGEM II

Umidade Madeira (%)	Temperatura °C		Umidade Relativa	Tempo (Horas)
	Bulbo Seco	Bulbo Úmido		
Vaporização inicial	100	100	100	2
Verde .... 80	40	37	82	
80 ..... 50	42	38	79	
50 ..... 40	43	38	78	
40 ..... 35	44	39	75	
35 ..... 30	45	40	73	
30 ..... 25	50	43	65	
25 ..... 20	55	45	57	
20 ..... 17	60	50	59	
Recuperação colapso	100	100	100	6
Início .... 15	60	50	59	
15 ..... 10	70	52	40	
10 ..... 06	80	60	39	
Vaporização final	100	100	100	1, 2 e 4

### 3.4.2 Seleção do material

Das tábuas desdobradas, escolheram-se ao acaso três de cada torete. O número total de tábuas obtidas para a secagem foi de 72, divididas em dois grupos de 36 peças cada um. Estas tábuas foram devidamente identificadas tanto em relação à temperatura e o tempo de vaporização ao qual as toras foram submetidas, como também ao programa de secagem aplicado.

### 3.4.3 Controle da secagem

#### a) Teor de umidade

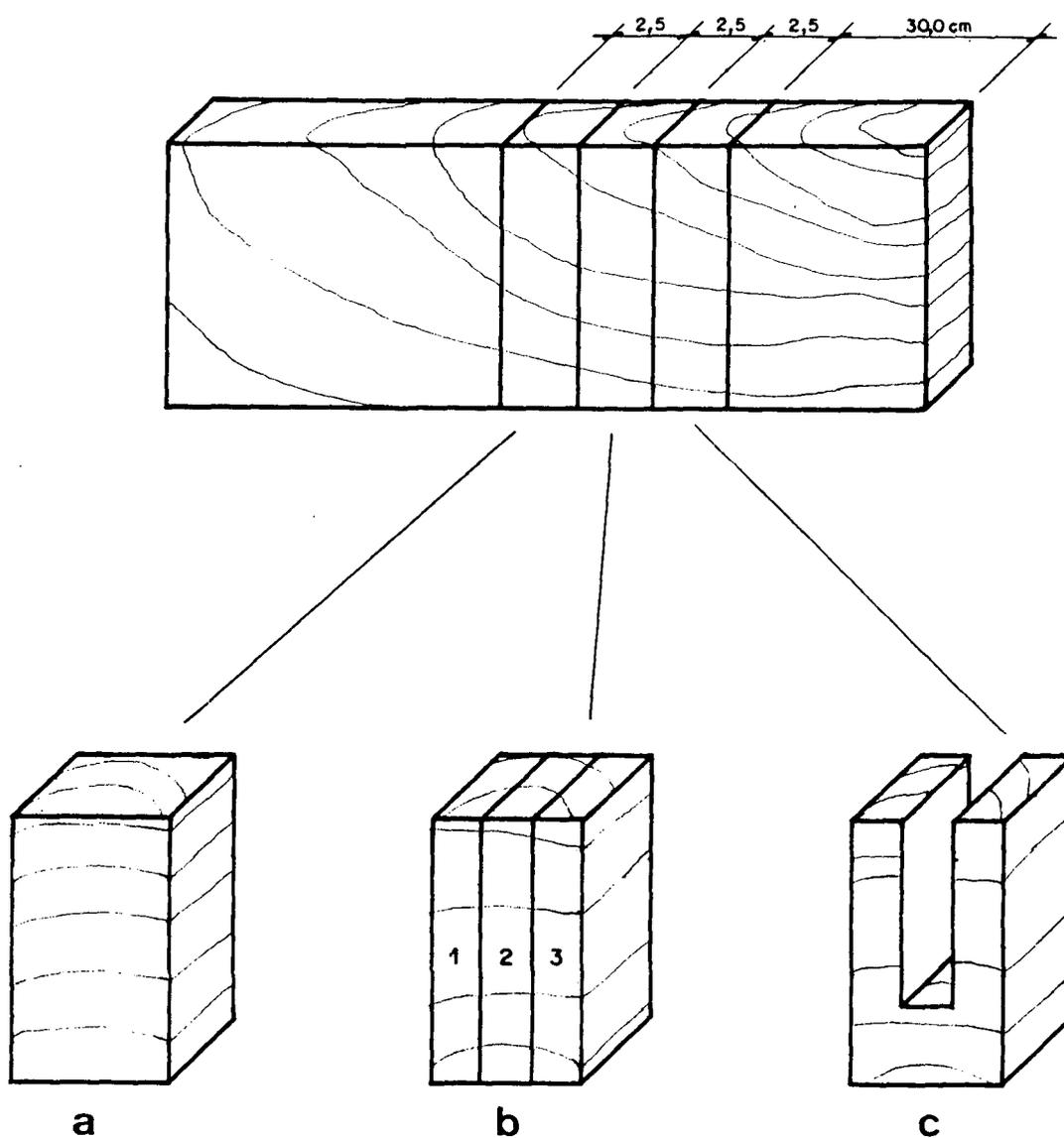
Determinou-se o teor de umidade inicial, antes e depois da vaporização final, sendo este controlado em todas as tábuas. Na figura 17a apresenta-se a forma de obtenção dos corpos de provas para a determinação do teor de umidade da madeira. Durante o processo de secagem, o teor de umidade foi acompanhado a partir de 6 amostras controle de 1 m de comprimento, tomadas ao acaso, três de cada grupo (vaporizadas e não vaporizadas), e do centro de cada tábua. Todas elas tiveram seus topos selados, para evitar a perda de umidade no sentido longitudinal da amostra.

#### b) Gradiente de umidade

Determinou-se o gradiente de umidade no início do processo, antes e após a vaporização final. As amostras para tal controle foram obtidas de acordo com a figura 17b, e foram sub-divididas em três pedaços, tendo cada um deles determinado o seu peso inicial e anidro, para depois calcular o teor de umidade de cada um dos pedaços.

FIGURA 17 - OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA:

- a) TEOR DE UMIDADE
- b) GRADIENTE DE UMIDADE
- c) TENSÕES DE SECAGEM



### c) Tensões de secagem

Estas foram controladas no início do processo antes e depois da vaporização final, para cada uma das tábuas utilizadas na secagem. O controle foi feito através do teste de garfo, representado na figura 17c.

### 3.4.4 Avaliação dos resultados da secagem

#### 3.4.4.1 Defeitos de secagem

##### a) Empenamentos

Foram identificadas as tábuas que apresentaram algum tipo de empenamento tal como encanoamento, encurvamento, arqueamento e outros, sem medir a sua intensidade.

##### b) Rachaduras

As rachaduras, tanto as de topos como as superficiais, foram avaliadas de acordo com os critérios apresentados na tabela 4.

TABELA 4: CRITÉRIO PARA AVALIAR AS RACHADURAS NAS TÁBUAS.

Defeito	Nível de intensidade dos defeitos			
	Rachaduras	Sem rachaduras	Se aceita até 4 ou 5 de 25 mm, finas.	Se aceita até 4 ou 5 de 25 mm, abertas.
Intensidade do defeito	0,0	0,5	1,0	1,5

Fonte: P. Teuber (1990).

### c) Colapso

A determinação do colapso foi feita através da remoção de alguns milímetros da superfície da tábua com uma plaina. Para tal efeito foram considerados os seguintes critérios :

- *Madeira livre de colapso:* Após a remoção de 1 - 1,5 mm da superfície da tábua não apresentava ondulações na sua superfície.
- *Madeira com colapso leve:* Após a remoção de 2,5 mm da superfície da tábua não apresentava ondulações na superfície.
- *Madeira com colapso médio:* Após a remoção de 3,5 mm da superfície da tábua não apresentava ondulações na superfície.
- *Madeira com colapso forte:* Tábuas que apresentaram ondulações na superfície após ser removido 3,5 mm.

#### 3.4.4.2 Teor de umidade

A determinação do teor de umidade foi pelo método gravimétrico. Com as amostras obtidas de cada tábua, determinou-se o teor de umidade inicial e final (antes e depois do condicionamento) da carga, de acordo com a seguinte equação:

$$U = \frac{P_i - P_o}{P_o} \times 100 \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

**U** : Teor de umidade, em %.

**P<sub>i</sub>** : Peso inicial, em gramas.

**P<sub>o</sub>** : Peso da amostra seca em estufa a 103±2°C, em gramas.

Da mesma forma, para as 6 amostras controle determinou-se o teor de umidade inicial, de cada uma delas. Com este valor e o peso inicial da amostra controle, determinou-se o peso anidro destas amostras, de acordo com a seguinte relação matemática:

$$Poc = \frac{Pic}{(Uim + 100)} \times 100 \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

**Poc** : Peso da amostra controle seca, em gramas.

**Pic** : Peso inicial da amostra controle, em gramas.

**Uim** : Teor de umidade médio das amostras controle, em %.

Uma vez determinado o **Poc**, obteve-se o Teor de umidade da amostra em qualquer instante **X** do processo, utilizando-se a seguinte equação:

$$Ux = \frac{Pcx - Poc}{Poc} \times 100 \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

**Ux**: Teor de umidade da amostra controle, num instante **X**, em %.

**Pcx** : Peso da amostra num instante **X** do processo de secagem, em gramas.

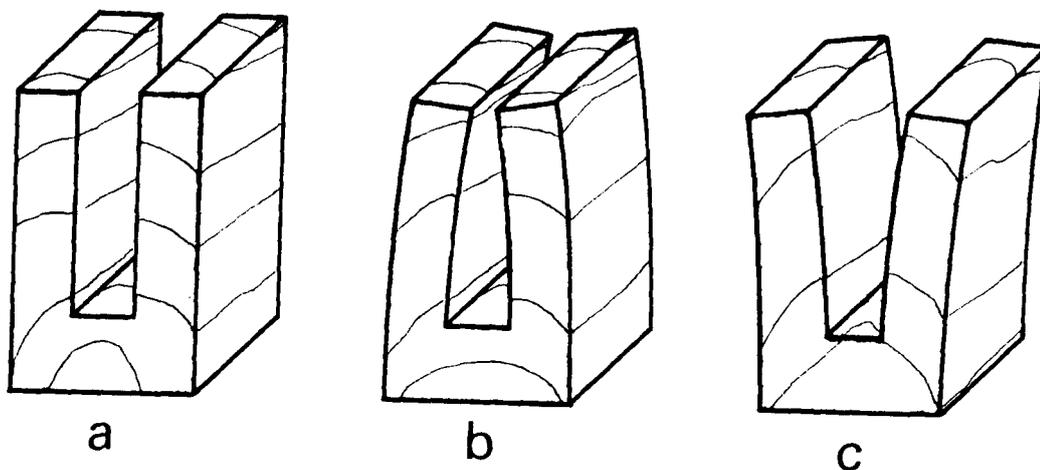
**Poc** : Peso seco da amostra, em gramas.

#### 3.4.4.3 Tensões de secagem

As tensões de secagem foram determinadas através do teste de garfos, segundo o seguinte critério (antes vaporização final): consideraram-se dois critérios para determinar a intensidade das tensões de secagem: 1.- Garfos de lados paralelos foram considerados sem tensão. 2.- Garfos com seus extremos inclinados para dentro ou para fora, foram considerados com tensão. Estes critérios estão representado na figura 18.

O mesmo critério anterior foi aplicado para avaliação das tensões de secagem após a vaporização final. Para confirmar a avaliação das tensões de secagem, foram selecionados três garfos ao acaso, que representavam cada um dois tempo de vaporização final aplicados (1, 2 e 4 horas), e posteriormente identificados com suas respectivas tábuas, que foram divididas ao meio para uma avaliação visual de seu comportamento.

FIGURA 18 - INTERPRETAÇÃO DO TESTE DE GARFO a) SEM TENSÃO, b) E c) COM TENSÃO



Uma vez divididas as tábuas ao meio, consideraram-se três critérios para a sua avaliação:

- 1.- Tábuas com seus extremos curvados para cima, significa que a madeira apresenta tensão e o tempo de vaporização aplicado foi pouco.
- 2.- Acontecendo o contrário a madeira também apresenta tensão, e significa que o tratamento de vaporização aplicado foi demasiadamente prolongado.
- 3.- Se as duas tábuas permanecem retas, significa que não há tensões e que o tratamento de vaporização aplicado foi adequado para liberar as tensões de secagem.

Tanto os garfos como as tábuas que foram divididas ao meio foram avaliadas após 24 horas, que seria o tempo suficiente para determinar se houve alguma diferença no comportamento das tensões de secagem.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL COLETADO

#### 4.1.1 Massa específica

Na tabela 5 estão representados os valores da massa específica básica para cada árvore utilizada e o valor médio. Pode-se observar que a massa específica básica decresce na altura da árvore (figura 19), sendo máxima a uma altura de 20 cm ( $0,54 \text{ g/cm}^3$ ) e mínima aos 7 m de altura ( $0,45 \text{ g/cm}^3$ ). Esta tendência também foi observada por VITAL et alii (1981) citado por SOUZA et alii (1986), o qual trabalhando com Eucalyptus grandis, verificou um decréscimo significativo na massa específica básica no sentido axial. TAYLOR (1973), citado por FERREIRA & KOGYAMA (1978), estudando a mesma espécie com 15 a 20 anos, constatou que havia uma tendência para a densidade decrescer desde o DAP até 4,5 m de altura, mas acima desse nível a densidade tenderia novamente a crescer. Da mesma forma, SOUZA et alii (1986) observaram um decréscimo da massa específica básica até 50 % da altura da árvore (7 m) e crescente deste ponto até o topo desta. Segundo este autor, esta tendência é observada com frequência no gênero Eucalyptus,

No entanto, alguns autores observaram um comportamento inverso desta propriedade, concluindo que a massa específica básica cresce linearmente com a altura da árvore ( FERREIRA, 1972, BARRICHELO et alii, 1983, BRITO et alii, 1977 e BRASIL et alii, 1977).

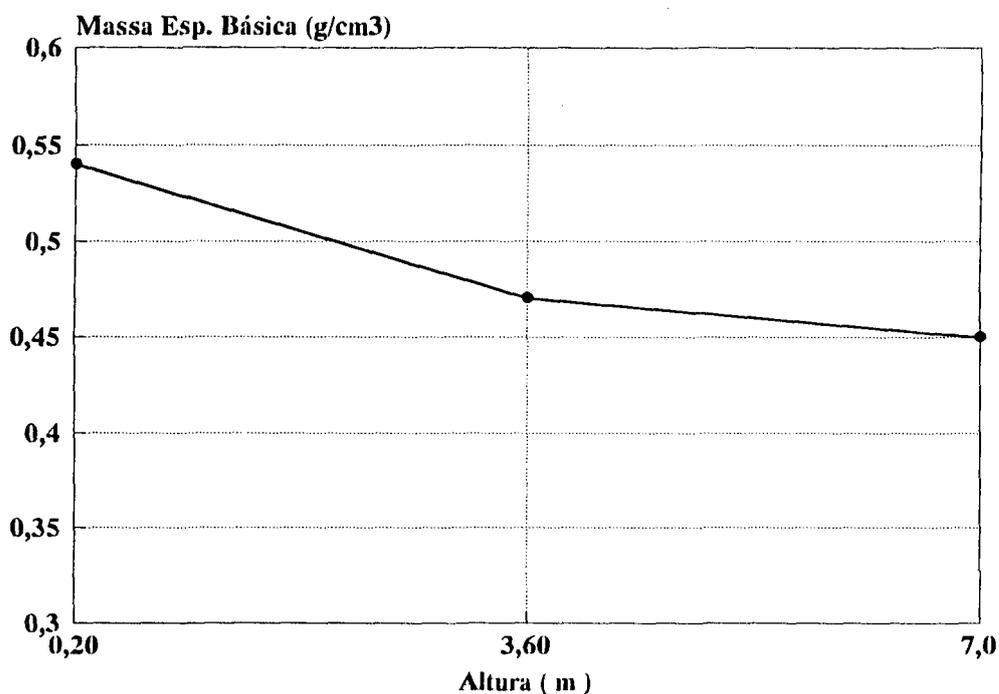
Na última coluna da tabela 5 são apresentados os valores da massa específica básica média tanto para cada árvore como o valor médio entre elas. Como se pode observar, a massa específica básica média entre as 12 árvores foi de  $0,49 \text{ g/cm}^3$ . Resultados que se aproximam dos valores obtidos por outros pesquisadores, tais como BRASIL & FERREIRA (1971), estudaram o efeito do espaçamento na massa específica básica, em árvores de cinco anos e de duas procedências, obtendo uma massa específica

básica de  $0,407\text{g/cm}^3$  e  $0,518\text{g/cm}^3$  para as localidades de Itupeva e Mogi Guaçu (SP) respectivamente.

TABELA 5 - MASSA ESPECÍFICA BÁSICA

Árvore	DAP cm	Massa Específica Básica ( $\text{g/cm}^3$ )			
		0,20 m	3,60 m	7,0 m	Média
1	44,6	0,57	0,46	0,46	0,50
2	44,6	0,49	0,43	0,43	0,45
3	41,4	0,50	0,44	0,43	0,46
4	45,0	0,52	0,44	0,44	0,47
5	36,6	0,63	0,55	0,52	0,57
6	41,0	0,49	0,43	0,41	0,44
7	41,4	0,44	0,44	0,52	0,47
8	35,0	0,44	0,36	0,39	0,40
9	37,6	0,49	0,56	0,45	0,50
10	43,9	0,66	0,44	0,41	0,50
11	35,0	0,68	0,58	0,45	0,57
12	39,5	0,55	0,49	0,47	0,50
Média	40,5	0,54	0,47	0,45	0,49

FIGURA 19 - VARIAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA BÁSICA MÉDIA NA ALTURA DA ÁRVORE DE *Eucalyptus grandis* COM 14 ANOS.



Da mesma forma FERREIRA (1972), estudando a massa específica básica em *Eucalyptus grandis* de árvores de diferentes idades (11, 12, 13, 14 e 16 anos), encontrou que a massa específica varou entre 0,479 a 0,555 g/cm<sup>3</sup>. Valores semelhantes foram encontrados por BRASIL & FERREIRA (1972), variando na altura do DAP entre 0,423-0,558 g/cm<sup>3</sup>, em árvores de 16 anos. SOUZA et alii (1986) encontraram uma massa específica entre 0,430 a 0,500 g/cm<sup>3</sup> e AGUIAR (1986) que obteve um valor médio de 0,52 g/cm<sup>3</sup>. O valor encontrado por BRITO & BARRICHELO (1977), no entanto, está acima dos valores

encontrados nesta pesquisa e pelos autores anteriormente citados, obtendo uma massa específica de  $0,62 \text{ g/cm}^3$ .

#### 4.1.2 Tensões de crescimento na altura da árvore

Para determinar este comportamento, utilizaram-se 7 árvores, sendo estas cortadas em três toretes de 3,40 m a diferentes alturas da árvore (0,2, 3,6 e 7,0 m); tanto as árvores como os toretes foram anelados com motosserra. As tensões de crescimento remanescentes nas toras foram determinadas através de sua manifestação durante o desdobro. Nas tábuas radiais as tensões manifestam-se como rachaduras e enquanto que nas tábuas tangenciais como aberturas destas em relação à toras. As rachaduras e as aberturas foram determinadas como descrito no item 3.3.

Os valores médios percentuais das tensões de crescimento na altura da árvore estão expostos numericamente na tabela 6 e graficamente na figura 20 (os valores de ANOVA são apresentados em anexo). Como se pode observar, a primeira tora ( $T_1$ ) e a última ( $T_3$ ) apresentaram menor porcentagem de tensões de crescimento (porcentagem obtido através das rachaduras das tábuas durante o desdobro) que a tora do meio ( $T_2$ ), sendo estes porcentagem 29,3, 35,1, e 27,8% respectivamente. Embora, estes valores não tenham apresentado uma diferença estatística significativa, existe entre os toretes uma diferença nas magnitudes das tensões de crescimento na altura da árvore, indicando que a tora do meio pode ser mais propensa a rachar. Como as tensões de crescimento foram avaliadas através dos defeitos que apresentam as tábuas durante o desdobro das toras (principalmente rachaduras), observou-se de maneira geral que as tábuas rachavam mais na entrada da serra que na saída desta. Isto pode ser atribuído ao fato de que as tensões de crescimento remanescentes na tora foram liberadas de forma gradativa a medida que a tora foi serrada, provocando maior intensidade de rachaduras na entrada da tora, por serem estas de maior intensidade no início.

TABELA 6 - VALORES MÉDIOS PERCENTUAIS DE RACHADURAS NA ALTURA DA ÁRVORE E NA ENTRADA E SAÍDA DA SERRA.

Posição Árvore	Total Árvore*	Rachaduras**	
		Entrada Serra	Saída Serrada
T2	29,3	36,5	22,1
T1	35,1	37,7	32,4
T3	27,8	36,7	18,9

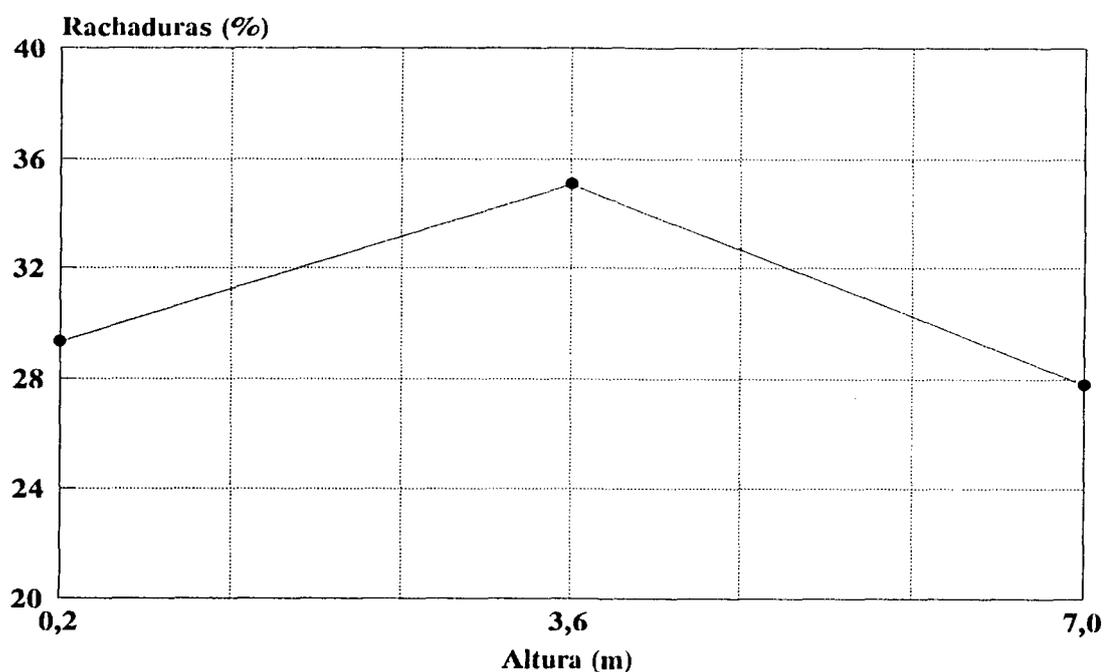
\* :Não significativo ao nível de 95 % .

\*\* :Significativo ao nível de 95 % .

Na literatura existente observam-se divergências quanto ao comportamento das tensões de crescimento na altura da árvore, sendo que para alguns autores estas tensões não variam na altura da árvore (JACOBS citado por BOYD (1950 III) e referenciado por MALAN, 1984, SALES, 1982). Para outros, existe um pequeno aumento na intensidade destas tensões de crescimento na altura da árvore. YAO ,1979, encontrou um aumento até 8 m e uma decréscimo das tensões dos 8 aos 11m de altura, o que foi também observado por NICHOLSON (1971). CHAFE, 1981, evidenciou um aumento das tensões com altura da árvore, o qual não foi significativo. Contrariando estes autores, MALAN (1984) observou, que as rachaduras de topo foram maiores nos primeiros 2 a 3 metros, e diminuíram de intensidade com a altura da árvore, sendo este comportamento o mais próximo do obtido nesta pesquisa, pelo menos até os primeiros metros de altura.

A não significância obtida neste estudo pode ser devida à grande variabilidade dos valores obtidos, já que o comprimento das rachaduras das tábuas, forma utilizada para determinar o comportamento das tensões de crescimento, variou entre 0 e 2,85 metros, e/ou ao baixo número de repetições.

FIGURA 20 - TENSÕES NA ALTURA DA ÁRVORE (EM PORCENTAGEM DE RACHADURAS)



## 4.2 LIBERAÇÃO DAS TENSÕES DE CRESCIMENTO

### 4.2.1 Nas toras

Para a liberação das tensões de crescimento aplicaram-se dois tratamentos: o primeiro foi o anelamento com motosserra, que teve como objetivo liberar parte das tensões de crescimento, tanto na árvore em pé como nos toretes, e evitar a propagação das rachaduras de topo provocadas pelo tratamento de aquecimento. O segundo tratamento utilizado para a liberação das tensões remanescentes nas toras verdes, previamente aneladas, foi através da aplicação de vapor a uma temperatura de 90° C.

A avaliação visual do anelamento indicou que imediatamente depois de cortadas, tanto as árvores como os toretes não apresentaram fendas ou rachaduras nos topos (ver figura 21).

FIGURA 21 - TORAS DE Eucalyptus grandis LOGO APÓS A DERRUBADA.



Como a presença de rachaduras é uma das formas de manifestação das tensões de crescimento, ocorrendo algumas vezes imediatamente após a derrubada das árvores (NICHOLSON, 1973b, De VILLIERS, 1973, EDWARDS, 1973, CHAFE, 1979, SALES, 1986), o tratamento de anelamento cumpriu em parte (durante o desdobro as tábuas provenientes das toras testemunhas racharam) o objetivo de liberar as tensões de crescimento após o corte das árvores e obtenção dos toretes, já que estes não apresentaram rachaduras.

A aplicação do tratamento de vaporização por um período de 18 ou 36 horas, causou rachaduras nos topos das toras. Fato similar foi observado por vários pesquisadores, que consideram que as rachaduras nos topos é um dos principais problemas na utilização de calor para a liberação das tensões de crescimento, principalmente nas toras que serão utilizadas para laminação (LUTZ, 1974; AGUIAR, 1986 e ROZAS, 1991). No entanto, os resultados desta pesquisa indicaram que o anelamento com motosserra realizado nos extremos dos toretes impediu que as rachaduras provocadas pela vaporização se estendessem ao longo da tora (ver figura 22). Resultado similar foi obtido por KUBLER & CHEN (1975), que testaram três diferentes formas para prevenir a formação de fendas nos extremos das toras (fitas, anelamento com motosserra e entalhe feito com motosserra na ponta da tora). Dos três métodos testados o entalhe previne a formação de fendas durante o armazenamento e durante o aquecimento das toras, enquanto os outros dois tratamentos (anelamento e fitas ) dificultam a formação das rachaduras.

Ao comparar as figura 22 a e b, que correspondem aos tempos de vaporização de 18 e 36 horas respectivamente, observa-se que não há uma diferença entre as rachaduras de topo, nos dois tempos aplicados, o que leva a supor que as rachaduras se formam nos primeiras horas após iniciado o processo de aquecimento das toras, e que cessa quando estas chegam a um equilíbrio na tora. Pode-se observar também nestas figuras uma descoloração superficial das toras, provocadas pelo tratamento de vaporização.

FIGURA 22 - RACHADURAS PROVOCADAS PELO TRATAMENTO DE VAPORIZAÇÃO; a) 18 horas e b) 36 horas.



(a)



(b)

#### 4.2.2 Na madeira serrada

A avaliação do tratamento aplicado às toras (anelamento + vaporização) como meio para liberar as tensões de crescimento foi feita durante o desdobro das toras, sendo que estas manifestam-se de forma diferente para peças radiais e tangenciais. As peças tangenciais, abrem em relação à tora, e esta abertura aumenta quando se continua o corte, o que provoca o desbitolamento na espessura da peça. Já para as peças do centro da tora, se produzem fendas ou rachaduras nos extremos das tábuas, que continuam rachando longitudinalmente quando progride o desdobro. Esta rachadura na largura da tábua pode chegar eventualmente a mais de 10 cm, e no comprimento a vários metros (SALES, 1986). As rachaduras podem ser tão grandes que se produzem em ambos os extremos das tábuas (De VILLIER, 1973).

As avaliações visuais realizadas durante o desdobro indicaram que as tábuas obtidas não apresentaram nenhum tipo de empenamento ou desbitolamento, tanto das toras testemunha (aneladas), como das toras tratadas (anelamento+vaporização). Vários autores indicam que toras que não sofreram nenhum tratamento, para liberar as tensões de crescimento apresentam algum tipo de defeitos durante o desdobro, sejam rachaduras, empenamentos ou desbitolamento (NICHOLSON, 1973a, De VILLIERS, 1973, SALES, 1986)

A inexistência de defeitos nas toras tratadas (empenamento e desbitolamento), demonstra que tanto o anelamento como a vaporização aplicados para liberar as tensões de crescimento tiveram um efeito positivo. No entanto, durante o dimensionamento das tábuas centrais, provenientes das toras testemunhas (aneladas), observou-se um leve empenamento (arqueadura), defeito mencionado por OKUYAMA et alii (1987) e NICHOLSON (1973a) em madeira sem tratamento para a liberação das tensões de crescimento. As tábuas provenientes das toras vaporizadas tanto por 18 horas como 36 horas não apresentaram este defeito, indicando que o tratamento de anelamento não foi suficiente para liberar as tensões de crescimento. Já o tratamento de vaporização foi mais efetivo.

Na figura 23, estão representadas as rachaduras médias das tábuas provenientes das toras testemunha-aneladas (as toras vaporizadas não racharam). Como pode ser observado, as rachaduras de forma geral, se intensificaram da superfície para o centro da tora. Este fato pode ser explicado pela distribuição das tensões de crescimento (tração na superfície e compressão no centro) que atuam e que são responsáveis pela formação das rachaduras. Embora as tensões transversais representem aproximadamente 1/10 das tensões longitudinais, estas são capazes de provocar rachaduras nas tábuas radiais, pela fragilidade que o material apresenta no sentido radial. Quando se realiza um corte paralelo, como o utilizado neste trabalho, as tábuas centrais da tora (submetidas a compressão) racham, e a magnitude destas rachaduras dependerá do nível de tensão existente na tora. Tanto NICHOLSON (1973a), SALES (1986) e De VILLIERS (1973) concordam que durante o desdobro, as tábuas radiais apresentam rachaduras nos extremos, produto da liberação das tensões de crescimento, o que ocorreu em madeira sem tratamento para a liberação das tensões de crescimento.

Embora, tenha sido aplicado o método de anelamento com motosserra nas toras, as toras testemunha, como já discutido anteriormente apresentaram rachaduras, o que leva a concluir que este tratamento não é suficiente para eliminar totalmente as tensões de crescimento, sendo também observado por outros autores (BARNACLE & GOTTSTEIN, 1968, GIORDANO & CURRO, 1972, AGUIAR, 1986, ROZAS, 1992)

Na tabela 7 são apresentados os resultados do teste de Tukey, aplicado às aberturas médias, e ao comprimento e largura da rachadura, relacionando o fator tempo de vaporização (18 e 36 horas). Observa-se nesta tabela (sentido horizontal) que não há uma diferença estatisticamente significativa ao nível de 95 % de probabilidade, entre os tempos de vaporização aplicados, tanto na abertura das tábuas como na largura e comprimento de rachaduras, seja entre as toras testemunhas ou entre toras vaporizadas. Conclui-se portanto, que em principio não é necessário aplicar um tempo de vaporização superior a 18 horas para obter um bom resultado na liberação das tensões de crescimento nas toras resultando numa diminuição no consumo da energia.

FIGURA 23 - COMPRIMENTO MÉDIO DE RACHADURAS DURANTE O DESDOBRAMENTO DAS TORAS TESTEMUNHA DE *Eucalyptus grandis*

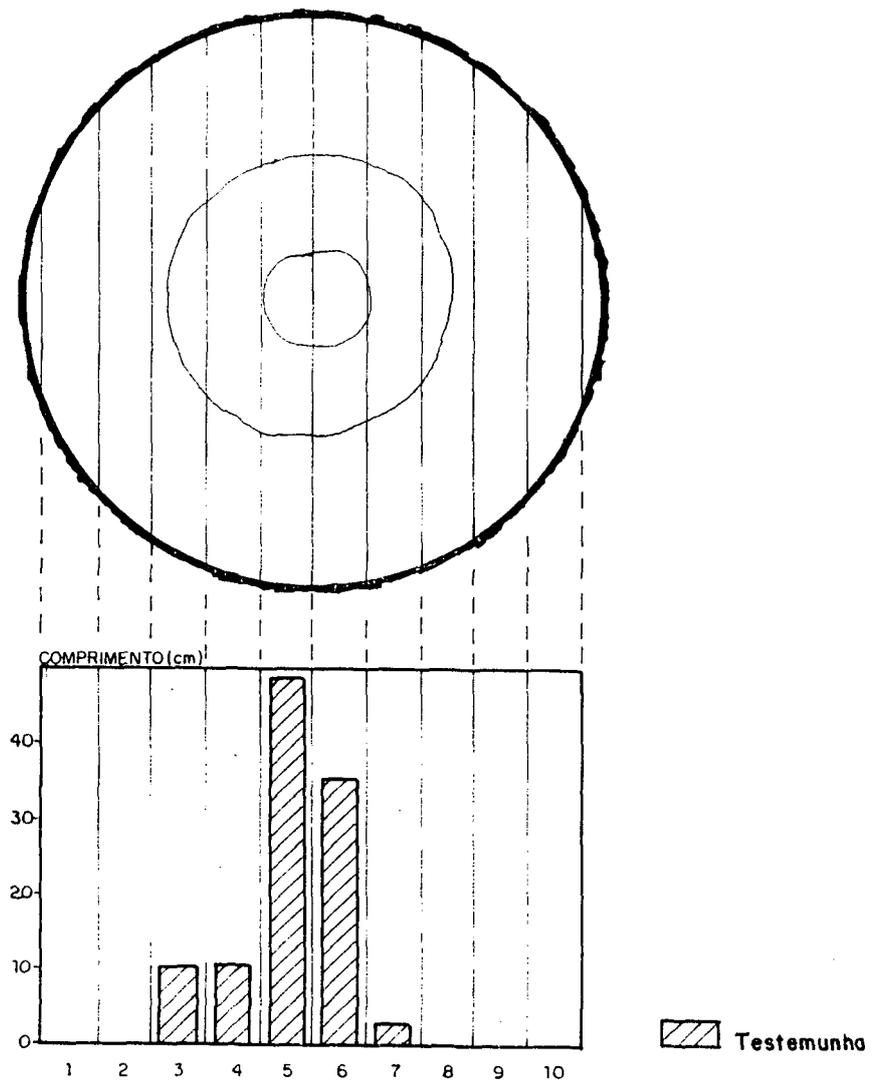


TABELA 7 - TESTE DE TUKEY PARA MÉDIAS DO FATOR TEMPO (18 E 36 HORAS DE VAPORIZAÇÃO)

Fator	Abertura			Rachadura Média (cm)					
	Média (cm)			Comprimento			Largura		
	18 h	36 h		18 h	36 h		18 h	36 h	
Vaporizadas	0,92	0,74	NS	0,00	0,00	NS	0,00	0,00	NS
Testemunha	1,30	1,20		6,33	9,67		0,17	0,17	
	S	S		S	S		S	S	

NS: Não significativo ao nível de 95 % de probabilidade

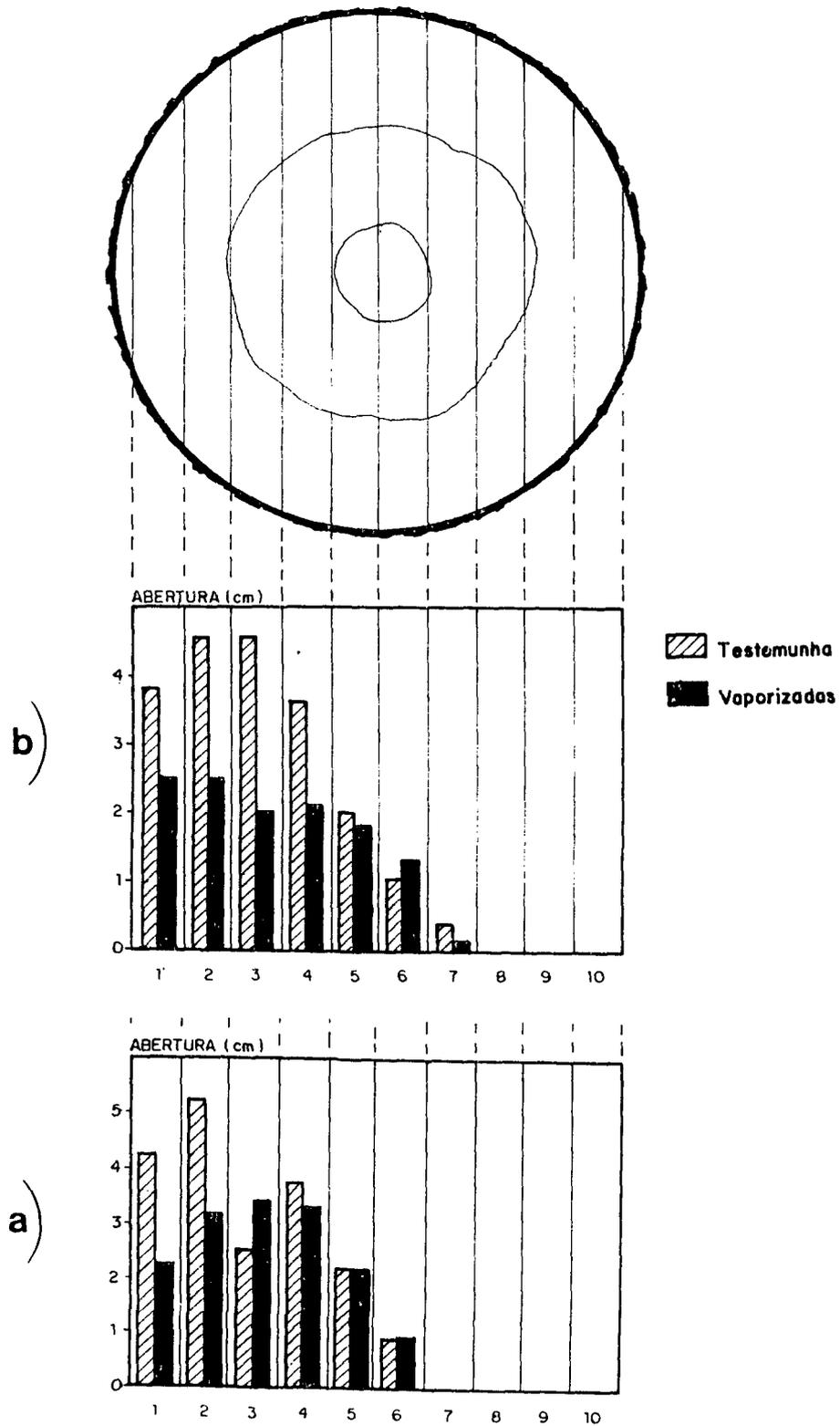
S : Significativo ao nível de 95 % de probabilidade

Ainda a tabela 7 compara-se os resultados entre as toras testemunhas (aneladas) com as toras vaporizadas (anelamento+vaporização). Observa-se nesta tabela que o tratamento aplicado foi significativo tanto para 18 horas como para 36 horas de vaporização, considerando os diferentes parâmetros controlados durante o desdobro das toras (abertura, e comprimento e largura das rachaduras das tábuas), já que as toras testemunhas racharam nos dois períodos de tratamento.

O valor de abertura médio das tábuas em relação à tora podem ser observados na figura 24a e 24b, tanto para toras vaporizadas por 18 horas (figura 24a) como as toras vaporizadas por 36 horas (figura 24b). Pode-se observar que, em geral, as aberturas

diminuem quanto mais próximo da medula foi o corte. Este fato pode ser explicado pela liberação parcial das tensões longitudinais, que se encontram sob tração na periferia da tora e sob compressão no centro dela, de tal forma que quando cortada a primeira tábua, a tensão de tração (que é de grande magnitude na superfície) é liberada, provocando uma contração na superfície da tábua, curvando-a para fora. À medida em que o corte aproxima-se do centro da tora, o efeito desta tensão é menor, e portanto, a tábua não abrirá com a mesma força que a primeira, atuando neste caso a força de compressão. As rachaduras não foram representadas por serem inexistentes nas toras vaporizadas, para os dois tempos de vaporização aplicados. Conclui-se, portanto, que o tratamento aplicado (vaporização) liberou grande parte das tensões de crescimento remanescente nas toras, confirmando desta forma o observado por outros autores, que utilizaram temperatura para a liberação destas tensões (LUTZ & PANZER, 1969 citado por KUBLER, 1987, LUTZ, 1974, SKOLMEN, 1967, WEIK et alii, 1984, OKUYAMA et alii, 1987 e ROZAS, 1992)

FIGURA 24 - ABERTURAS MÉDIAS DAS TÁBUAS DURANTE O DESDOBRO DE TORAS DE *Eucalyptus grandis*. a) 18 horas b) 36 horas DE VAPORIZAÇÃO.



O efeito do tratamento de anelamento-vaporização aplicado para a liberação das tensões de crescimento pode ser resumido na tabela 8.

TABELA 8 - DEFEITOS PRODUZIDOS DURANTE O DESDOBRO DAS TORAS PRODUTO DAS TENSÕES DE CRESCIMENTO.

<b>Defeitos</b>	<b>Testemunhas (anelamento)</b>	<b>Vaporizadas (anelamento+vaporização)</b>
Empenamento (arqueamento)	Presente (leve)	Ausente
Rachaduras	Presente	Ausente
Abertura das tábuas em relação à tora	Presente (mediano)	Presente-leve

Possivelmente, a ausência total das rachaduras e de arqueamento, e a diminuição da abertura da tábua durante o desdobro das toras, pode dever-se a duas razões: a primeira delas é que o método do anelamento com motoserra, libera uma certa porcentagem das tensões de crescimento nas toras, o que é fundamentado por HILLIS (1978), BARNACLE & GOTTSTEIN (1968), CONRADIE (1980) VAN VYK citado por MALAN (1984), que mostraram que este método apresentou uma significativa redução das tensões de crescimento, sem, portanto, eliminá-las completamente. A segunda razão da liberação das tensões deve-se ao tratamento de aquecimento aplicado às toras, a uma temperatura de vaporização de 90°C, confirmando o referenciado por LUTZ (1974), que afirma que quando a madeira é aquecida a uma temperatura de 82°C, aproximadamente 90% ou mais das tensões de crescimento são liberadas por este tratamento. Da mesma

forma SKOLMEN (1967) e IMAN & HEIKAL (1972), citado por HILLIS (1978) observaram que o aquecimento das toras a uma temperatura de aproximadamente 100°C, provoca uma considerável diminuição das tensões de crescimento.

### 4.3 SECAGEM

Os dois programas de secagem testados permitiram avaliar a taxa de secagem, empenamentos, colapso e rachaduras, assim como a determinação do gradiente de umidade e das tensões geradas pelo processo de secagem, antes e depois da vaporização final. Estes dois programas foram utilizados para uma secagem de tábuas de Eucalyptus grandis com 30 mm de espessura desde verde, até um teor de umidade final de aproximadamente 7 %. Com a vaporização final, o teor médio de umidade obtido foi de aproximadamente 9 %.

#### 4.3.1 Taxa de secagem

A taxa de secagem, que se refere à porcentagem de água evaporada num determinado intervalo de tempo, foi calculada através da diferença entre duas medições de teor de umidade das amostras controle. Calculou-se a velocidade de secagem da pilha de madeira através da média das 6 amostras controle. A velocidade de secagem da madeira serrada depende de vários fatores tais como temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do ar, espécie, tipo de madeira teor de umidade inicial e espessura, entre outros (BROWN & BETHEL, 1965, KOLLMANN & CÔTÉ, 1968).

A perda de umidade para ambos programas de secagem testados pode ser observado nas curvas de secagem apresentadas na figura 25. Como pode ser verificado para o Programa de Secagem I, o processo começou com um teor de umidade médio de 97,6 % (ver também tabela 9) e a uma temperatura inicial de 45°C (depois da madeira ser vaporizada por 2 horas). Assim, o tempo total do processo de secagem desde um teor

de umidade inicial de 97,6 % até um teor de umidade final de 7,6 %, foi de 615,5 horas (25,6 dias), com uma velocidade de secagem média de 3,51%/dia, incluindo as duas primeiras vaporizações.

Realizando uma análise similar para o segundo programa de secagem aplicado, observa-se que este foi iniciado com um teor de umidade de 127,5 %, a uma temperatura de 40°C (depois da madeira ser vaporizada por duas horas). Desta forma a velocidade de secagem média foi de 3,36 %/dia, com um tempo de secagem de 864 horas (36 dias), incluindo as duas primeiras vaporizações.

FIGURA 25 - CURVA DE PERDA DE UMIDADE PARA OS PROGRAMAS DE SECAGEM ( I e II ).

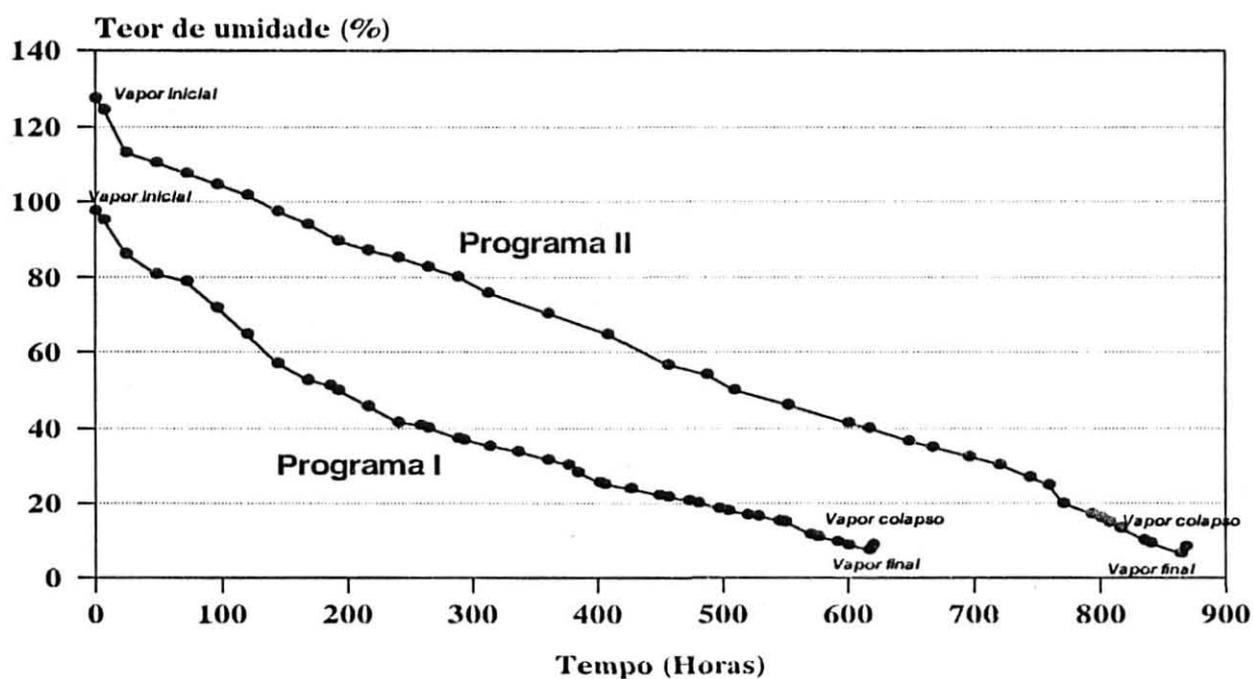


TABELA 9 - TEOR DE UMIDADE INICIAL E FINAL PARA CADA PROGRAMA DE SECAGEM

Umidade	Programa Secagem I		Programa Secagem II	
	(%)		(%)	
Inicial	97,6*	105,4**	127,5*	103,6**
Final	7,6*	7,5**	6,5*	6,7**

\* Valor médio das amostras de secagem.

\*\* Valor médio das 36 tábuas.

Ao comparar as taxas de secagem médias entre os dois programas aplicados, observa-se que são praticamente iguais, sendo de 3,51%/dia para o Programa I e de 3,36%/dia para o segundo programa de secagem aplicado. No entanto, como pode ser observado na tabela 9, existe uma grande diferença entre os teores de umidade inicial das amostras controle de ambos os programas de secagem, sendo de 97,6% para o Programa I (semelhante ao valor médio das 36 tábuas) e de 127,5% para o segundo programa, valor que difere da média entre as 36 tábuas da pilha de madeira, em 23,9%. Isto indica que a amostragem realizada para a obtenção da amostra controle (selecção ao acaso entre as 36 tábuas da pilha) não foi representativa. Uma vez, que quanto mais elevado o teor de umidade inicial, maior será o tempo de secagem para alcançar um determinado teor de umidade final da madeira (BROWN & BETHEL, 1968). De forma geral, quanto maior a

diferença entre o teor de umidade inicial e o teor de umidade final da madeira, maior será o tempo necessário para a sua secagem.

Os dois programas permitiram a secagem da madeira desde verde até um teor de umidade de aproximadamente 7 % (sem considerar a vaporização final), num tempo razoavelmente curto para a espécie utilizada e com um mínimo de defeitos como analisado a seguir. Estes tempos de secagem são considerados bons quando comparados com os valores obtidos para esta espécie no Brasil., que de acordo com PONCE, 1992 (comunicação pessoal), o Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo S.A. (IPT) seca madeira de Eucalyptus grandis somente ao ar, e o tempo de secagem para madeira de 25 mm, até atingir um teor de umidade de 14-15 %, com um mínimo de defeitos é em torno de 3-6 meses. Segundo JANKOWSKY, 1992 (comunicação pessoal), a secagem de madeira de Eucalyptus a partir de um teor de umidade inicial de 60 % demoraria cerca de 30 dias para alcançar um teor de umidade final de 12 %. Práticas industriais de secagem ao ar livre de madeira de Eucalyptus de 25 mm destinada para caxotaria, demora 2 meses para atingir o PSF, e posteriormente é seca em câmara até atingir o teor de umidade desejado, num período que varia entre 5 - 10 dias (TOMASELLI, 1992). O tempo de secagem de Eucalyptus viminalis desde 50 % até 9 % de umidade foi de aproximadamente 21 dias, sendo 72 % da madeira aproveitável (ROZAS & TOMASELLI, 1993).

Da mesma forma comparando os resultados obtidos com a secagem de madeira de Eucalyptus globulus no Chile, a qual é realizada através de um sistema misto, sendo seca ao ar até atingir 30 % de umidade, num período de tempo de 8 - 15 meses, dependendo da latitude; posteriormente, a madeira é seca em câmara até o teor de umidade final, em 2-3 semanas (NEUMANN, 1989). Segundo o mesmo autor, é possível secar esta espécie de madeira através de uma pré-secagem e posterior secagem a alta temperatura. Para madeira de 30 mm, o tempo da pré-secagem desde 70% até 21 % é de 35 dias, com uma temperatura inicial de 22,5°C e final de 35°C. O tempo de secagem desde 21 % até 10 % seria de 20 horas, com uma temperatura de secagem de 110°C.

De acordo com STÖHR (1977), o tempo de secagem para madeira de *Eucalyptus grandis*, seria em torno de 18 - 25 dias desde verde, com uma temperatura inicial de 60°C. No entanto, RIEST et alii (1982b) citado por STÖHR (1983) e referenciado por VERMAAS (1987), diz que a madeira seca em câmara desde verde a uma temperatura inicial de 60 - 66°C, apresenta aproximadamente 50 % de colapso e/ou favo de mel (rachaduras internas). Segundo KAUMAN, 1992 (comunicação pessoal), o tempo de secagem para madeira de *Eucalyptus* a partir do ponto de saturação das fibras, seria em torno de 120 - 200 horas (5 - 8 dias). Já as espécies plantadas na Nova Zelândia não podem ser secas satisfatoriamente em câmara desde verde, pela grande degradação durante a secagem, principalmente por colapso, empenamentos e fendas. Estes defeitos podem ser reduzidos numa secagem ao ar livre até o teor de umidade de 30 % e posterior secagem em câmara (CONCANONN, 1982).

Concluindo-se portanto que os ganhos obtidos em termos de taxa de secagem, podem ser atribuídos à vaporização inicial, bem como as elevadas temperaturas aplicadas na período final da secagem ( 80°C).

#### 4.3.2 Defeitos de secagem

Os defeitos resultantes da secagem, para cada programa aplicado, são apresentados na tabela 10 e para uma melhor compreensão, na figura 26. Como pode ser observado, o Programa I , em forma geral, apresentou uma maior porcentagem de madeira com defeitos em relação ao Programa II, sem estes em ordem de importância encanoamento, colapso e rachaduras. O primeiro programa de secagem aplicado apresentou 50% de encanoamento, 41,7% de colapso e 5,6% de rachaduras. Já o segundo programa aplicado apresentou 41,7% de encanoamento, 36,1% de colapso e 5,6% de rachaduras. No entanto, com os dois programas de secagem aplicados, foi possível obter 94,4% de madeira aproveitável.

TABELA 10 - DEFEITOS RESULTANTES DA SECAGEM PARA CADA PROGRAMA APLICADO. TÁBUAS DE *Eucalyptus Grandis* 30 mm de espessura.

TIPO DE DEFEITO*	PROGRAMA SECAGEM I		PROGRAMA SECAGEM II	
	n	%	n	%
COLAPSO				
Leve	5	13,9	5	13,9
Médio	6	16,7	5	13,9
Forte	4	11,1	3	8,3
ENCANOAMENTO	18	50,0	15	41,7
RACHADURAS	2	5,6	2	5,6
Madeira Colapsada		41,7 %		36,1 %
Madeira Aproveitável **		94,4 %		94,4 %

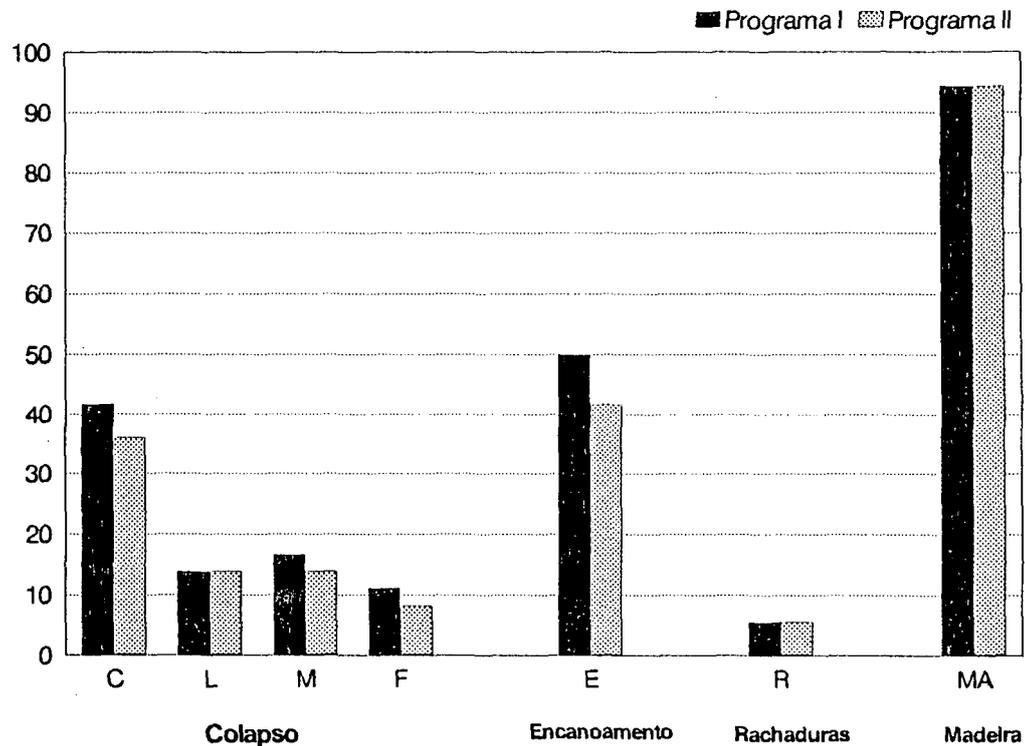
\* : Defeitos entre 36 tábuas

\*\* : Relacionado ao número de peças.

n : Número de tábuas que apresentaram defeitos

% : Porcentagem de tábuas que apresentaram defeitos

FIGURA 26 - PORCENTAGEM DE DEFEITOS PARA OS DOIS PROGRAMAS DE SECAGEM. TÁBUAS DE *Eucalyptus grandis* DE 30 mm DE ESPESSURA



C: Colapso  
 L: Colapso leve  
 M: Colapso médio  
 F: Colapso forte

E : Encanoamento  
 R : Rachaduras  
 MA: Madeira aproveitável

Embora exista uma pequena diferença na porcentagem de colapso (5,6%) entre os dois programas testados, diferença esta representada por duas tábuas colapsadas a mais para o Programa I, praticamente os dois programas de secagem tiveram uma baixa porcentagem de colapso. Esta baixa porcentagem de colapso apresentado como a diferença deste defeito entre os dos programas, se deva principalmente à menor temperatura inicial utilizada para secar a madeira (40°C). De acordo com vários autores,

a temperatura de secagem é um dos fatores mais importantes no desenvolvimento deste defeito, que aumenta com o acréscimo da temperatura ( KAUMAN, 1964, BLUHM & KAUMAN, 1965, VILLIÈRE, 1966, SANTINI & TOMASELLI, 1980). De acordo com STÖHR & MACKAY (1983) a degradação da madeira devido ao colapso não parece se constituir num problema na secagem em câmara da madeira de Eucalyptus grandis desde verde, sempre e quando a temperatura inicial de secagem se mantenha a níveis baixo. Este autor concluiu que a temperatura é o efeito dominante no desenvolvimento da maioria dos defeitos de secagem, sendo estes, em ordem de importância, encanoamento, colapso e torcimento. Para diminuir as possibilidades de colapso, KAUNAN (1964) recomenda que a temperatura no início da secagem não deve ser superior a 40°C para as madeiras difíceis de secar.

Além da temperatura, possivelmente também a vaporização inicial (2 horas) seria um fator a considerar como uma resposta à baixa porcentagem de colapso (forte e médio principalmente) apresentado em ambos os programas de secagem testados, uma vez que esta permitiria remover os componentes estranhos (extrativos), que obstruem os espaços celulares por onde circula a água. Embora neste estudo não tenha sido determinada a quantidade de extrativos na madeira, de acordo com HILLIS & BROWN (1978) a madeira de Eucalyptus grandis apresenta uma grande quantidade de extrativos. Segundo HOLMES & KOZLIK (1989), vários trabalhos mostram que a pré-vaporização, em madeira com um alto teor de extrativos, pode tanto ajudar à velocidade de secagem como também a reduzir o desenvolvimento do colapso. Além disso, a pré-vaporização por períodos curtos, não superior a 2-3 horas a 100°C, pode aumentar a velocidade e também permite uma diminuição nos defeitos de secagem, sem este afetar a resistência mecânica da madeira (CAMPBELL, 1961). Da mesma forma, ALEXIOU et alii (1990) e HASLET & KININMONTH (1986), mostraram que uma modificação no conteúdo de extrativos durante a pré-vaporização, aumento da taxa de secagem, permitindo com isso um aumento da permeabilidade da madeira.

Ao final do processo de secagem, durante a avaliação dos defeitos, observou-se que em ambas as cargas de madeira, as tábuas tangenciais (paralela aos anéis de crescimento) apresentaram um menor grau de colapso ou não o apresentaram, em relação às peças radiais (perpendicular ao anéis de crescimento). De acordo com a literatura (FOREST PRODUCTS LABORATORY USDA, 1988 e TUSET & DURAN, sem data) é esperado que a madeira tangencial apresente uma menor porcentagem de colapso que a madeira radial. Explicações dadas por KAUMAN (1964), indicam que o colapso é usualmente 1,5 a 3 vezes maior na direção tangencial que na radial, devido provavelmente à restrição exercida pelos raios, nesta direção, e também pode ser atribuído à perda preferencial da água que existe das fibras em direção aos raios através das pontuações. No entanto, segundo SANTINI & TOMASELLI (1980) deve-se ao fato que as paredes tangenciais das células são mais grossas e portanto, apresentarão uma maior resistência mecânica. Possivelmente a diferença no colapso entre a madeira tangencial e radial, não se limite a uma destas hipóteses, mas sim ao efeito combinado das três.

Tomando-se em consideração que a madeira tangencial, apresenta uma menor intensidade de colapso que a madeira radial, e que o sistema de corte tangencial das toras permite obter tábuas tangenciais com um grau de empenamento menor, produto da liberação das tensões de crescimento. Conclui-se que a produção de madeira tangencial é mais apropriada que a madeira radial, tanto durante o desdobro das toras (menor empenamento), como na posterior secagem das tábuas. No entanto, deve-se considerar que a madeira tangencial é mais propensa a rachaduras e portanto as condições de secagem não devem ser severas, de tal forma de evitar altos gradientes de umidade e conseqüentemente o aparecimento das rachaduras. Segundo BEAUREGARD et alii (1992), o empenamento produzido durante o desdobro das toras é de menor importância em madeira tangencial. O encurvamento pode ser reduzido durante a secagem, pelo efeito do peso da madeira sobre se mesma (VERMAAS, 1987).

Nas duas cargas de madeira observou-se que duas peças centrais (corte radial) colapsaram e racharam fortemente, sendo que a rachadura se manifestou no meio da peça,

embora esta não apresentasse medula. Isto possivelmente seja devido à ocorrência de madeira juvenil e do defeito denominado "coração quebradiço", que ocorre no centro da tora e apresenta uma menor resistência mecânica (NICHOLSON, 1973b, CHAFE, 1979). Segundo KAUMAN (1964) a madeira do centro da tora que está submetida a esforços de compressão, é mais macia que aquela da parte externa da tora e, além de ser mecanicamente mais fraca, apresenta maior propensão ao colapso.

Como mencionado anteriormente o encanoamento foi mais representativo do que o colapso e do que as rachaduras, sendo de 50 % para o primeiro programa de secagem e de 41,7 % para o segundo programa, fato também observado por STÖHR & MACKAY (1983). Este defeito deve-se principalmente a uma retração desigual (anisotropia) entre a contração tangencial e a contração radial, sendo maior na superfície tangencial das tábuas que na superfície radial da mesma. Possivelmente deve-se à utilização de temperaturas baixas (40°C) no início da secagem, uma vez que as altas temperaturas utilizadas nos estágios iniciais da secagem de madeira de folhosas provoca um aumento nas contrações e, portanto, um aumento nos defeitos de secagem RIETZ (1969). No entanto, também a diminuição dos empenamentos pode estar relacionada à pré-vaporização aplicada à carga de madeira, pois de acordo com TOMASELLI (1978), a vaporização inicial, normalmente realizada a temperaturas próximas a 100°C e por períodos dependentes das espécies e espessura do material, minimiza o problema dos empenamento durante a secagem, pois tal fase é importante para que ocorra na madeira o processo de plasticização. Da mesma forma, CAMPBELL (1961), estudando Eucalyptus regnans observou tanto uma redução do tempo como uma diminuição dos defeitos de secagem.

As temperaturas elevadas no final do processo de secagem, parecem não ter causado degradações ao material. No entanto, a aplicação da vaporização causou uma descoloração (escurecimento) do material (figura 27a), sendo também observado por CAMPBELL (1960), NOCK (1974), ANANIAS (1982) e ROZAS & TOMASELLI (1993). Embora a vaporização tenha causado um escurecimento na madeira, este é superficial, como comprovado através do aplainamento das tábuas (ver figura 27 b), e

portanto, irrelevante sob o ponto de vista prático quando a madeira não apresente nós. Ao redor destes nós permaneceu uma descoloração na madeira, embora, mais clara que a inicial. A formação de manchas na superfície da madeira se deve principalmente ao uso de temperaturas e umidades relativa altas durante a secagem, dependendo do tempo de vaporização e da temperatura do vapor, como exposto por HILDEBRAND, 1970. A descoloração superficial está associada aos extrativos e a água livre na madeira (BRAMHALL & WELLWOOD, 1976), que podem ser extraídos com vapor durante uma pré-vaporização ou durante vaporizações sucessivas por períodos curtos, ou também com água quente (HOLMES & KOZLICK, 1989).

FIGURA 27 - EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NA MADEIRA a) Antes de ser aplainada. b) Depois de ser aplainada.



a)



b)

### 4.3.3 Efeito das vaporizações no teor de umidade da madeira

Na tabela 11 apresenta-se o efeito da vaporização no teor de umidade da madeira. Como pode ser observado nesta tabela, a vaporização inicial reduziu o teor de umidade da madeira verde em 2,4 % para o Programa I e em 3 % para o Programa II, acompanhando a tendência observada por outros pesquisadores. Segundo KOLLMANN & CÔTÊ (1968) e HILDEBRAND (1970) a madeira verde quando vaporizada à pressão atmosférica, perde uma certa quantidade de umidade. Similar diminuição foi reportada por CAMPBELL (1961). NOCK (1974) observou uma diminuição no teor de umidade da madeira previamente vaporizada, atribuindo esta perda de umidade à temperatura do vapor aplicado (100°C) e que a magnitude do efeito depende do teor de umidade inicial, da espessura da madeira, da temperatura do vapor e do tempo de vaporização. CHAFE (1990) concluiu que a pré-vaporização por 30 minutos em madeira de *Eucalyptus regnans*, provoca uma considerável diminuição no teor de umidade inicial da madeira. De acordo com KOLLMANN & CÔTÊ (1968) a umidade inicial da madeira evapora-se sob a influência da temperatura do vapor, quando próximo ao ponto de ebulição da água.

Na segunda vaporização (recuperação do colapso) também houve uma pequena diminuição do teor de umidade da madeira, sendo este de 0,4 % e 1 % para o primeiro e o segundo programa de secagem utilizado respectivamente, contradizendo o observado por outros autores. De acordo com KOLLMANN & CÔTÊ (1968) quando a madeira seca é vaporizada, dependendo do teor de umidade final, absorverá uma pequena quantidade de umidade. Da mesma forma, HILDEBRAND (1970), indica que a vaporização da madeira com um teor de umidade de 16-18% por 4-8 horas, provocará um aumento no teor de umidade da madeira de 2-6%. Da mesma forma, BLUHM & KAUMAN (1965) indicam que durante este tratamento, a umidade da madeira (15-20%) aumenta entre 2 e 4%. Esta diferença se deve provavelmente às dificuldades que o equipamento apresentou para alcançar a temperatura de vaporização

A terceira vaporização, realizada com o objetivo de liberar as tensões de secagem, provocou um pequeno ganho no teor de umidade da madeira (como era esperado), sendo de aproximadamente 1 % para 1 e 2 horas de vaporização. Para 4 horas de vaporização, o ganho no teor de umidade foi de 2 %, para ambos programas de secagem. Tanto HILDEBRAND (1970) e KOLLMANN & CÔTÉ (1968) indicam que durante o tratamento de condicionamento o teor de umidade da madeira aumenta entre 1-2%, o que comprova os resultados obtidos neste estudo

TABELA 11 - VARIAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA ANTES E DEPOIS DE CADA VAPORIZAÇÃO.

CONDIÇÃO	PROGRAMA SECAGEM I (%)			PROGRAMA SECAGEM II (%)		
<i>Vaporização inicial (2 horas)</i>						
Antes	97,6			127,5		
Depois	95,2			124,5		
<i>Vaporização para recuperação do colapso(6-6,5 horas)</i>						
Antes	16,9			17,1		
Depois	16,5			16,1		
<i>Vaporização final (1,2 e 4 horas)</i>						
	<b>1 h</b>	<b>2 h</b>	<b>4 h</b>	<b>1 h</b>	<b>2 h</b>	<b>4 h</b>
Antes	8,1	6,8	7,4	6,8	6,5	6,9
Depois	9,1	8,0	9,4	7,6	7,5	9,0

#### 4.3.4 Gradientes de umidade e tensões de secagem

Na tabela 12 pode-se observar o comportamento do gradiente de umidade, antes e após a aplicação da vaporização final. A variação do teor de umidade antes da vaporização, entre o centro (c) e a superfície (a ou b), foi de 0,5-1,3 % para o primeiro programa de secagem e de 0,8-1,4 % para o segundo programa. Embora esta variação de umidade seja pequena, as tábuas apresentaram altas tensões de secagem no final do processo para ambos programas aplicados, como pode ser visto na figura 28. De acordo com Mc MILLEN (1955) citado por GALVÃO & JANKOWSKY (1985) mesmo depois de atingida uma umidade uniforme ao longo da peça de madeira no final da secagem, esta provoca deformações permanentes na madeira, devido a esforços de tração e compressão acima do limite de proporcionalidade da madeira. De acordo com KOLLMANN & CÔTÈ (1968) quanto menor seja o teor de umidade final da madeira menor será o gradiente de umidade entre a superfície e o centro da peça, no final do processo de secagem

Depois das tábuas serem vaporizadas, a variação da umidade entre o centro e a superfície foi de 0,6 % para os tempos de 2 e 4 horas e de 0,7 % para 1 hora, correspondente ao primeiro programa de secagem. Para o segundo programa, foi de 0,8, 0,5 e 0,2 % para os tempos de 1, 2 e 4 horas, respectivamente. Esta variação no gradiente de umidade da madeira indica que a superfície absorveu aproximadamente 1,6% para 1 e 2 horas e 2,5% para 4 horas, variação válida para os dois programas de secagem. Conclui-se, portanto, que o vapor aplicado no final do processo de secagem, além de liberar as tensões de secagem, também tem seu efeito sobre o gradiente de umidade da madeira

TABELA 12 - GRADIENTE DE UMIDADE ANTES (A) E DEPOIS (D) DA VAPORIZAÇÃO FINAL.

TEMPO (horas)	PROGRAMA SECAGEM I (%)				PROGRAMA SECAGEM II (%)				
	a	b	c	md	a	b	c	md	
1	A	6,9	7,5	7,0	0,6	6,5	7,2	6,4	0,8
	D	8,7	7,8	8,6	-0,6	7,9	7,1	7,8	-0,8
2	A	6,8	7,6	6,9	0,8	6,3	7,2	6,2	1,0
	D	8,5	8,0	8,6	-0,6	7,9	7,4	7,9	-0,5
4	A	7,3	8,4	7,2	1,3	6,5	7,9	6,5	1,4
	D	9,6	9,1	9,8	-0,7	9,0	8,9	9,1	-0,1

**a e b** : Superfície do corpo de prova.

**c** : Centro do corpo de prova.

**md** : Maior diferença entre o centro (c) e a superfície (a ou b)

FIGURA 28 - TENSÕES INTERNAS EM MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* NO FINAL DO PROCESSO DE SECAGEM.(AVALIAÇÃO APÓS 24 HORAS).



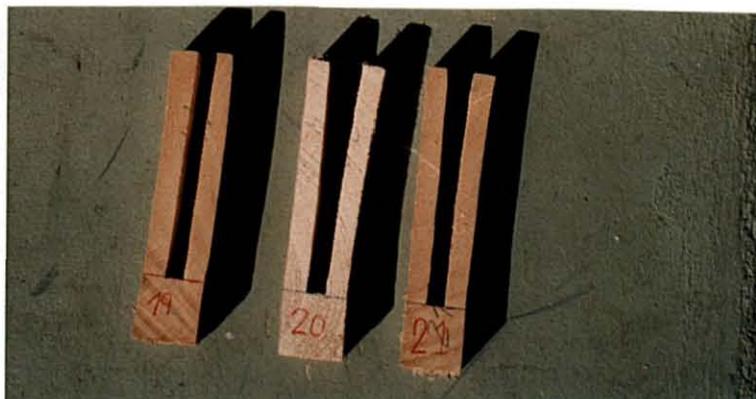
A presença das tensões de secagem foram determinadas através do Teste de garfo, que possibilita avaliar a existência e distribuição das tensões numa peça de madeira. Estas tensões de secagem podem ser identificadas (figura 28) pela inclinação dos extremos dos garfos, para o centro dos mesmos, chegando na maioria dos casos a juntar-se, indicando com isto a presença de altas tensões de secagem no final do processo. Inclinação que indica que as peças de madeira encontravam-se sob compressão na superfície e sob tração no interior (SKAAR, 1972, STAMM, 1964, VILLIERE, 1966). Nesta etapa da secagem WRIGHT (1961) recomenda um tratamento de vaporização para a liberação das tensões de secagem e uniformizar o teor de umidade.

A liberação das tensões de secagem, após o tratamento de vaporização, apode ser observada nas figuras 29 e 30, para ambos os programa de secagem. Como se observa na figura 30, os garfo permaneceram retos, indicando que o tratamento de vaporização liberou em grande parte as tensões de secagem, nos três tempo aplicados ( 1, 2 e 4 horas), em ambos programas de secagem, sendo que a figura 29a , a figura 29b e a figura 29c representam os tempos de 1 hora, 2 horas e 4 horas de vaporização respectivamente.

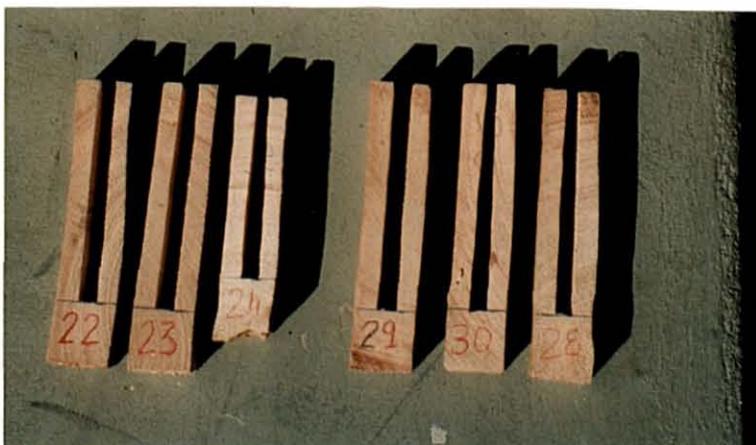
De forma a corroborar o teste do garfo, aplicou-se uma outra avaliação prática para identificar a presença ou ausência das tensões de secagem, apresentada na figura 31, onde foram utilizadas três tábuas escolhidas ao acaso, correspondendo cada tábuas a um dos tempos de vaporização aplicados. Verifica-se nesta figura, que as tábuas não sofreram qualquer tipo de empenamento, nem mesmo o usual encanoamento, o que indica que a madeira está livre de tensões e pode ser utilizada para qualquer fim que exija um re-dimensionamento da peça, uma vez que se uma tábuas fosse dividida na sua espessura em duas peças mais finas, estas sofrerão o empenamento denominado encanoamento (KOLLMANN & CÔTÉ, 1968).

FIGURA 29 - LIBERAÇÃO DAS TENSÕES INTERNAS EM MADEIRA DE Eucalyptus Grandis, APÓS VAPORIZAÇÃO POR a) 1 hora b) 2 horas c) 4 horas (AVALIAÇÃO APÓS 24 HORAS).

a)



b)



c)

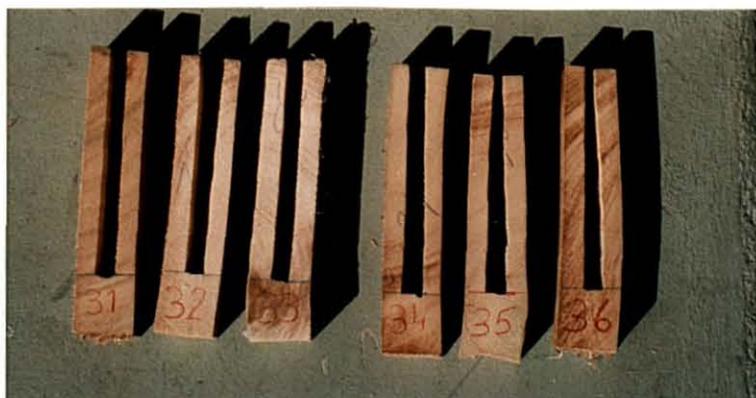
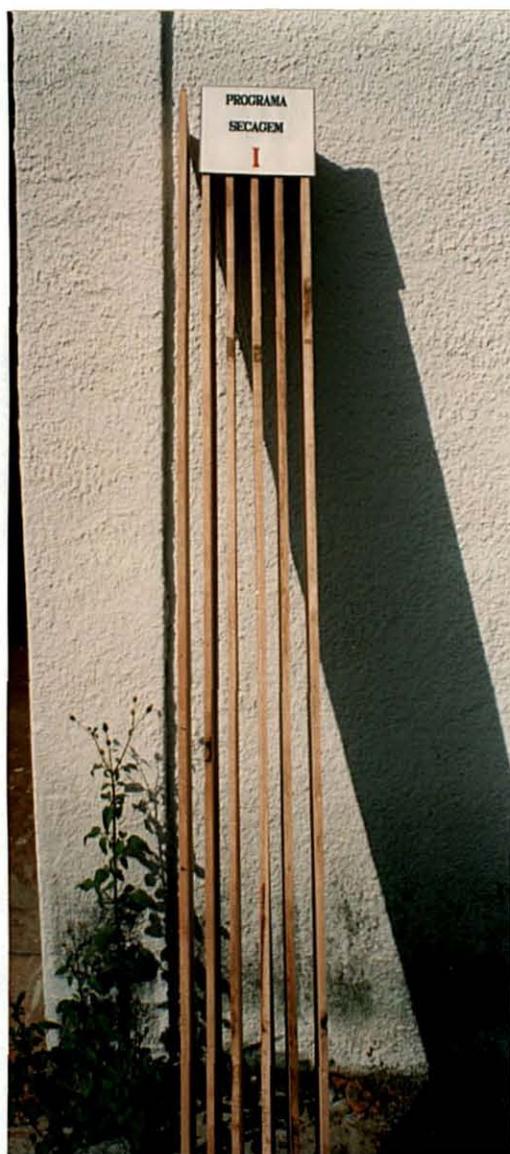


FIGURA 30 - AVALIAÇÃO VISUAL DAS TENSÕES DE SECAGEM EM TÁBUAS DE MADEIRA DE EUCALYPTUS GRANDIS RE-SERRADAS NA ESPESSURA DA PEÇA. ( AVALIAÇÃO APÓS 24 HORAS).

a) Programa I

b) Programa II



(a)



(b)

A presença das tensões de secagem apresentadas neste estudo ou também denominadas de endurecimento superficial (casehardening), não é necessariamente uma desvantagem para o uso da madeira, principalmente se ela será utilizada em construções, onde não precisa ser re-dimensionada. No entanto, sérios problemas aparecerão na madeira, caso seja necessário seu re-dimensionamento ou remoção de mais material de um lado que do outro. Isto provocará um desequilíbrio das tensões de secagem, podendo resultar em empenamentos, usualmente encanoamento, (BRAMHALL & WELLWOOD, 1976). Portanto, a liberação das tensões de secagem é necessária, quando a madeira precisa ser redimensionada, principalmente na indústria moveleira. De acordo com KAUMAN (1982), a liberação das tensões de secagem é uma operação indispensável.

A vaporização final liberou praticamente todas as tensões de secagem na madeira nos três tempos aplicados (1, 2 e 4 horas). Esta liberação pode ser atribuída em parte ao moderado processo de secagem utilizado (secagem por várias semanas), onde não houve a formação de altos gradientes de umidade, que permitissem criar elevadas retrações e conseqüentemente altas tensões de secagem, a tal ponto de gerar fendas ou rachaduras, tanto na superfície da madeira como nos topos desta, pois, a formação de altos gradientes de umidade entre a superfície e o centro da peça dão origem, a altas tensões de secagem (BRAMHALL et alli, 1978), e se estas tensões forem maiores que a resistência da madeira, esta rachará (INZUNZA & JUACIDA, 1987; VILLIERE, 1966; SKAAR, 1972). No entanto, a principal razão da liberação das tensões de secagem pode ser atribuída à alta temperatura e umidade relativa aplicada no processo de vaporização final. Esta temperatura (100°C) torna à madeira mais plástica em um menor tempo, de que se fosse realizada a liberação das tensões de secagem com o método tradicional. No método tradicional se mantém a temperatura mais alta utilizada no processo de secagem (neste estudo, de 80°C), e ajustar a umidade de equilíbrio a valores 4% acima do teor de umidade final desejado. O tempo de condicionamento pode durar de 4 a 48 horas, dependendo da espécie, espessura das tábuas e temperatura utilizada (RASMUSSEN, 1961). Além, de ser liberadas praticamente todas as tensões de secagem com os três

tempos de vaporização aplicados (1, 2 e 4 horas) na madeira de Eucalyptus grandis de 30 mm de espessura, este tratamento permite diminuir consideravelmente o tempo de operação, em relação ao método tradicional.

Conclui-se portanto, que é fatível liberar as tensões de secagem com vapor a uma temperatura de 100°C. Como foi possível liberar quase totalmente estas tensões com os três tempos aplicados (1, 2 e 4 horas), recomenda-se utilizar o menor tempo de vaporização (1 hora), por representar um menor consumo de energia e portanto, um menor custo de secagem para a indústria.

#### 43.5 Testes piloto de utilização

Para uma avaliação preliminar do comportamento da madeira de Eucalyptus grandis na fabricação de produtos de maior valor agregado, que envolve operações de lixamento, aplainamento e usinagem em geral, foi realizado um teste piloto. Para este teste selecionou-se madeira seca de 25 mm de espessura e 130 mm de largura previamente aplainadas, do estudo de secagem realizado, tendo sido definido que seria construído uma escrivaninha de madeira maciça e algumas peças de pequeno porte (ver figura 31). As dimensões da escrivaninha foram 70 cm de largura, 125 cm de comprimento e 76 cm de altura. Para a obtenção de peças de maior dimensão, (tampos, laterais, etc.) foram produzidos painéis de colado lateral (edge glue).

Os resultados obtidos indicam que a madeira de Eucalyptus grandis não apresentou dificuldades de torneamento, aplainamento, lixamento e polimento, apresentou também uma boa fixação mecânica e uma excelente colagem. A madeira não apresenta grã reversa, sendo macia e clara. No entanto, as tábuas apresentaram uma grande quantidade de nós, diminuindo em aproximadamente 50% o seu aproveitamento para o móvel.

As observações realizadas em uso, por um período de 10 meses indicaram que a madeira de Eucalyptus grandis, quando adequadamente seca e preparada é estável. Isto confirma os testes realizados no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São

Paulo S.A. (IPT), que vem pesquisando com maior interesse a utilização da madeira de eucalipto desde 1978. No ano de 1980 o IPT fabricou alguns móveis a título experimental, utilizando nesta época três espécies de eucaliptos: Eucalyptus grandis, Eucalyptus urophylla e Eucalyptus saligna, e os resultados obtidos foram satisfatórios. O acompanhamento posterior permitiu verificar que os móveis de Eucalyptus grandis até o presente não mostraram delaminação (descolamento). O Eucalyptus saligna apresentou pouca delaminação, enquanto, que o Eucalyptus urophylla apresentou uma delaminação intensa (EUCALIPTO....., 1992).

FIGURA 31 - ESCRIVANINHA EM MADEIRA DE Eucalyptus grandis.



O pouco aproveitamento da madeira de eucalipto no Brasil, possivelmente se deva, em parte, à desinformação que existe sobre como utilizar esta madeira e, por outro lado, às características desfavoráveis da madeira, tais como elevada retratibilidade, propensão ao colapso durante a secagem, e devido principalmente as tensões de crescimento. No entanto, apesar dos problemas intrínsecos da espécie, esta madeira pode ser perfeitamente utilizada sem maiores problemas, sempre e quando se considerem as suas limitações. Assim, se obterá o máximo aproveitamento das toras durante o desdobro, e uma diminuição dos defeitos de secagem, especificamente do colapso.

Desta forma, conclui-se que esta madeira pode ser utilizada na produção de produtos de maior valor agregado, podendo, num futuro próximo ser melhor aproveitada pelo setor moveleiro.

A grande variedade de espécies plantadas no Brasil permitirá realizar uma seleção das mais adequadas para um determinado uso, uma vez que o gênero Eucalyptus apresenta diferenças na sua densidade a nível de espécie possibilitando, desta forma, grandes alternativas de utilização, ao contrário do gênero Pinus que não apresenta grande variedade na sua densidade e portanto limitando a sua utilização.

Por outro lado, a utilização da madeira de Eucalyptus permitirá diminuir a possibilidade de continuar importando espécies do Paraguai como é o caso, embora restrito, da peroba, cedro, marfim, entre outras (EUCALIPTO....., 1992).

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos neste estudo indicam que::

a.- O tratamento de anelamento com motosserra realizado a uma profundidade de aproximadamente  $1/3$  do raio e a uma distância de 20 cm do topo, evitou a formação de rachaduras de topo, tanto durante a derrubada da árvore como na posterior confecção dos toretes.

b.- O tratamento de anelamento com motosserra, reduz sensivelmente a propagação das rachaduras nos topos das toras provocadas pelo tratamento de aquecimento (vaporização), a uma temperatura de  $90^{\circ}\text{C}$  por 18 e 36 horas.

Recomenda-se, portanto, realizar o tratamento de anelamento com motosserra, por ter um efeito positivo sobre a liberação das tensões de crescimento e principalmente para dificultar a propagação das rachaduras nos topos das toras durante o aquecimento (se forem aquecidas). Recomenda-se também utilizar o maior comprimento de tora possível, de tal forma a diminuir o volume afetado.

c.- Confirmou-se neste estudo que o tratamento de aquecimento (vaporização) das toras previamente aneladas, foi efetivo na liberação das tensões de crescimento, sendo confirmada esta liberação durante o desdobro das toras, já que as tábuas não apresentaram rachaduras ou qualquer tipo de empenamento durante o processamento mecânico das toras, sendo estes defeitos comuns em madeira com altas tensões de crescimento.

Pela grande importância econômica que representa a liberação das tensões de crescimento, recomenda-se utilizar o tratamento de aquecimento para melhorar a qualidade da madeira serrada, uma vez que este tratamento provoca uma diminuição das rachaduras e empenamentos durante o desdobro, resultando num maior aproveitamento

da matéria prima durante o seu processamento . Para a liberação das tensões de crescimento recomenda-se, utilizar o menor tempo de vaporização (18 horas), por representar menor tempo de operação e um menor custo de energia e, conseqüentemente diminuição dos custo.

d.- Os dois programas de secagem aplicados permitiram secar em câmara madeira serrada de Eucalyptus grandis de 30 mm de espessura, desde verde até um teor de umidade final de aproximadamente 7% (sem considerar a vaporização final), num tempo de secagem razoavelmente curto para a espécie (25,6 dias para o Programa I e de 36 dias para Programa II). Os ganhos obtidos em termos de velocidade de secagem, tanto podem ser atribuídos à vaporização inicial (fato comprovado por outros autores), como às elevadas temperaturas aplicadas no período final da secagem. Portanto recomenda-se realizar uma vaporização inicial na madeira de tal forma a aumentar a velocidade de secagem.

Além do período relativamente curto de secagem, a madeira apresentou poucos defeitos, sendo estes em ordem de importância: encanoamento, colapso e rachaduras. Embora estes defeitos tenham sido registrados nos dois programas de secagem aplicados, foi possível obter 94% ,em número de tábuas, de madeira aproveitável, (útil).

e.- O segundo programa de secagem apresentou um menor porcentagem de colapso (36,1%), provavelmente devido à menor temperatura de secagem utilizada, não superior a 40°C. A temperatura inicial de secagem em madeiras propensas ao colapso é de extrema importância na diminuição deste defeito, uma vez que altas temperaturas de secagem provocam uma degradação térmica do material e conseqüentemente um aumento no colapso. Portanto, recomenda-se não utilizar uma temperatura inicial de secagem superior a 40°C ou utilizar o Programa I por ser este que apresentou uma menor quantidades de defeitos.

f.- As temperaturas aplicadas de 70 e 80°C no final do processo de secagem, em teores de umidade de 15 e 10% respectivamente, parecem não ter causado degradações ou empenamentos ao material, concluindo-se, portanto, que é possível utilizar temperaturas relativamente altas nos estágios finais da secagem, sem que estas causem defeitos. Recomenda-se utilizar temperaturas superiores nos estágios finais da secagem e também estudar qual seria o melhor teor de umidade para começar a aplicar temperaturas mais elevadas durante o processo de secagem, de tal forma a diminuir ainda mais o tempo de secagem da madeira de Eucalyptus grandis.

g.- As tensões de secagem nas tábuas podem ser liberadas aplicando um tratamento de vaporização com temperaturas de aproximadamente 100°C e 100% de umidade relativa durante um período de 1, 2 e 4 horas. Como com os três tempos de vaporização aplicados foi possível liberar as tensões de secagem da madeira de Eucalyptus grandis de 30 mm, recomenda-se utilizar o menor tempo (1 hora) por representar um menor consumo de energia e portanto um menor custo de secagem.

h.- A madeira de Eucalyptus grandis apresenta-se como uma grande opção de matéria-prima tanto para madeira serrada como para a fabricação de móveis ou de qualquer tipo de produto de maior valor agregado, sendo portanto, recomendado seu emprego para esses fins.

Recomenda-se também manejar as florestas que serão destinadas a serraria e movelaria, realizando principalmente podas. Uma considerável quantidade de madeira foi rejeitada por apresentar uma grande quantidade de nós ( não superiores a 2 cm de diâmetro). Devem ser desenvolvidos programas de melhoramento genético com vistas principalmente à redução das tensões de crescimento, o que permitirá obter um maior aproveitamento da matéria-prima, possibilitando assim sua utilização em grande escala como madeira serrada, laminados, móveis, vigas laminadas, e produtos de maior valor agregado.

**ANEXOS**

**ANÁLISE ESTATÍSTICA**

TABELA A1: ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA VARIÁVEL ABERTURA MÉDIA DA TÁBUA COM RESPEITO À TORÁ.

Causa da Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F Calculado
TEMPO	1	0,2552	1,9517
Resíduo (A)	10	0,1308	
Parcelas	11		
TORETES	1	1,8349	22,9152
TEM x TOR	1	0,0122	0,1526
Resíduo (B)	10	0,8007	
Subparcelas	23		
EXTREMO	1	50,1496	475,6784
TEM x EXT	1	0,2555	2,4211
TOR x EXT	1	1,8348	17,4039
TEM x TOR x EXT	1	0,0122	0,1159
Resíduo (C)	20	0,1054	
TOTAL	47		

Média Geral = 1,0221

COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (A) = 17,690 %      A : TEMPO

COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (B) = 19,575 %      B : ÁRVORE

COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (C) = 31,766 %      C : TORETE

TOR : Torete, TEM : Temperatura

EXT : Extremo

TABELA A2: ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA VARIÁVEL COMPRIMENTO DE RACHADURA MÉDIA DA TÁBUA.

Causa da Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F Calculado
TEMPO	1	33,4677	0,7049
Resíduo (A)	10	1,3078	
Parcelas	11		
TORETES	1	768,3333	16,1835
TEM x TOR	1	33,4677	0,1526
Resíduo (B)	10	47,4763	
Subparcelas	23		
EXTREMO	1	229,0924	4,2768
TEM x EXT	1	13,2387	0,2471
TOR x EXT	1	229,0924	4,2768
TEM x TOR x EXT	1	13,2387	0,2471
Resíduo (C)	20	53,5658	
TOTAL	47		

Média Geral = 4,0087

COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (A) = 86,110 %      A : TEMPO

COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (B) = 121,778 %      B : ÁRVORE

COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (C) = 182,932 %      C : TORETE

TOR : Torete, TEM : Temperatura

EXT : Extremo

TABELA A3: ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA VARIÁVEL LARGURA DE RACHADURA MÉDIA DA TÁBUA.

Causa da Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F Calculado
TEMPO	1	0,0000081	0,0003
Resíduo (A)	10	0,0266	
Parcelas 11			
TORETES	1	0,3300	12,4050
TEM x TOR	1	0,0000081	0,0003
Resíduo (B)	10	0,0266	
Subparcelas 23			
EXTREMO	1	229,0924	4,2768
TEM x EXT	1	13,2387	0,2471
TOR x EXT	1	229,0924	4,2768
TEM x TOR x EXT	1	13,2387	0,2471
Resíduo (C)	20	53,5658	
TOTAL	47		

Média Geral = 0,0829

COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (A) = 98,354 %      A : TEMPO

COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (B) = 139,094 %      B : ÁRVORE

COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (C) = 207,690 %      C : TORETE

TOR : Torete    TEM : Temperatura

EXT : Extremo

TABELA A4: TESTE DE TUKEY PARA A VARIÁVEL ABERTURA DA TÁBUA EM RELAÇÃO À TORA. MÉDIAS DE TEMPO (18 E 36 HORAS) ENTRE TESTEMUNHAS.

Nome	Número de Repetições	Médias (cm)	5% *	1%
Testemunha-18	12	1,2746	a	A
Testemunha-36	12	1,1607	a	A

TABELA A5: TESTE DE TUKEY PARA A VARIÁVEL ABERTURA DA TÁBUA EM RELAÇÃO À TORA. MÉDIAS DE TEMPO (18 E 36 HORAS) ENTRE VAPORIZADAS.

Nome	Número de Repetições	Médias (cm)	5% *	1%
Vaporizadas-18	12	0,9155	a	A
Vaporizadas-36	12	0,7377	a	A

TABELA A6: TESTE DE TUKEY PARA A VARIÁVEL ABERTURA DA TÁBUA EM RELAÇÃO À TORA. MÉDIAS DE TEMPO PARA 18 HORAS.

Nome	Número de Repetições	Médias (cm)	5% *	1%
Testemunha-18	12	1,2746	a	A
Testemunha-36	12	0,9155	b	A

\* Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado

TABELA A7: TESTE DE TUKEY PARA A VARIÁVEL ABERTURA DA TÁBUA EM RELAÇÃO À TORA. MÉDIAS DE TEMPO PARA 36 HORAS.

Nome	Número de Repetições	Médias (cm)	5% *	1%
Testemunha-36	12	1,1607	a	A
Vaporizada-36	12	0,7377	a	A

TABELA A8: TESTE DE TUKEY PARA A VARIÁVEL ABERTURA DA TÁBUA EM RELAÇÃO À TORA. MÉDIAS DE TEMPO (18 E 36 HORAS) ENTRE VAPORIZADAS NA ENTRADA DA SERRA.

Nome	Número de Repetições	Médias (cm)	5% *	1%
Vaporizada-18	12	2,1901	a	A
Vaporizada-36	12	1,8984	b	A

TABELA A9: TESTE DE TUKEY PARA A VARIÁVEL ABERTURA DA TÁBUA EM RELAÇÃO À TORA. MÉDIAS DE TEMPO (18 E 36 HORAS) ENTRE VAPORIZADAS NA SAÍDA DA SERRA.

Nome	Número de Repetições	Médias (cm)	5% *	1%
Vaporizada-18	12	0,0000	a	A
Vaporizada-36	12	0,0000	a	A

\* Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado

TABELA A10: TESTE DE TUKEY PARA A VARIÁVEL COMPRIMENTO DE RACHADURA DA TÁBUA. MÉDIAS DE TEMPO (18 E 36 HORAS) ENTRE TESTEMUNHAS.

Nome	Número de Repetições	Médias (cm)	5% *	1%
Testemunha-18	12	9,9717	a	A
Testemunha-36	12	6,3317	a	A

TABELA A11: TESTE DE TUKEY PARA A VARIÁVEL COMPRIMENTO DE FECHADURA DA TÁBUA. MÉDIAS DE TEMPO (18 E 36 HORAS) ENTRE VAPORIZADAS.

Nome	Número de Repetições	Médias (cm)	5% *	1%
Vaporizada-18	12	0,0000	a	A
Vaporizada-36	12	0,0000	a	A

TABELA A12: TESTE DE TUKEY PARA A VARIÁVEL COMPRIMENTO DE RACHADURA DA TÁBUA. MÉDIAS DE TEMPO PARA 18 HORAS.

Nome	Número de Repetições	Médias (cm)	5% *	1%
Testemunha-18	12	6,3317	a	A
Vaporizada-36	12	0,0000	b	A

\* Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado

TABELA A13: TESTE DE TUKEY PARA A VARIÁVEL COMPRIMENTO DE RACHADURA DA TÁBUA. MÉDIAS DE TEMPO PARA 36 HORAS.

Nome	Número de Repetições	Médias (cm)	5% *	1%
Testemunha-18	12	9,6717	a	A
Vaporizada-36	12	0,0000	b	A

TABELA A14: TESTE DE TUKEY PARA A VARIÁVEL COMPRIMENTO DE RACHADURA DA TÁBUA. MÉDIAS DE TEMPO (18 E 36 HORAS) ENTRE VAPORIZADAS NA ENTRADA DA SERRA.

Nome	Número de Repetições	Médias (cm)	5% *	1%
Vaporizada-18	12	0,0000	a	A
Vaporizada-36	12	0,0000	a	A

TABELA A15: TESTE DE TUKEY PARA A VARIÁVEL COMPRIMENTO DE RACHADURA DA TÁBUA. MÉDIAS DE TEMPO (18 E 36 HORAS) ENTRE VAPORIZADAS NA SAÍDA DA SERRA.

Nome	Número de Repetições	Médias (cm)	5% *	1%
Vaporizada-18	12	0,0000	a	A
Vaporizada-36	12	0,0000	a	A

\* Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado

TABELA A16: TESTE DE TUKEY PARA A VARIÁVEL LARGURA DE RACHADURA DA TÁBUA. MÉDIAS DE TEMPO (18 E 36 HORAS) ENTRE TESTEMUNHAS.

Nome	Número de Repetições	Médias (cm)	5% *	1%
Testemunha-18	12	0,1666	a	A
Testemunha-36	12	0,1650	a	A

TABELA A17: TESTE DE TUKEY PARA A VARIÁVEL LARGURA DE RACHADURA DA TÁBUA. MÉDIAS DE TEMPO (18 E 36 HORAS) ENTRE TESTEMUNHAS.

Nome	Número de Repetições	Médias (cm)	5% *	1%
Vaporizada-18	12	0,0000	a	A
Vaporizada-36	12	0,0000	a	A

TABELA A18: TESTE DE TUKEY PARA A VARIÁVEL LARGURA DE RACHADURA DA TÁBUA. MÉDIAS DE TEMPO PARA 18 HORAS.

Nome	Número de Repetições	Médias (cm)	5% *	1%
Testemunha-18	12	0,1650	a	A
Vaporizada-36	12	0,0000	b	A

\* Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado

TABELA A19: TESTE DE TUKEY PARA A VARIÁVEL LARGURA DE RACHADURA DA TÁBUA. MÉDIAS DE TEMPO PARA 36 HORAS.

Nome	Número de Repetições	Médias (cm)	5% *	1%
Testemunha-18	12	0,1666	a	A
Vaporizada-36	12	0,0000	b	A

TABELA A20: TESTE TUKEY PARA A VARIÁVEL LARGURA DE RACHADURA DA TÁBUA. MÉDIAS DE TEMPO (18 E 36 HORAS) ENTRE VAPORIZADAS NA ENTRADA E SAÍDA DA SERRA.

Nome	Número de Repetições	Médias (cm)	5% *	1%
Vaporizada-18	12	0,0000	a	A
Vaporizada-36	12	0,0000	a	A

\* Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 AGUIAR, O. J.R. Métodos para controle das rachaduras de topo para toras de Eucalyptus grandis Hill ex Maiden. visando a produção de lâminas para desenrolamento. Piracicaba, 1986. Tese (Mestrado em Engenharia Florestal) Universidade de São Paulo.
- 2 ALEXIOU, P. N.; WILKINS, A. P.; HARTLEY, J. Effect of presteaming on drying rate. Wood anatomy and shrinkage of regrowth Eucalyptus pilularis Sm. **Wood Sci. Technol.**, New York. v.24, p. 103-110, 1990.
- 3 ANANIAS, R. Secado artificial de Eucalyptus globulus para parquet tipo mosaico. Concepción, Chile, 1982. (Seminario de Titulación)., Depto. Ingeniería en Maderas, Universidad del Bio-Bío.
- 4 BARNACLE, J. E.; GOTTSTEIN, J. W. Control of End-splitting in round timber :A promising new method. **Technical Notes**. F.P. CSIRO, Melbourne, n. 4, p. 8, 1968.
- 5 BARNES, H. M. Treatment of peeler cores with water distersible preservative formulations. **Wood Fiber Sci.**, Madison, v.18, p. 397-412, 1986.
- 6 BEAUREGARD, R.; BEAUDOIN, M.; FORTIN, Y.; SAMSON, M. Evaluating warp from three sawing processes including saw-dry-rip to produce aspen structural lumber. **For. Prod. J.**, Madison, v.42, n.6, p. 61-64, 1992.
- 7 BRAMHALL, G.; WELLWOOD, R. W. Kiln drying of western Canadian lumber. **Information Report, VP-X**, Vancouver, n.156, p.1-111, 1976.
- 8 BRAMHALL, G.; MACKAY, J.F.G.; SALOMON, M. Kiln drying of timber: Fifteen questions and answers. **Information Report VP-X**, Vancouver, British Columbia, n. 161, p. 1-17, 1978.
- 9 BRASIL, M. A.M.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica da madeira de Eucalyptus saligna Sm., Eucalytus alba Reinw e Eucalyptus grandis Hill ex Maiden aos 5 anos de idade, em função do local e do espaçamento. **IPEF**, Piracicaba, n. 2/3, p. 129-49, 1971.
- 10 BRASIL, M.; M.A.M.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica e das características das fibras em Eucalyptus grandis Hill ex Maiden ao nível do DAP. **IPEF**, Piracicaba, n. 4, p. 81-90, 1972.
- 11 BRASIL, M.; VEIGA, R.A.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica nas seccões transversais do caule da base do tronco para a copa de eucalipto. **IPEF**, Piracicaba, n. 15, p. 73-82, 1977.

- 12 BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O.; MIGLIORINI, A. J. Estudo da variação longitudinal da densidade básica de *Eucalyptus* spp. **Silvicultura**, São Paulo, n. 28, p. 726-31, 1983.
- 13 BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I. Densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. **IPEF**, Piracicaba, n. 14, p. 9-20, 1977.
- 14 BLUHM, E.; KAUMAN, W. G. El colapso en la madera y su reacondicionamiento. **Informe Técnico. Instituto Forestal**, Santiago, Chile, n.22, p. 1-23, 1965.
- 15 BOYD, J. D. The Growth Stresses: 5 - Evidence of an Origin in Differentiation and Lignification. **Wood Sci. Technol.**, New York, v. 6, p. 251-262, 1972.
- 16 WRIGHT, G. W. **Brief notes on moisture gradient, Drying Stress and Movement on Re-cutting.**, Australia: **For. Prod. Lab.**, 1961. 5 p.
- 17 BROWN, H. P.; PANSIN, A. J.; FORSAITH, C. C. Wood in Relation to Moisture. In: **Textbook of Wood Technology**. New York: McGraw-Hill, v.2, Cap. 3, p. 61-98, 1952.
- 18 BROWN, N. C.; BETHEL, J. S. El Secado de la Madera. In: **La Industria Maderera**. México: Limusa, 1975. Cap. 6, p. 179-234.
- 19 CAMPBELL, G. S. Presteamng cuts drying time of "Ash" Eucalypts. **Forest Products Newsletter**, South melbourne, n. 263, p.1-2, 1960.
- 20 CAMPBELL, G. S. The value of presteaming for drying some collapse susceptible eucalypts. **For. Prod. J.**, Madison, v. 9, p.343-347, 1961.
- 21 CECH, M. Y.; PFAFF, F. **Kiln Operators Manual of Eastern Canada**. Ontario: Eastern For. Prod. Lab., 1977. 189 p.
- 20 CHAFE, S. C. Growth Stresses in Trees. **Australian Forest Research**, Melbourne, v. 9, p.203-233, 1979.
- 21 CHAFE, S. C. Effect of brief presteaming on shrinkage, collapse and other wood-water relationships in *Eucalyptus regnans* F. Muell. **Wood Sci. Technol.**, New York, v. 24, p.311-326, 1990.
- 22 CHAFE, S. C. Variation in longitudinal growth stress, basic density and modulus of elasticity with height in the tree. **Australian Forest Research**, Melbourne, v. 11, n. 1, p. 79-82, 1981.

- 23 CHARDIN, A.; SALES, C. Species developing a high level of growth stresses: A method of measure and its possible use to study the consequence on wood quality. Proceedings IUFRO, Madison, Wisconsin. 1983.
- 24 CHEN, P.Y.S. The effect of steaming time and temperature on the longitudinal permeability of black walnut heartwood. **Wood Fiber**, Lawrence, Kans., v. 11, p. 218-227, 1975.
- 25 CHOONG, E.T.; TESORO, F.O. Relationship of capillary pressure and water saturation in wood. **Wood Sci. Technol**, New York, v. 23, p. 139-150, 1989.
- 26 CONCANNON, A. Eucalypt - An added value species in New Zealand. **Australian Forest Industries J.**, Sydney, n. 4, p. 60-63 p, 1982.
- 27 CONRADIE, W.E. Utilization of South African Grown *E. grandis* (W.Hill ex-Maiden) as veneer Log: Part 1 - Control of end-splitting in veneer logs. Pretoria: National Timber Research Institute, 1980. 14 p.
- 28 CUTTER, B.E.; PHELPS, J.E. High-pressure steam drying: Effects on permeability. **For.Prod.J.**, Madison, n. 36, p. 19-20, 1986.
- 29 De VILLIERS, A.M. Utilization problems with some eucalypts in South Africa. In: IUFRO-5 meeting (1973: Cape Town, RSA). **Proceedings**. Republic of South Africa, 1973. v. 2, p. 238-255, 1973.
- 30 DINWOODIE, J.M. Growth Stresses in Timber. A Review of Literatura. **Forestry**, London, v. 39, n. 2, p. 162-70, 1966.
- 31 EDWARDS, D.W. Defects in fast-grown Eucalypts in New South Wales, Australia. In: IUFRO-5 meeting (1973: Cope Town, RSA). **Proceedings**. Republic of South Africa, 1973. v. 2, p. 256-270.
- 32 ELLWOOD, E.L.; ERICKSON, R.W. Effect of presteaming on seasoning stain and drying rate in redwood. **For.Prod.J.**, Madison, v. 12, p. 328-332, 1962.
- 33 FERREIRA, M. Variação da densidade básica da madeira de povoamentos comerciais de *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden nas idades de 11, 12, 13, 14, e 16 anos. **IPEF**, Piracicaba, n. 4, p. 65-89, 1972.
- 34 FERREIRA, M. M; KAGEYAMA, P.Y. Melhoramento genético da densidade da madeira de eucalipto. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO (3.: 1978: Manaus). **Anais São Paulo: SBS**, v.2, 1978. p.148-152.
- 35 **DRY Kiln Operator's Manual**. Madison: USDA. Forest Serv., 1988. (Revision of the Agri. Handb.; N°188).

- 36 GALVÃO, A.P.M.; JANKOWSKY, I.P. **Secagem Racional da Madeira**. São Paulo: Nobel, 1985. 111 p.
- 37 GALVÃO, A.P.M. Secagem acelerada: Programa para a madeira de jatobá (*Hymenacea stilbocarpa* Hayne) IPEF, Piracicaba, v. 12, n. 6, p. 151-161, 1976.
- 38 GIORDANO, F.G.; CURRO, P.; GHIOSI, G.R. Contribution of the Study of Internal Stresses in Wood of *Eucalypts* **Wood Sci. Technol.**, New York, v. 3, p. 13, 1969.
- 39 GIORDANO, F.G.; CURRO, P. Internal stresses in trees, logs and sawn timber. **Bois et Forêts des Tropiques**, Nogent-Sur-Marne, França, n.145, p. 39-48, 1972.
- 40 GIORDANO, F.G.; CURRO, P. Observations concerning unusual methods for reducing damage from growth stresses in eucalyptus sawn timber. In: IUFRO-5 Meeting (1973 Cope Town, RSA). **Proceedings**. Republic of South Africa, 1973. v.2, p. 322-325.
- 41 HASLETT, A.N.; KININMOMTH, J.A. Pretreatments to hasten the drying of *Nothofagus fusca*. **New Zealand J. Forest Sci.** v. 16, n. 2, p. 237-246, 1986.
- 42 HILDEBRAND, R. **Kiln drying of saw timber**. Germany, R.H.: Maschinenbau GmbH, 1970. 198 p.
- 43 HILLIS, W. E. Wood Quality and Utilization. In: HILLIS, W.E.; BROWN, A.G. **Eucalypts for Wood Production**. Adelaide, Australia: Griffin, 1978. p. 259-289.
- 44 HOLMES, S.; KOZLIK, C. Collapse and moisture distribution in presteamed and kiln-dried incense-cedar squares. **For. Prod. J.**, Madison, v. 39, n. 2, p. 14-16, 1989.
- 45 INZUNZA, L.; JUACIDA, R.P. **Curso de Capacitación: Secado de Madera Aserrada**. [S.l.: s.n.], 1987. p. 46.
- 46 JACOBS, M. R. Stresses and Strains in Tree Trunks as they Grow in Length and Width. **Leaflet**. Forestry and Timber Bureau, Canberra Australia n. 96, p. 1-15, 1965.
- 47 KAUMAN, W.G. Collapse in some Eucalypts after treatment in inorganic salt solutions **For. Prod. J.**, Madison, v. 10, n. 9, p. 463-467, 1960.
- 48 KAUMAN, W.G. W. G. **Cell Collapse in wood**. South Melbourne: CSIRO, Division of Forest Products, 1964. 63 p. (Reprint n 566).

- 49 KAUMAN, W. G. W. G. Regrowth tropical hardwoods and their improved utilization. Proceedings IUFRO Meeting, (2):128-114, 1982.
- 50 KEINERT Jr., S.; ZACAL, D. A. G.; INTERAMNENSE, M. T. **Laminação, Produção e Testes de Compensados a Partir de Eucalyptus viminalis (LABILL)**. 1992. (não publicado).
- 51 KOLLMANN, F. F. P. **Tecnologia de la Madera y sus Aplicaciones**. 2 ed. Madrid.: Gráficas Reunidas, 1959.
- 52 KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A. **Principles of wood science and technology solid wood**. New York: Springer, v.1, 1968. 592 p.
- 53 KUBLER, H.; CHEN, T.-H. Prevention of crosscut and heating checks in log ends. **Wood Sci. Technol.**, New York, v. 9, n. 1, p. 15-24, 1975.
- 54 KUBLER, H. Growth Stresses in Trees and Related Wood Properties. **Forest Products Abstracts**, Farnham Royal, 10 (3):61-119, 1987.
- 55 LUTZ, J. F. Techniques for speling, slicing, and drying veneer. **Research Paper. FPL. USDA. Forest Service, Madison**, n. 228, p. 1-63, 1974.
- 56 MACKAY, J. F. G. Influence of steaming on water vapour diffusion in hardwoods. **Wood Sci.**, Madison, v. 3, p. 156-160, 1971.
- 57 MACKAY, J. F. G. Recovery of collapse in E. delegatensis by use of anhydrous Ammonia and steam. **Wood and Fiber, Lawrence, Kans.**, v. 4, n. 3, p. 126-129, 1972.
- 58 MAEGLIN, R. R.; LIU, J. Y.; BOONE, R. S. High-temperature drying and equalizing: Effects on stress relief in yellow-poplar lumber. **Wood and Fiber Sci.**, Madison, v. 17, n. 2, p. 240-253, 1985.
- 59 MALAN, F. S. **Studies on the phenotypic variation in growth stress intensity and its association with tree and wood properties of south Africa Grow, Eucalyptus grandis (Hill Ex-Maiden)**. 1984 Tese (Doutorado em Tecnologia da Madeira) - University of Stellenbosch.
- 60 MONTANA, R. G.; ASSINI, J. L.; PONCE, R. H. Desdobro de eucalipto visando diminuir o efeito das tensões de crescimento. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO. ( 6.: 1990: São Paulo). **Anais**, São Paulo, 1990. p. 712-714.
- 61 NEUMAN, R. Kiln drying young Eucalyptus globulus boards from green. In: WOOD DRYING SIMPOSIUM. ( 1989: Seattle). Seattle: IUFRO, 1989. p. 107-115.
- 62 NICHOLSON, J. E. Rapid Method for Estimating Longitudinal Growth Stresses in Log. **Wood Sci. Technol.**, New York, v. 5, n. 1, p. 40-48, 1971.

- 63 NICHOLSON, J.E. Effect of Storage on Growth Stress in Mountain Ash Log and Stress. **Australian Forestry**, Queen Victoria, Australia, n. 36, p. 114-124, 1973a.
- 64 NICHOLSON, J.E. Growth stress differences in eucalypts. **Forest Science**, Lawrence, Kans., v. 19, n. 3, p. 169-174, 1973b.
- 65 NOCK, H.P. Influência de tratamentos a vapor em algumas propriedades físicas da madeira de imbuia (*Ocotea porosa*). **Floresta**, Curitiba, v. 4, n. 1, p. 50-63, 1974.
- 66 OKUYAMA, T.; KANAOKAWA, Y.; HATTORI, Y. Reduction of Residual Stresses in Logs by Direct Heating Method. **Mokuzai Gakkaishi**, Tokyo, v. 33, n. 11, p. 837-843, 1987.
- 67 RASMUSSEN, E.F. **Dry Kiln operator's manual**. Madison: USDA, 1961. 197p. (Agriculture Handbook; 188).
- 68 EUCALIPTO, alternativa para moveleiros. **Silvicultura**, São Paulo, n.43, p. 30-32, 1992.
- 69 RIETZ, R.C. Influence of initial drying temperatures on development of warp in One-Inch Hard Maple. **For. Prod. J.**, Madison, v. 19, n. 7, p. 37-40, 1969.
- 70 ROZAS, E. M. El efecto del anillamiento y de la vaporización en la reducción de las tensiones de crecimiento en madera de Eucalyptus viminalis., 1992 (não publicado)
- 71 ROZAS, E. M.; TOMASELLI, I. Secagem de madeira serrada de Eucalyptus viminalis. **Ciência Florestal**, Santa Catarina, 1993.(no prelo)
- 72 SANTINI, E. J.; TOMASELLI, I. Colapso na madeira e algumas experiências brasileiras. **FUPEF, Série Técnica**, Curitiba, n. 3, p. 1-21, 1980.
- 73 SALES, C. Growth Stresses: Main results obtained on the study of some Guyana species and consequences for use ends. In: IUFRO WORLD CONGRESS (18.: 1986: Ljubljana). **Proceedings**. Blacksburg, VA: IUFRO, 1986. v. 5, p. 234-248.
- 74 SIAU, J.F. **Flow in wood**. Syracuse: Syracuse University Press, 1971. 245 p.
- 75 SIMPSON, W.T. Effect of steaming on the drying rate of several species of wood. **Wood Sci.**, Madison, v. 7, p. 247-255, 1975.
- 76 SIMPSON, W.T. Effect of presteaming on moisture gradient of Northern Red Oak during drying. **Wood Sci.**, Madison, v. 8, p. 156-159, 1976.
- 77 SKAAR, C.J. **Water in Wood**. Syracuse: Syracuse University Press, 1972. 218 p.

- 78 SKOLMEN, R.G. Heating Logs ..... To Relieve Growth Stresses. **For. Prod. J.**, Madison, v. 17, n. 7, p. 41-42, 1967.
- 79 SOUZA, V.R.; CARPIM M.A.; BARICHELLO, L.E.G. Densidade básica entre procedências, classes de diâmetro e posições em Eucalyptus grandis e Eucalyptus saligna. **IPEF**, Piracicaba, n. 33, p. 65-72, 1986.
- 80 STAMM, A. J. **Wood and cellulose science**. New York: Ronald Press, 1964. 549 p.
- 81 STÖHR, H-P. The seasoning of South African Growth Eucalyptus grandis and E. saligna Sawn timber. **South African Forestry J.**, Pretoria, n.102, p. 61-66, 1977.
- 82 STÖHR, H-P.; MACKAY, D. Drying schedule evaluation of 25mm Eucalyptus grandis. Pretoria: **National Timber Research Institute**. 1983. 34 p. (HOUT/320).
- 83 TEUBER, P. **Mejoramiento del secado industrial de Eucalyptus globulus** L. Concepción - Chile, 1990. (Proyecto de Título. Depto. de Ingeniería en Maderas). Universidad del Bío-Bío.
- 84 TOMASELLI, I. **Condições da secagem artificial de madeiras serradas no Paraná e Santa Catarina**. Curitiba, 1974. Tese (Mestrado)-Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Paraná.
- 85 TOMASELLI, I. **Aspectos físicos da secagem da madeira de Pinus elliottii Engelm. acima de 100°C**. Curitiba, 1981. Tese (Professor Titular)-Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- 86 TOMASELLI, I. Secagem a alta temperatura: un processo aplicável às condições brasileiras. In: SEMINÁRIO UTILIZAÇÃO DE MADEIRAS TROPICAIS DE POVOAMENTOS NATURAIS E ARTIFICIAIS NA INDÚSTRIA MADEIREIRA MODERNA (1978: Curitiba) **Seminário.....**, Curitiba: **FUPEF**, 1978. p. 62-70.
- 87 TUSET, R.; DURAN, F. **Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización**. Montevideo, Uruguay (sem data).
- 88 VERMAS, H.F. Case for the low temperature kiln drying of Eucalyptus grandis. **South African Forestry J.**, Pretoria, n. 140, p. 72-77, 1987.
- 89 VILLIERE. A. **Sêchage des Bois**. 6. ed. Paris: Dunod, 1966. 410 p.
- 90 WATANABE, H. A study of the origin of longitudinal growth stresses in tree stems. In: **IUFRO-41 meeting**, Melbourne, Australia. **Proceedings** 1965. v.3, p. 1-17, 1973.

- 91 WEIK, B. B.; WENGER, E. M.; SCHROEDER, J.; BRISBIN, R. Practical drying techniques for yellow-poplar S-D-R fitches. **For. Prod. J.**, Madison, v. 34, p. 39-44, 1984.
- 92 WILHELMY, V.; KUBLER, H. Stresses and checks in log ends from relieved growth stresses. **Wood Sci.**, Madison, v. 6, n. 2, p. 136-142, 1973.
- 93 WILKINS, A. P. Nature and Origin of Growth Stresses in Trees. **Australia. Forest**, Queen Victoria, Australia, v. 49, n. 1, p. 56-62, 1986.
- 94 YAO, J. Relationship between height and growth stresses within and among White Ash, Water Oak, and Shagbark Hickory. **Wood Sci.**, Madison, v. 11, n. 4, p. 246-251, 1979.