

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**ESTIMATIVA DO TEMPO DE VAPORIZAÇÃO DAS TORAS E SUA
IMPLICAÇÃO NO DESDOBRO E NA SECAGEM DA MADEIRA DE
*Eucalyptus grandis***

FRED WILLIANS CALONEGO

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp - Câmpus de Botucatu, para a obtenção do Título de Mestre em Agronomia - Área de Concentração em Energia na Agricultura.

**BOTUCATU-SP
Agosto – 2004**

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**ESTIMATIVA DO TEMPO DE VAPORIZAÇÃO DAS TORAS E SUA
IMPLICAÇÃO NO DESDOBRO E NA SECAGEM DA MADEIRA DE
*Eucalyptus grandis***

FRED WILLIANS CALONEGO

Orientador: Prof. Dr. Elias Taylor Durgante Severo

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp - Câmpus de Botucatu, para a obtenção do Título de Mestre em Agronomia - Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU-SP
Agosto - 2004

AGRADECIMENTOS

A Deus por colocar as pessoas certas nos momentos oportunos durante esta caminhada e por mostrar que:

“... Mais ágil que todo o movimento é a sabedoria ...
... Se alguém deseja uma vasta ciência,
ela sabe o passado e conjectura o futuro,
conhece as sutilezas oratórias e resolve os enigmas...” (SABEDORIA 7.8)

Aos meus pais Gledes e Helio pelos esforços, ensinamentos e exemplos de vida responsáveis por mais esta conquista. Aos meus irmãos Jean e Camila pela amizade durante todos estes anos. À minha namorada Valéria pelo amor, carinho e pela companhia nos momentos difíceis no laboratório. À minha sobrinha Beatriz pelos sorrisos sinceros nos momentos de estresse;

Ao professor Elias Taylor Durgante Severo, pela amizade, orientação, sugestões e confiança;

Ao curso de pós-graduação em Agronomia da Universidade Estadual Paulista, pela aceitação na área de concentração em Energia na Agricultura;

À Floresta Estadual de Santa Bárbara e ao Horto Florestal de Mandurí pertencentes ao Instituto Florestal – Seção de Mandurí, pelo fornecimento do material e disponibilização em tempo integral da serraria, em especial ao Eng. Agrônomo Mestre Clovis Ribas e aos funcionários pelo imprescindível auxílio na coleta e preparo do material aliado a hospitalidade impar;

Aos funcionários do CEMEQ, em especial ao Célio, Pedro, Manuel e professor Fortes, pela confecção de todos os instrumentos que possibilitaram o uso dos termopares e pela assistência técnica e manutenção dos equipamentos utilizados durante o desenvolvimento deste trabalho;

Ao professor João Francisco Escobedo e ao Eng. Agrônomo Doutor Antonio Ribeiro da Cunha, respectivamente, pelo empréstimo do “datalogger” e pela programação e instalação do equipamento para a importante coleta dos dados durante o processo de vaporização de toras;

À Eng. Florestal Inês Galina da empresa Xylema Ltda pelos ensinamentos sobre o programa de controle do secador (Lignomat);

Aos estagiários e atuais Eng. Florestais Marcus Vinícius de Assis Perrechil e Ademilson Coneglian pelo incansável auxílio nas coletas dos dados, muitos deles noite a fora;

Ao pessoal da Seção de Atividades Auxiliares - Transportes da FCA - UNESP pelas inúmeras viagens e transporte de carga entre Boucatu/Manduri;

Ao Claudir da Seção de Conservação e Manutenção pela construção e constante reparos do guincho utilizado para colocar as toras no vaporizador;

Ao Silvio e Soler do Setor de Marcenaria da FCA pela confecção dos tabiques;

Ao pessoal do FEPP - Supervisão das fazendas da FCA pelo empréstimos de equipamentos;

Aos colegas de pós-graduação Orlando Tadeu Lima de Sousa, Marcelo Nogueira e Wagner Batista pelas sugestões, pelo estímulo e amizade;

Aos professores Adriano Wagner Ballarin, Cláudio Angeli Sansígolo e Marcos Antonio de Rezende pelas sugestões, disponibilização de equipamentos e de seus laboratórios;

Aos funcionários do Depto Recursos Naturais/Ciências Florestais Dicão, Édson e João pelo apoio incondicional na construção das cargas de toras e nas pilhas de madeira, muitas vezes fora do expediente de trabalho;

Às funcionárias Lurdinha e Silvia do Depto Recursos Naturais/Ciências Florestais e Marlene, Marilena e Jackeline da seção de pós-graduação pela paciência, bom senso e informações;

Ao pessoal das bibliotecas da FCA-UNESP de Botucatu e do IPEF-Esalq-USP de Piracicaba pela paciência e por disponibilizar todas as referências bibliográficas necessárias.

Ao colega de pós-graduação, amigo e Prof. Mestre da UNESP - Itapeva Carlos Alberto Oliveira de Matos pela execução das análises estatísticas;

À FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pela concessão da bolsa através do processo 02/05028-6 , fonte de estímulo e dedicação exclusiva ao trabalho.

A todos aqueles que contribuíram pelo desenvolvimento desse trabalho.

Meus Sinceros Agradecimentos.

SUMÁRIO

Página

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XI
RESUMO	01
SUMMARY	03
1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	05
2 OBJETIVOS	07
3 REVISÃO DE LITERATURA	08
3.1 Transporte de calor na madeira	08
3.1.1 Considerações sobre transporte de calor	08
3.1.2 Avaliação da temperatura de um corpo através de termopares	09
3.1.3 Determinação do tempo de aquecimento de toras pelo modelo proposto por Steinhagen	11
3.2 Aspectos relacionados ao desdobro de toras	12
3.2.1 Tensões de crescimento	12
3.2.1.1 Considerações gerais	12
3.2.1.2 Origem das tensões de crescimento	13
3.2.1.3 Formas para o alívio das tensões de crescimento	16
3.2.2 Sistema de corte e desdobro da madeira	18
3.3 Aspectos relacionados à secagem da madeira	21
3.3.1 Considerações gerais	21
3.3.1.1 Movimento de umidade acima do ponto de saturação das fibras	23
3.3.1.2 Movimento de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras	26
3.3.2 Processo de secagem de eucalipto	29
3.3.3 Defeitos de secagem	30
4 MATERIAL E MÉTODOS	35
4.1 Espécie utilizada	35
4.2 Coleta do material	35
4.3 Determinação do teor de umidade e da massa específica das toras	36
4.4 Tratamentos para alívio das tensões de crescimento	37

SUMÁRIO

Página

4.4.1 Anelamento das toras	38
4.4.2 Vaporização das toras	38
4.5 Determinação do tempo de aquecimento de toras	39
4.5.1 Verificação da temperatura no centro das toras durante a vaporização	39
4.5.1.1 Construção dos termopares	39
4.5.1.2 Processo de furação das toras e acondicionamento dos termopares	39
4.5.1.3 Monitoramento da temperatura no centro das toras	40
4.5.2 Modelo proposto por Steinhagen	42
4.6 Desdobro das toras	42
4.6.1 Sistema de corte utilizado	42
4.6.2 Avaliação das tensões de crescimento	44
4.7 Secagem da madeira	46
4.7.1 Equipamento de secagem	46
4.7.2 Preparo e empilhamento das tábuas	47
4.7.3 Programa de secagem utilizado	48
4.7.4 Avaliação dos defeitos de secagem	49
4.8 Análise estatística	51
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1 Massa específica básica e teor de umidade das toras	52
5.2 Correlação entre o tempo real de vaporização e o modelo proposto por Steinhagen	54
5.3 Efeito da vaporização no desdobro	62
5.4 Efeito do diâmetro das toras nas tensões de crescimento	66
5.5 Efeito da vaporização das toras na secagem da madeira	71
6 CONCLUSÕES	79
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
Apêndice 1 – Guia para determinar o tempo de vaporização de toras proposto por Steinhagen et al. (1980)	87

SUMÁRIO

Página

Apêndice 2 – Análises de regressão dos tempos de vaporização reais para toras de <i>Eucalyptus grandis</i> em função do tempo de vaporização determinado pelo modelo de Steinhagen	93
Apêndice 3 – Análise exploratória dos dados para as variáveis do desdobro	100
Apêndice 4 – Análise estatística não paramétrica para as variáveis do desdobro	104
Apêndice 5 – Teste de NEMENYI para comparações para as variáveis do desdobro	109
Apêndice 6 – Análise exploratória dos dados para as variáveis da secagem	111
Apêndice 7 – Análise estatística não paramétrica para as variáveis da secagem	116

LISTA DE FIGURAS

FIGURA.

1	Representação esquemática da formação das tensões de crescimento longitudinal em relação ao crescimento transversal da árvore, adaptado de Sales (1986).....	14
2	Exemplo de liberação da distribuição das tensões no diâmetro de toras de <i>Cryptomeria japonica</i> D. Don, adaptado de Tejada et al. (1997).....	18
3	Diagrama esquemático mostrando uma representação idealizada da distribuição de umidade nas células de madeira seccionada acima, no e abaixo do ponto de saturação das fibras (Skaar, 1988).....	22
4	Esquema simplificado do movimento de água em um capilar (Kollmann & Cote, 1968).....	24
5	Esquema simplificado sobre os caminhos de difusão: A) difusão de vapor de água (Lume/Pontoação/Lume); B) difusão de água higroscópica (Parede); e C) difusão combinada de água higroscópica e vapor de água (Parede/Lume/Parede).....	26
6	Principais tipos de defeitos que ocorrem na madeira durante sua secagem.....	32
7	Esquema simplificado da coleta do material.....	36
8	Esquema de anelamento das toras com motosserra.....	38
9	Esquema de um furo para acomodação de um termopar na tora.....	39
10	Termopar inserido na tora de <i>Eucalyptus grandis</i>	40
11	Guincho utilizado para a colocação das toras no meio vaporizador.....	41
12	“Datalogger” acoplado aos termopares inseridos nas toras de <i>E. grandis</i>	41
13	Método de desdobro visando a obtenção de peças tangenciais baseado em serras de fita geminada e simples.....	43
14	Esquema da obtenção de peças com larguras definidas pelo diâmetro das toras.....	44

FIGURA.

15	Esquema de medição do comprimento de rachadura de uma tábua após o desdobro.....	45
16	Medição da abertura da tábua em relação ao bloco no desdobro.....	45
17	Vista geral da estufa de secagem de madeira e sistemas de: (a) ventilação, (b) umidificação e (c) aquecimento.....	47
18	Empenamentos e sua medição: a) encurvamento e b) arqueamento.....	49
19	Medição do encanoamento das tábuas	50
20	Regressão linear crescente ajustada para estimar o tempo de vaporização real para toras de <i>Eucalyptus grandis</i> com 20 a <25cm de diâmetro em função do tempo de vaporização determinado pelo modelo de Steinhagen.....	55
21	Regressão linear crescente ajustada para estimar o tempo de vaporização real para toras de <i>Eucalyptus grandis</i> com 25 a <30cm de diâmetro em função do tempo de vaporização determinado pelo modelo de Steinhagen.....	57
22	Regressão linear crescente ajustada para estimar o tempo de vaporização real para toras de <i>Eucalyptus grandis</i> com 30 a <35cm de diâmetro em função do tempo de vaporização determinado pelo modelo de Steinhagen.....	59
23	Efeito da vaporização das toras na abertura média das tábuas durante o desdobro.....	64
24	Efeito da vaporização das toras no comprimento médio das rachaduras.	64
25	Efeito da vaporização das toras na largura média das rachaduras.....	65
26	Efeito do diâmetro das toras na abertura média das tábuas durante o desdobro.....	67
27	Efeito do diâmetro das toras no comprimento médio das rachaduras.....	68
28	Efeito do diâmetro das toras na largura média das rachaduras.....	69
29	Efeito da vaporização das toras na percentagem de rachaduras das tábuas após a secagem.....	75

FIGURA.

30	Efeito da vaporização das toras na flecha de encurvamento das tábuas após a secagem.....	76
31	Efeito da vaporização das toras na flecha de arqueamento das tábuas após a secagem.....	77
32	Efeito da vaporização das toras no encanoamento das tábuas após a secagem.....	77
33	Difusividade térmica na direção radial em função da temperatura e conteúdo de umidade.....	89
34	Fator de ajuste segundo o peso específico para uso em conjunto com a difusividade.....	90
35	Relações do número de Furier (F), raio normalizado (Rn) e temperatura normalizada (t).....	91

LISTA DE TABELAS

TABELA.

1	Programa de secagem para <i>Eucalyptus grandis</i> com 28mm de espessura.....	48
2	Massa específica básica e teor de umidade com base na massa seca das toras de <i>Eucalyptus grandis</i> , antes do processo de vaporização.....	53
3	Efeito da vaporização no alívio das tensões de crescimento.....	62
4	Efeito do diâmetro das toras nas tensões de crescimento.....	67
5	Classificação dos defeitos de secagem para madeira serrada proveniente de toras controle e vaporizada de <i>E. grandis</i>	73
6	Efeito da vaporização na secagem da madeira.....	74

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo determinar o tempo de vaporização de toras e sua implicação no desdobro e na secagem da madeira de *Eucalyptus grandis*. Para tanto foram utilizadas toras com diâmetros de 20 a <25cm, de 25 a <30cm e de 30 a <35cm, procedentes do Horto Florestal de Mandurí-SP. As toras foram vaporizadas à 90°C de temperatura e 100% de umidade relativa durante 20 horas. Para a adequação do modelo geral de vaporização de toras proposto por Steinhagen utilizou-se termopares fixados no centro das toras e um “datalogger” para a coleta do tempo e da temperatura real, a cada minuto. Posteriormente, as toras foram desdobradas pelo sistema de corte tangencial e medições dos defeitos decorrentes das tensões de crescimento foram realizadas, com o intuito de avaliar o efeito do tratamento de vaporização e o comportamento das tensões de crescimento em diferentes classes de diâmetro das toras. O material serrado foi seco em estufa de secagem convencional e a avaliação dos defeitos de secagem do material proveniente tanto de toras controle quanto de vaporizadas foi realizada. Os resultados evidenciam que: o modelo geral de determinação do tempo de vaporização de toras, proposto por Steinhagen, não é aplicável diretamente para o eucalipto, mas a adoção de fatores de correção possibilita a utilização deste modelo para a espécie em estudo; a vaporização das toras proporcionou a liberação de grande parte das tensões de crescimento, sem contudo eliminá-las por completo, mostrando que este tratamento é viável e recomendável para a liberação das tensões de crescimento; existe entre as tábuas uma diferença nas magnitudes das tensões de crescimento em função do diâmetro das toras,

indicando que as toras de maior diâmetro produziram tábuas mais propensas a rachar e que quanto menor foi o diâmetro das toras, maior foi a abertura das tábuas em relação ao bloco durante o desdobro; através do programa de secagem utilizado, tanto tábuas provenientes de toras controle como de vaporizadas não apresentaram colapso e os empenamentos e as rachaduras foram significativamente menores no material vaporizado; as tábuas provenientes de toras vaporizadas de 20 a <25 cm de diâmetro apresentaram, em geral, maiores reduções nos índices de defeitos, tanto no desdobro quanto após a secagem, mostrando que quanto menor foi o diâmetro das toras maior foi a eficiência do tratamento de aplicação de vapor a 90°C de temperatura durante 20 horas e indicando que quando maior for o diâmetro das toras maior deve ser o tempo de permanência do material no processo.

Palavras-chave: *Eucalyptus grandis*, Tensões de crescimento, Tempo de vaporização de toras, Desdobro da madeira, Secagem de madeira.

SUMMARY

The present study to have to do as aim to determine the log steaming time its involvement on the sawing process and on the drying of *Eucalyptus grandis* wood. In order to do it so, were used logs with diameter of 20 at <25, 25 at <30 and 30 at <35 cm, from the Horto Florestal, Manduri, São Paulo. The logs were heated during 20 hours at 90°C of temperature and 100% of relative humidity. For the adaptation of the logs heating general model developed by Steinhagen to make use of thermocouples fixed it logs center and a datalogger recorded the time and real temperature at each minute. Later the logs were sawing for width tangential system and measuring of the defects resulted from the growth stress were performed with intention to evaluate the effect of steaming treatment and the growth stress behavior with logs diameters. The sawn wood was dry in the dry-kiln and were available the dry defects of the sawn wood deriving as much the control logs as the steamed logs. The results indicate that: the log steaming time determination general model developed by Steinhagen don't is applied for eucalypts and that are necessary the use of the adjustment factors that provided the used them model for studied kind; the logs steaming provided the release of a great part of the growth stress, without, however, eliminate them completely, showing, nevertheless, that this treatment to be feasible and advisable for the growth stress relief; there are among the boards a difference on the growth stress magnitude with the logs diameters showing that the bigger logs to produce boards to be inclined cracks and that logs with diameter smaller to develop biggest boards opening during the sawing process; across of the drying schedules used so much boards

provided of the control logs as the heated logs don't to presented collapse e that the warping and end checks were smaller in the heated material; the boards provided the heated logs of the diameter 20 at <25 cm to presented, in general, reductions biggest on the defect rate, as much sawing process as after the drying process showing that as smaller as is the logs diameters bigger is the efficient of the steam application treatment at 90°C of the temperature during 20 hours and indicating that as bigger as is logs diameter biggest must be the time of the permanence of the material in the steaming process.

Keywords: *Eucalyptus grandis*, Growth stress, Log steaming time, Sawing process, Drying process.

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Por se tratar de um produto natural e renovável, aliado a um conjunto de propriedades quase únicas, a madeira é, sem dúvida, um dos materiais de construção mais versáteis.

Com as elevadas distâncias entre as regiões de produção de madeira nativa e os pólos consumidores e a restrição quanto ao uso de espécies nobres devido a pressões sócio-ambientais, a adoção de espécies de rápido crescimento é uma solução necessária.

O eucalipto é um gênero exótico de rápido crescimento, e tem sido largamente utilizado em substituição das madeiras nativas. Como a madeira de eucalipto se apresenta como uma solução para a indústria de serrados, estudar esse material é um fato inevitável e imprescindível para a produção de peças com qualidade.

O seu emprego, entretanto, tem causado frustrações durante o processamento da madeira devido ao aparecimento de defeitos que conduzem à consideráveis perdas de matéria-prima e conseqüentemente perdas econômicas.

As principais frustrações decorrentes da utilização do gênero eucalipto prendem-se as seguintes características: alto gradiente de umidade, colapsos durante a secagem e altos níveis de tensões de crescimento, assim denominadas por se constituírem em tensões associadas ao crescimento normal de uma árvore e que causam invariavelmente perda de madeira ou no desdobro ou na secagem do material.

Uma forma comercialmente atrativa de se melhorar a qualidade do desdobro, da secagem e minimizar as perdas de matéria-prima é o emprego da vaporização em toras, cuja técnica consiste em aplicar vapor ou água quente por determinado tempo com o intuito de fornecer calor para as toras, plasticizar o material e concomitantemente obter o alívio das tensões de crescimento.

Entretanto, existe a necessidade da realização de estudos específicos sobre temperatura e tempo de vaporização de toras visando definir os limites de tempo do processo. A determinação exata do tempo de permanência do material no processo de vaporização é fundamental para a produção de madeiras com melhor qualidade, menor perda de matéria-prima e menor consumo de energia.

Com a atual crise no setor energético brasileiro, deve-se buscar alternativas tecnológicas para a otimização do uso da energia existente. Como o processo de secagem convencional demanda grande disponibilidade de energia e é imprescindível para o fornecimento de produtos em quantidade e com qualidade, é necessário trabalhar com as características da madeira para diminuir seu custo.

Devido à produção de *Eucalyptus grandis*, suas propriedades mecânicas favoráveis ao uso estrutural, suas limitações físicas, porém, contornáveis através do uso de técnicas de alívio das tensões de crescimento, como aponta a literatura, verificamos a necessidade do desenvolvimento da técnica de vaporização de toras como alicerce para a adoção dessa madeira em escala comercial.

2 OBJETIVOS

Esse trabalho teve como objetivo geral estimar o tempo de vaporização de toras e verificar sua implicação no desdobro e na secagem da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Os objetivos específicos foram:

- Adequar o tempo de vaporização de toras proposto por Steinhagen para diferentes classes de diâmetro da espécie em estudo;
- Avaliar o efeito do tratamento de vaporização das toras no desdobro;
- Avaliar o efeito do diâmetro das toras no desdobro;
- Avaliar o efeito da vaporização de toras na qualidade de secagem de madeira serrada.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Transporte de calor na madeira

3.1.1 Considerações sobre transporte de calor

Kreith (1985), Simpson (1991) e Van Wylen & Sonntag (1984) definem o calor como a forma de energia transportada através da fronteira de um sistema ou uma região, numa dada temperatura, a um outro sistema ou um meio numa temperatura inferior, devido à diferença de temperatura entre os dois sistemas.

Segundo Kreith (1985) e Simpson (1991), há três meios distintos de transporte de calor: (1) Convecção é o processo de transporte de energia, pela ação combinada da condução de calor, armazenamento de energia e movimento de mistura, também conhecido como transporte mecânico de massa ou fluxo de massa; (2) Radiação é processo pelo qual o calor é transportado quando os corpos estão separados no espaço, ainda que exista vácuo entre eles. O calor é transportado por ondas eletromagnéticas e luminosas; e (3) Condução é o processo pelo qual o calor flui de uma região de temperatura mais alta para outra de temperatura mais baixa, dentro de um meio (sólido, líquido ou gasoso), ou entre meios diferentes em contato físico direto. A energia é transportada por meio de comunicação molecular direta, sem apreciável deslocamento das moléculas.

Hann (1964), citado por Tomaselli (1981), afirma que “no caso da secagem em estufas convencionais, o fator mais importante é o transporte de calor por convecção, no qual o ar aquecido transfere o calor de uma fonte de energia à superfície da madeira”. Se considerarmos experimentos conduzidos em estufas de laboratório sem circulação de ar, a radiação é o principal fator.

No caso da vaporização de toras, o transporte de calor ocorre principalmente através da condução. Portanto, o conhecimento das propriedades térmicas do material não é importante apenas quando se considera as propriedades de resistência ao fogo e isolamento térmico da madeira, mas também para estimar o tempo de aquecimento por ocasião do preparo das toras para laminação e o tempo de aquecimento na secagem em estufa (LANGRISH & WALKER, 1993 citados por SANTINI, 1996).

Segundo Forest Products Laboratory (1999), Santini (1996), Simpson (1991) e Steinhagen (1977) as propriedades térmicas da madeira mais importantes são: (1) calor específico do material – quantidade de calor necessária para elevar de uma unidade de temperatura em uma unidade de massa de madeira; (2) condutividade térmica – medida da taxa do fluxo de calor através de uma unidade de espessura do material sujeito a um gradiente de temperatura; (3) difusividade térmica – medida de quão rapidamente um material pode receber calor do meio ao seu redor.

3.1.2 Avaliação da temperatura de um corpo através de termopares

Ainda que a temperatura seja uma propriedade bem familiar, é difícil encontrar uma definição exata para ela. Devido à essa dificuldade, define-se igualdade de temperatura.

Quando se coloca dois corpos idênticos de cobre com temperaturas diferentes em contato térmico, verifica-se que a coluna de mercúrio do termômetro no corpo quente cai e no corpo frio se eleva, mas após certo tempo nenhuma mudança na altura das colunas é observada.

A lei zero da termodinâmica diz que, quando dois corpos têm igualdade de temperatura com um terceiro corpo, eles terão igualdade de temperatura entre si.

Essa lei constitui realmente a base da medida da temperatura, porque se pode colocar números nos termômetros de mercúrio e sempre que um corpo tiver igualdade de temperatura com o termômetro poderemos dizer que o corpo tem a temperatura lida no termômetro (VAN WYLEN & SONNTAG, 1984).

As escalas padrões para as medidas de temperatura (graus Celsius, graus Fahrenheit e Kelvin) surgiram da aplicação da lei zero da termodinâmica para alguns pontos fixos facilmente reproduzíveis como os pontos de vaporização e solidificação da água ao nível do mar, ou ainda os pontos de solidificação normal da prata ou do ouro, e que permitem a leitura precisa da temperatura nos mais diversos termômetros de mercúrio e nos mais diferentes aparelhos de medida de temperatura, como os termômetros de resistência e os pares termoeletricos.

O descobrimento do comportamento termoeletrico de certos materiais é atribuído a Seebeck. Em 1821, Thomas Johann Seebeck descobriu acidentalmente que num circuito fechado, confeccionado com fios de dois metais diferentes, uma corrente elétrica fluirá se a temperatura de uma junção for maior que a temperatura da outra (CAMTEC, 2003 e FRADEN, 1996).

Sensores de contato termoeletrico são chamados de termopares quando pelo menos dois condutores diferentes são requeridos para fabricá-los. Um termopar completo é formado por um elemento sensível (a junção dos dois condutores), por um tubo protetor (sobrecapa) e terminações (contatos que podem ter a forma de um parafuso, forma aberta, etc).

O isolamento termoeletrico dos termopares é afetado pela umidade, abrasão, flexão, temperaturas externas, ataque químico e radiação nuclear. Alguns isolantes têm resistência natural à umidade, como o teflon, PVC e outros polímeros. Para proteger os termopares da umidade, impregnam-lhes com substâncias tais como resinas, ceras e compostos de silicone (FRADEN, 1996).

A escolha de um termopar para um determinado serviço deve ser feita considerando todas as possíveis variáveis e normas exigidas pelo processo.

As principais características e recomendações dos sensores tipo “T” (Cobre X Constantan) são: resistência à corrosão quando exposto à umidade, à atmosférica oxidante e apropriados para medições de temperatura abaixo de 0°C e devido à oxidação de um dos termoelementos é restrito à 370°C (FRADEN, 1996).

3.1.3 Determinação do tempo de aquecimento de toras pelo modelo proposto por Steinhagen

O tempo necessário de permanência da tora no tanque de aquecimento depende de vários fatores, tais como: espécie, diâmetro, teor e gradiente de umidade, temperatura inicial, temperatura desejada, tipo de tanque de aquecimento e meio utilizado como aquecedor (KOLLMANN et al., 1975 citados por MEDINA, 1986 e UMANÃ & BRITO, 2003).

Umaña & Brito (2003) afirmam que no tanque de vaporização de toras deve-se depositar madeira da mesma espécie, ou pelo menos, de massa específica aproximadas. Os mesmos autores, ainda, afirmam que as madeiras duras e de maior massa específica, assim como, as de maior diâmetro, necessitam de maior tempo de vaporização que as madeiras leves, macias e de diâmetros pequenos.

Steinhagen et al. (1980), desenvolveram um método para a determinação do tempo de aquecimento necessário para que o centro da tora atinja a temperatura desejada.

Para tanto, os mesmos autores levam em consideração as propriedades térmicas e físicas da madeira, características anatômicas, dimensões das toras, temperatura de aquecimento, temperatura desejada e temperatura do meio ambiente; como mostra a equação (1).

$$t' = \frac{F * R^2}{D^2} \quad (1)$$

onde:

t' - tempo de aquecimento das toras, horas;

F - número de Furier;

R - raio médio das toras, m;

D - difusividade térmica média das toras, m².h⁻¹.

Steinhagen et al. (1980) afirmam que é difícil determinar quanto tempo uma tora deve permanecer durante a vaporização.

O método desenvolvido por Steinhagen et al. (1980) foi elaborado para estimar o tempo de aquecimento para uma grande variabilidade de condições. Porém, segundo os mesmos autores, os tempos de aquecimentos estimados são satisfatórios como dados experimentais e discrepâncias na ordem de 10% nos resultados são principalmente atribuídas ao fato do método empregar média constante das propriedades térmicas e não levar em conta o efeito do gradiente de umidade do material.

Steinhagen et al. (1987) desenvolveram um programa de computador denominado LOG-HEAT e chegaram à conclusão de que esse programa é mais prático que os métodos anteriores para determinar o tempo de aquecimento de toras e o consumo de energia do processo.

Segundo Steinhagen (1989), as fórmulas desenvolvidas anteriormente para determinar o tempo de aquecimento de toras são muito versáteis mas apresentam o uso dificultado.

Severo (1998) e Tejada et al. (1997) estudando o efeito da vaporização de toras no alívio de tensões de crescimento sugerem o desenvolvimento de estudos para definir com maior exatidão a temperatura e o tempo de vaporização de toras.

3.2 Aspectos relacionados ao desdobro de toras

3.2.1 Tensões de crescimento

3.2.1.1 Considerações gerais

As tensões de crescimento são responsáveis por grande proporção de defeitos que ocorrem com a madeira de eucalipto, durante todas as fases de processamento. Tais defeitos implicam em grande perda do rendimento e, conseqüentemente, na inviabilização do uso do eucalipto para madeira serrada.

Segundo Oliveira (1999), quando se consegue reduzir os elevados níveis de tensões de crescimento em toras de madeira de eucalipto, conseqüentemente,

consegue-se resolver grande parte dos problemas relacionados às etapas de processamento durante o desdobro e a secagem daquela madeira.

3.2.1.2 Origem das tensões de crescimento

As tensões de crescimento estão presentes na árvore manifestando-se na tora, no momento, ou logo após a derrubada, ou durante o desdobro destas toras.

Dinwoodie (1965, p.1, tradução nossa) afirma que as “tensões de crescimento na madeira foram definidas pela Sociedade Florestal Americana como forças encontradas na madeira em estado verde”. Portanto, desta forma, diferenciam-se das tensões de secagem, que são causadas pela contração da madeira, devido ao gradiente de umidade gerados no processo de secagem.

Martley (1928), citado por Chafe (1979), foi o primeiro a relatar as causas das tensões de crescimento, observando a curvatura que surgiam em tábuas de Olmo (*Ulmus sp*) após seu corte. O referido autor, acreditava que as tensões de crescimento poderiam ser causadas pelo próprio peso da árvore, durante o seu desenvolvimento. Entretanto, cálculos da provável compressão máxima no centro da árvore convenceram-no de que as tensões decorrentes do próprio peso da árvore eram insuficientes para produzir tamanhas variações nas dimensões da madeira serrada.

Wilkins (1986), citado por Santos, P. (2002), comenta que enquanto os pesquisadores mais antigos atribuíam a origem das tensões de crescimento ao peso da árvore, à tensão do alburno e ao encurtamento longitudinal das células, somente esta última hipótese tem sido geralmente aceita nos dias atuais.

Para Amaral (1991), Boyd (1972) e Sales (1986), a origem das tensões de crescimento está diretamente relacionada com a lignificação das paredes celulares. Segundo os mesmos autores, a lignina depositada e polimerizada entre as microfibrilas na parede secundária induz a um irreversível inchamento ou expansão no plano transversal da célula.

Segundo Boyd (1972) e Sales (1986), essa importante deformação no sentido transversal da fibra provoca aumento ou diminuição do comprimento da célula, em função do ângulo microfibrilar da camada S2 da parede secundária.

Boyd (1972), afirma que a célula contrai longitudinalmente se os ângulos microfibrilares estão entre 10 e 40° e a célula alonga se os ângulos microfibrilares são maiores do que 40°. Como na parede secundária estes ângulos são geralmente pequenos, espera-se o encurtamento das células (BOYD, 1972; CHAFE, 1979 e SALES, 1986).

A contração longitudinal da célula é dificultada pelas células vizinhas mais velhas (BOYD, 1972). Amaral (1991), afirma que a maior rigidez das fibras vizinhas, diferenciadas e ligadas, restringe a extensão desse decréscimo em comprimento, de maneira que desenvolve um estresse longitudinal de tração.

Para Amaral (1991) e Sales (1986), a força longitudinal de tração sendo continuamente gerada pelas sucessivas camadas de células novas comprime toda a madeira mais velha. Os efeitos das novas camadas se acumulam e as deformações mudam progressivamente a cada distancia a partir da periferia, levando o centro a um estado de compressão crescente. Esse fenômeno pode ser visualizado no esquema da Figura 1.

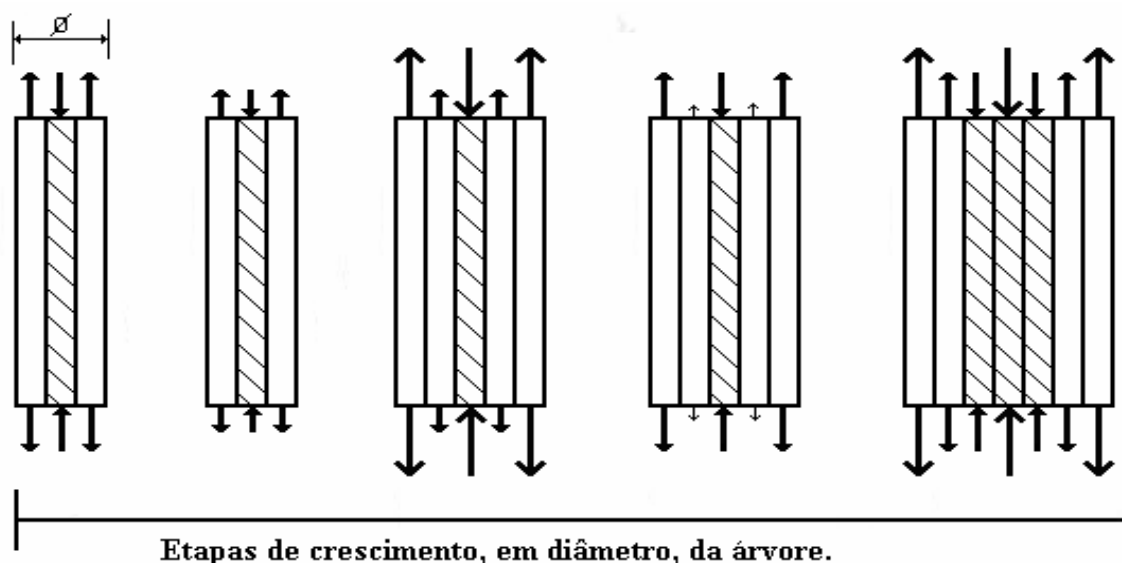


Figura 1. Representação esquemática da formação das tensões de crescimento longitudinal em relação ao crescimento transversal da árvore, adaptado de Sales (1986).

Os fustes das folhosas apresentam a parte externa em tração longitudinal e, como conseqüência, a parte interna em compressão (AMARAL, 1991; BOYD, 1972; PONCE, 1995 e SALES, 1986).

Amaral (1991), afirma que o estresse periférico é maior em árvores de folhosas do que de coníferas e o nível parece variar entre as espécies de eucaliptos. Segundo Turnbull (1965, p.3, tradução nossa) “os efeitos das tensões de crescimento são mais pronunciados nas folhosas jovens do que nas velhas.”

Na literatura existem divergências quanto ao comportamento das tensões de crescimento com a altura da árvore e conseqüentemente com o diâmetro das toras.

Santos, P. (2002), estudando o nível de tensões de crescimento em madeira de *E. grandis*, verificou que para o índice de rachaduras de extremidades de tábuas verdes não se encontrou diferença significativa de comportamento entre as primeiras e as segundas toras.

Por outro lado, Rozas Mellado (1993) observou que a primeira e a terceira tora de *E. grandis* apresentaram menor porcentagem de tensões de crescimento (porcentagem obtida através das rachaduras das tábuas durante o desdobro) que a tora do meio, sendo estas porcentagens 29,3; 35,1; e 27,8%, respectivamente.

Fernandes & Ferreira (1986), estudando o nível de tensões de crescimento em toras de *Eucalyptus saligna* Smith, concluíram que existe correlação altamente significativa entre a intensidade de rachaduras das extremidades e os diâmetros das toras e que a intensidade de rachaduras diminui com o aumento dos diâmetros. Resultado semelhante encontrou Chafe (1981), onde estudos efetuados em *E. regnans* mostraram existir uma relação direta entre a altura e a tensão de crescimento.

Porém Malan (1984), citado por Rozas Mellado (1993), estudando *E. grandis* observou que as rachaduras de topo foram maiores nos primeiros 2 a 3 metros e diminuíram de intensidade com a altura da árvore. Num estudo conduzido por Chafe (1985) em 10 árvores de *E. nitens* de 8 anos de idade, medidas tomadas a seis diferentes alturas revelaram que a tensão de crescimento tem uma relação inversa com a altura da árvore.

Independente do comportamento das tensões de crescimento com o diâmetro das toras, segundo Nicholson (1973), o gênero eucalipto é um exemplo de madeira comercial em que a componente longitudinal das tensões de crescimento gerada pela formação das células novas do xilema pode apresentar valores excessivamente altos. Os altos níveis de tensões de crescimento causam rachaduras das toras, distorção das pranchas retiradas das toras e rachaduras internas.

3.2.1.3 Formas para o alívio das tensões de crescimento

a) Anelamento de toras

O anelamento consiste em efetuar um corte com motosserra em torno do tronco, antes da derrubada e na posterior confecção dos toretes.

A eficiência do anelamento com motosserra aumenta com o aumento da profundidade deste. A distância entre o anelamento e o topo da tora é menor quanto mais profundo for o anelamento. De forma geral a profundidade do corte varia de $1/3$ a $1/2$ do raio (KUBLER, 1987).

Sales (1986) concluiu que o nível 0 (zero) de tensões se localiza a uma distância média de 70% do raio da tora, a partir da medula. O mesmo autor afirma que o nível de estresse médio é reduzido depois da remoção da parte externa da tora, na profundidade de aproximadamente $1/3$ do raio.

Rozas Mellado (1993), estudando *E. grandis* recomenda a realização do tratamento de anelamento com motosserra a uma profundidade de aproximadamente $1/3$ do raio da tora por ter um efeito positivo sobre a liberação das tensões de crescimento. Segundo o mesmo autor, o anelamento de toras evita a formação de rachadura de topo durante a confecção dos toretes e reduz sensivelmente a propagação de rachaduras nos topos das toras durante o aquecimento (vaporização).

b) Processo de aquecimento ou vaporização de toras

“O aquecimento de toras, em água ou em vapor, tem como objetivo amolecer a madeira e liberar as tensões de crescimento”. (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999, p.19-1, tradução nossa).

Segundo Mackay (1971), Perking et al. (1959) e Weik et al. (1984) citados por Rozas Mellado (1993), a vaporização da madeira é uma técnica que tem sido explorada para uma grande variedade de propósitos. Estes incluem a redução dos níveis de

ensões de crescimento, aumento da permeabilidade e melhoramento na estabilidade dimensional.

Segundo Medina (1986) e Steinhagen & Rozas (1998), o aquecimento das toras traz consigo uma série de vantagens, e através da análise do aspecto econômico surgirá a decisão de aquecer ou não.

Rozas Mellado (1993), estudando *Eucalyptus grandis*, confirmou que o tratamento de vaporização das toras previamente aneladas foi efetivo na liberação das tensões de crescimento. Para a liberação das tensões de crescimento o referido autor recomendou o uso de um tempo de vaporização de 18 horas e uma temperatura de 90°C para toras com diâmetro entre 15 e 20 cm.

O mesmo autor concluiu que a utilização do tratamento de vaporização melhorou a qualidade da madeira serrada, uma vez que este tratamento provocou uma diminuição das rachaduras e empenamentos durante o desdobro de *E. grandis*, resultando num maior aproveitamento da matéria-prima durante o seu processamento.

Skolmen (1967), obteve reduções de cerca de 50% das tensões de crescimento em toras de *Eucalyptus saligna* com diâmetro de 15-20cm após um tratamento de 24 horas em água quente.

Severo & Tomaselli (2000), estudando *Eucalyptus dunnii*, observaram que a vaporização inicial da madeira demonstrou ser efetiva na redução do teor de umidade inicial, gradiente de umidade e no aumento da taxa de secagem desta espécie.

Tejada et al. (1997,) estudando o efeito da vaporização de toras na liberação das tensões de crescimento em *Cryptomeria japonica* D. Don, verificou que o tratamento de aplicação de vapor a altas temperaturas durante 70 horas tem um efeito positivo no relaxamento das tensões da madeira, como mostra a redução da inclinação da curva de distribuição das tensões visualizada na Figura 2.

Severo (1998), concluiu que a vaporização das toras de *Eucalyptus dunnii* por um período de 20 horas proporcionou uma redução significativa das tensões de crescimento. O mesmo autor sugere o desenvolvimento de estudos para definir com maior exatidão limites de tempo e temperatura de vaporização de toras.

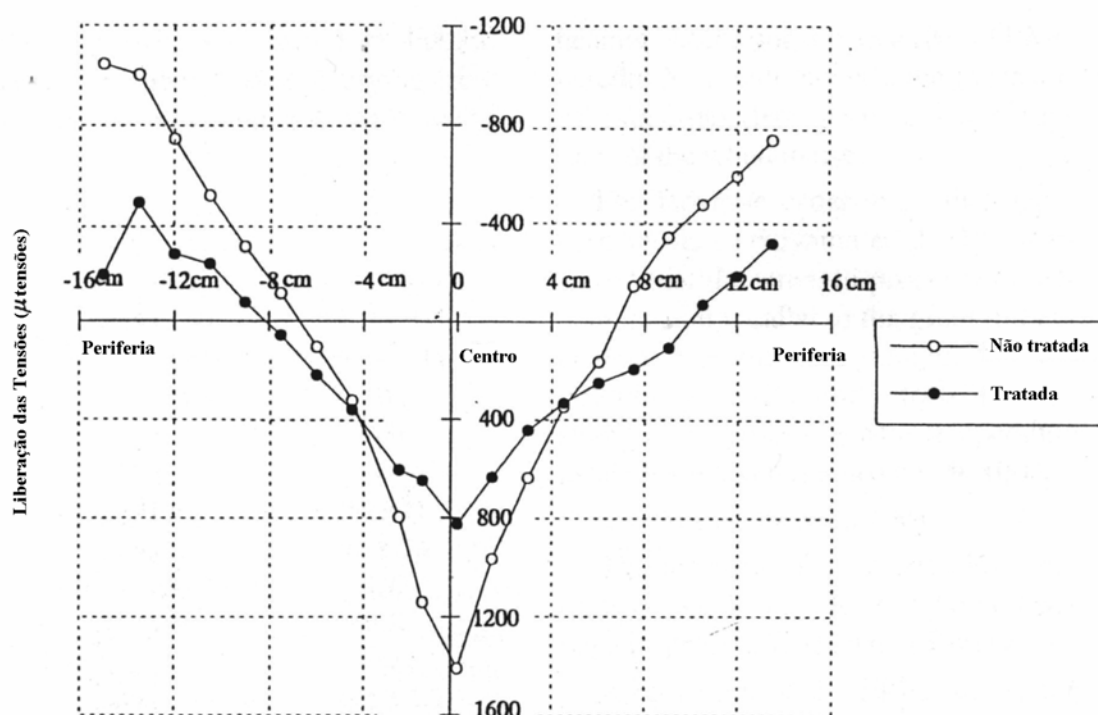


Figura 2. Exemplo de liberação da distribuição das tensões no diâmetro de toras de *Cryptomeria japonica* D. Don, adaptado de Tejada et al. (1997).

Tejada et al. (1997), estudando o efeito do ar aquecido a altas temperaturas durante 70 horas, em toras, concluíram que esse processo é um método efetivo para reduzir até cerca de 100% as tensões de crescimento sem reduzir as propriedades mecânicas e, conseqüentemente, melhora na estabilidade dimensional de *Larix leptolepis* Gord., *Cryptomeria japonica* D. Don, *Abies sachalinensis* Fr. Schm., *Quercus mongolica* Fisch e *Fraxinus mandshurica* Rupr.. Esses autores sugerem o estudo específico sobre o efeito da temperatura e sobre o tempo de aquecimento para cada uma das espécies.

3.2.2 Sistema de corte e desdobro da madeira

O aprimoramento de técnicas de desdobro, aliado ao uso adequado de técnicas de secagem de madeira, é de fundamental importância para a obtenção de um melhor

rendimento das espécies de rápido crescimento e que possuem acentuados níveis de tensões de crescimento.

Segundo Garcia (1995), o desdobro da madeira de eucalipto exige técnicas especiais devido às condições intrínsecas da madeira. A grande ocorrência de tensões internas de crescimento prejudica sobremaneira o rendimento, através da tendência de rachamento das toras antes e durante a operação de desdobro.

Os cortes tangenciais sucessivos efetuados em serras de corte único não são, do ponto de vista prático, indicados para a produção de madeira serrada de espécies que tenham relativamente altas deformações de crescimento. Isto porque após a retirada de cada tábua, o bloco remanescente se deforma por flexão, pela adaptação à nova distribuição nele residual, implicando na perda de uniformidade de espessura da próxima peça a ser serrada (GARCIA, 1995, p.64).

Muitos autores recomendam o corte radial como uma forma de reduzir os efeitos das tensões de crescimento, porém estes mesmos autores reconhecem que ao desdobrar toras de pequeno diâmetro o resultado é uma grande quantidade de peças de pequena largura (ROCHA & TOMASELLI, 2001).

Rocha (2000) salienta, em seu estudo, que o sistema de corte tangencial foi mais adequado que o sistema de corte radial para o desdobro das espécies *Eucalyptus grandis* e *E. dunnii* pois as tábuas obtidas pelo sistema de corte radial apresentaram arqueamento e encurvamento mais pronunciados se comparados com os das tábuas obtidas pelo corte tangencial.

Rocha (2000) e Rocha & Tomaselli (2001), estudando o efeito de modelo de corte na madeira serrada de *Eucalyptus grandis* e *E. dunnii*, respectivamente com 12 e 16,5 anos de idade, com classes diamétricas de 19 a 24cm e de 25 a 30cm, concluíram que o modelo de desdobro tangencial possibilita a obtenção de tábuas com maiores larguras e espessuras mais uniformes que no caso de um modelo de desdobro radial.

Os mesmos autores afirmam que o sistema de corte tangencial possibilita a obtenção de tábuas com comprimento maior e mais uniforme, o que disponibiliza peças de maior dimensão e, conseqüentemente, de maior valor comercial. O menor

comprimento obtido em tábuas radiais está diretamente relacionado com a operação de refilo devido às elevadas flechas do arqueamento presentes nessas tábuas.

A solução mais simples e adequada para madeira de eucalipto, é o corte simultâneo de duas costaneiras através de serras de fita dupla, circulares alternativas ou picadores canteadores. Em seguida o bloco deve ser desdobrado em uma serra múltipla em vários cortes simultâneos. Obtém-se, assim, rendimentos próximos de 50% em madeira serrada para toras de 15 a 30cm de diâmetro. Outra característica é a alta produtividade deste sistema. (PONCE, 1995, p.53).

Segundo Acosta (1999), toras de *Eucalyptus grandis* com diâmetro médio entre 25 e 30cm e comprimento máximo de 3,5 a 4,5m devem sofrer o primeiro corte em uma serra de fita dupla para a retirada de duas costaneiras, simultaneamente. Tal sistema de corte promove a liberação por igual das tensões de crescimento. Após, então, o bloco central, com no mínimo 67% do diâmetro da tora, sofre cortes com serras de fita ou circulares múltiplas.

Garcia (1995) salienta que, no caso da peça que pode ser obtida por um corte duplo seguido de um corte múltiplo, observa-se que o encanoamento diminui e a flecha do encurvamento tende a aumentar com o aumento da distância da peça em relação à medula.

O mesmo autor afirma que, esta peça pode, devido à sua menor inércia, ser retificada na secagem mediante a aplicação de cargas transversais, mas neste caso guardará tensões residuais que poderão se manifestar por ocasião de cortes longitudinais posteriores. Recomenda-se então, que suas dimensões sejam as mais próximas possíveis daquelas necessárias ao seu uso final.

Montagna et al. (1991), estudando o efeito das tensões de crescimento da madeira de *Eucalyptus grandis*, de 18 anos de idade e com DAP de 23cm, mediante ao sistema de desdobro verificou que a espécie quando desdobrada por uma serra de fita simples através do sistema de corte tradicional (cortes paralelos) produziu tábuas com o valor do índice de rachaduras (IR) nove vezes maior quando comparado ao das tábuas obtidas pelo desdobro de toras no sistema de cortes a 1/3 do raio, esse realizado através do uso de uma serra de fita geminada para obtenção do bloco através da retirada das costaneiras, duas a duas.

3.3 Aspectos relacionados à secagem da madeira

3.3.1 Considerações gerais

Uma das operações mais importantes na indústria de transformação da madeira é a secagem racional da matéria-prima básica. A remoção de sua umidade até um teor adequado irá minimizar os efeitos de movimentação dimensional, além de garantir melhor qualidade ao usuário. Reduz sensivelmente os custos do transporte, influi favoravelmente no uso final e diminui a susceptibilidade ao ataque de fungos e insetos.

Simpson (1991) e Skaar (1988), afirmam que toda árvore em crescimento contém considerável quantidade de água, comumente chamada de seiva. Embora a seiva contenha alguns materiais solúveis, do ponto de vista da secagem considera-se todo esse material como água.

Segundo Ponce & Watae (1985) e Simpson (1991), o teor de umidade inicial de uma árvore pode variar muito, algumas espécies possuem 30%, outras atingem 200% ou mais de umidade em relação a seu peso seco.

A quantidade de água na madeira varia em função da espécie, entre toras e dentro da própria tábua. As variações na quantidade de água, em tábuas produzidas da mesma tora, são principalmente devidas à posição das mesmas na tora da qual foram serradas. Além disso, a presença de lenhos diferentes na madeira pode significar diferença de teor de umidade (MACKAY & OLIVEIRA, 1989).

Segundo Cech & Pfaff (1977), Haygreen & Bowyer (1996), Kollmann & Côte (1968) e Simpson (1991), 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 freqüentemente classificados da seguinte forma: (1) Água livre ou capilar – aquela localizada nos lumes celulares e espaços intercelulares e aberturas de pontoações. Na realidade, esta água não é completamente livre, pois existem forças capilares atuando sobre as mesmas e (2) Água higroscópica ou de impregnação – aquela que se encontra adsorvida pelas paredes celulares, principalmente pela celulose e hemiceluloses que constituem a maior parte da substância madeira.

Esses dois tipos de água desempenham funções diferenciadas no processo de secagem da madeira. Enquanto que a água capilar é mais importante para as propriedades térmicas e elétricas, a água higroscópica exerce influência principalmente sobre as propriedades mecânicas e algumas propriedades físicas da madeira, como massa específica, contração e inchamento (SANTINI, 1996, p.4).

Na secagem, a primeira água a ser removida é a água contida nas cavidades celulares, que é denominada água livre ou capilar, que se encontra retida por forças capilares, apreciavelmente menores do que às que mantém a água na parede celular (CECH & PFAFF, 1977 e HAYGREEN & BOWYER, 1996).

A retirada da água livre ocasiona uma perda de peso da madeira, pode provocar também o aparecimento de defeitos, como o colapso em madeiras propensas, e se encontra a teores de umidade superiores ao ponto de saturação das fibras (ANDRADE, 2000; HAYGREEN & BOWYER, 1996; MACKAY & OLIVEIRA, 1989 e SIMPSON, 1991).

O ponto de saturação das fibras (PSF) é o teor de umidade referente ao estado em que, teoricamente, apenas as paredes celulares estão saturadas, ao passo que toda a água capilar já foi eliminada, estando os lumes e espaços intercelulares sem o líquido (HAYGREEN & BOWYER, 1996; ROZAS MELLADO, 1993; SANTINI, 1996; SIMPSON, 1991 e SKAAR, 1988). A Figura 3 é uma representação esquemática do PSF.



Figura 3. Diagrama esquemático mostrando uma representação idealizada da distribuição de umidade nas células de madeira seccionada acima, no e abaixo do ponto de saturação das fibras (SKAAR, 1988).

Simpson (1991) afirma que o PSF para as espécies em geral está aproximadamente em torno de 30% de umidade. Kollmann & Côte (1968) citam que o PSF

varia desde 22 a 24% para coníferas com alto teor de resina e folhosas com cerne distinto e porosidade em anel circular, até 32 a 35% para folhosas com porosidade difusa, cerne indistinto, alburno com porosidade em anel, e para folhosas com cerne distinto e porosidade em anel semicircular.

Simpson (1991) afirma que o PSF é importante para a secagem da madeira pelas seguintes razões: (1) para evaporar a água das paredes celulares é necessário maior energia do que para evaporar a água dos lumes celulares (aproximadamente 5% mais a 15% de umidade e 15% mais a 6% de umidade); (2) a parede celular não irá contrair até alcançar o PSF; e (3) grandes mudanças nas propriedades físicas e mecânicas começam a ocorrer no PSF.

Para Galvão & Jankowsky (1988), Rozas Mellado (1993) e Santini (1996), o PSF da madeira é de grande importância devido às mudanças que começam a manifestar abaixo do mesmo: alterações na resistência mecânica, nas propriedades físicas e contrações. Por isso, a água higroscópica exerce um papel importante no uso da madeira.

3.3.1.1 Movimento de umidade acima do ponto de saturação das fibras

O movimento de líquidos acima do ponto de saturação das fibras é causado por forças capilares e regido pela lei de Hagen-Poiseuille (KOLLMANN & CÔTE, 1968; SIAU, 1971).

Segundo Kollmann & Côte (1968), Simpson (1991) e Tomaselli (1981), em um capilar completamente cheio o movimento da água capilar é produzido pelas diferenças existentes em tensão devido às forças existentes na superfície do menisco dentro do capilar. A força de tensão “T” em um menisco balanceado de um capilar com raio “r”, pode ser calculado utilizando-se a equação (2). Desconsidera-se neste caso as diferenças na pressão do ar existente dentro do capilar.

$$T = H * \rho = \frac{2\sigma}{\rho * r} * \rho = \frac{2\sigma}{r} \quad (2)$$

onde:

T - tensão capilar, Kgf/cm^2 ;

H - altura a que o líquido sobe no capilar, cm ;

ρ - massa específica do líquido, g/cm^3 ;

σ - tensão superficial do líquido, Kgf/cm ;

r - raio capilar, cm .

A equação (2) estabelece que a tensão capilar é diretamente proporcional a tensão superficial da interface ar-água, e inversamente proporcional ao raio da curvatura.

Segundo Cavalcante (1991), Santini (1996) e Severo (1998), quando existe dentro de um tubo capilar um menisco balanceado (côncavo) e um não balanceado (quase plano), como mostra a Figura 4, o movimento do líquido é provocado pelas diferenças em tensão existente entre estes dois meniscos.

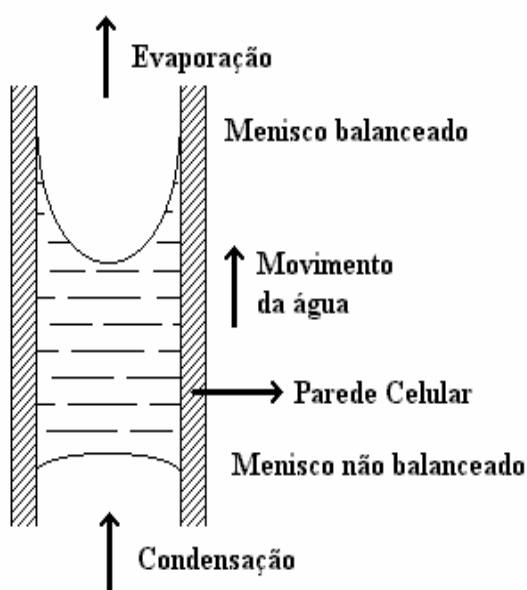


Figura 4. Esquema simplificado do movimento de água em um capilar (KOLLMANN & COTE, 1968).

Lisboa (1986¹) explica que quando a interface ar-água é plana, existe uma maior tendência das moléculas de água, perto da superfície, escaparem, comparada com a tendência de escape na superfície côncava. Aliado a esse fato, as moléculas que escapam da superfície curva podem colidir em outro local da mesma superfície e serem recapturadas. Uma menor quantidade de moléculas poderá escapar de uma superfície côncava do que da plana, então a pressão de vapor sobre a primeira será menor do que sobre a última.

Como a pressão de vapor sobre o menisco balanceado é menor que a pressão de vapor sobre o menisco não balanceado, existe portanto o movimento de água capilar na direção do menisco mais côncavo em função do gradiente de pressão criado pela evaporação na superfície superior e condensação na inferior.

Quando a pressão de vapor diminui com o decréscimo do diâmetro do capilar, a tensão superficial aumenta e conseqüentemente aumenta a tensão capilar. Numa rede de tubos capilares de diferentes diâmetros, ocorrem forças de tensão nos meniscos balanceados. Deste modo, os tubos estreitos tiram líquido dos tubos mais largos.

Tomaselli (1981), afirma que na realidade o movimento de água capilar na madeira é mais complexo devido à existência de bolhas de ar no interior das células.

Segundo Hart (1965), o teor de umidade em madeiras recém abatidas é bem abaixo do máximo teor de umidade que as células poderiam conter devido à existência de substancial quantidade de bolhas de ar.

Siau (1971) e Tomaselli (1981), afirmam que a existência de bolhas de ar no interior da madeira diminui o fluxo capilar de maneira bastante significativa.

Os mesmos autores explicam o fenômeno da seguinte forma: (1) Quando o raio capilar é menor que o diâmetro de uma bolha de ar, a tensão capilar no sistema celular promove a expansão desta bolha. A expansão das bolhas de ar promovem o alívio da tensão capilar e conseqüentemente a diminuição do fluxo de água capilar; e (2) Quando uma bolha de ar é forçada a passar na abertura de uma pontoação, a interface ar-água desta bolha em forma de uma esfera deve ser deformada de tal forma que o raio inicial do menisco ar-água

¹ LISBÔA, C.D.J. **Escoamento de água na madeira: capilaridade**. Curitiba: Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 1986. 91p. (Seminário apresentado à Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal). Não publicado.

se iguale ao raio da abertura da pontuação o que torna necessário uma considerável pressão, ocasionando redução do movimento de água livre.

3.3.1.2 Movimento de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras

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. Esse fenômeno, de forma geral, é um processo que envolve o transporte molecular de um lugar para outro, desde uma região de maior concentração para uma de menor concentração, num esforço de alcançar o equilíbrio (HART, 1965; SIMPSON, 1991).

O movimento de difusão pode ocorrer por três caminhos diferentes dependendo do estado e o local em que se encontra a água na madeira. Segundo Hart (1965) e Simpson (1991) o movimento pode ser por difusão de vapor d'água, difusão de água higroscópica e como uma combinação de ambos, como esquematizado na Figura 5.

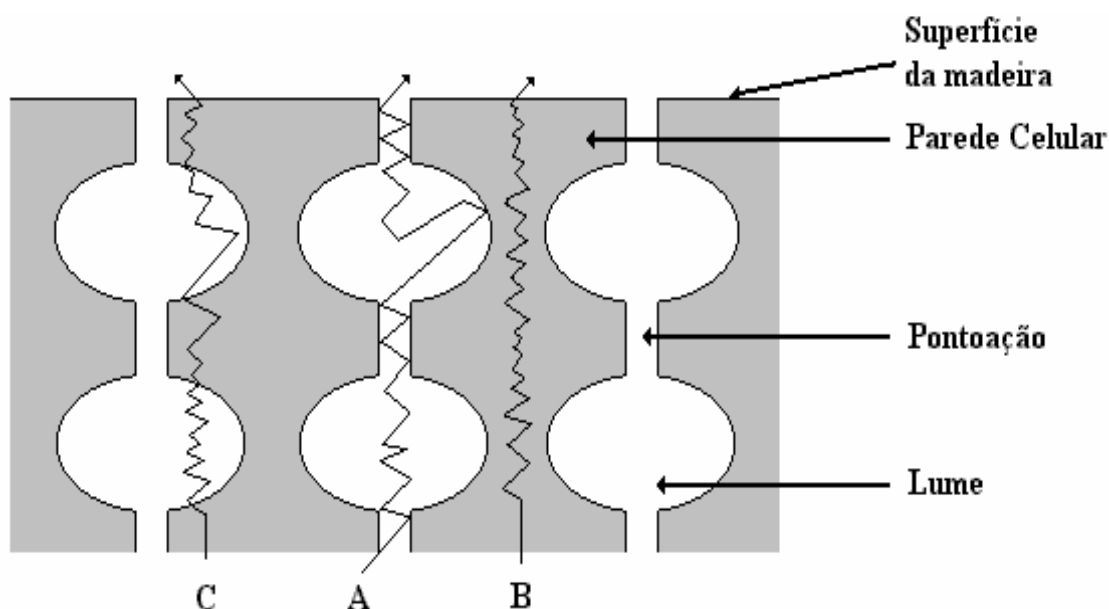


Figura 5. Esquema simplificado sobre os caminhos de difusão: A) difusão de vapor d'água (Lume/Pontuação/Lume); B) difusão de água higroscópica (Parede); e C) difusão combinada de água higroscópica e vapor d'água (Parede/Lume/Parede).

Segundo Siau (1971), caso o fluxo e o gradiente de umidade sejam considerados constantes no espaço e no tempo, a difusão de vapor d'água na madeira é governado pela primeira lei de Fick. O mesmo autor afirma que o movimento do fluxo de umidade é diretamente proporcional ao gradiente de concentração de umidade na direção do fluxo, e a constante de proporcionalidade é o coeficiente de difusão. Deste modo o coeficiente de condutividade por difusão para o movimento da água higroscópica na madeira é igual ao fluxo dividido pelo gradiente, como mostra a equação (3).

$$Kd = \frac{m / (t * A)}{\Delta M / L} = \frac{m * L}{t * A * \Delta M} \quad (3)$$

onde:

Kd - coeficiente de condutividade por difusão do vapor da água na madeira, g/cm s %;

m - massa de vapor da 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 transversal do corpo de prova perpendicular à direção do fluxo, cm²;

ΔM - diferença de umidade entre as superfícies paralelas separadas pela distância L, %.

A diferença do conteúdo de umidade pode ser expressa como a diferença de concentração em gramas de umidade por centímetro cúbico de madeira úmida. Assim, o coeficiente de difusão na madeira pode ser determinado, através da equação (4):

$$Dg = \frac{m / (t * A)}{\Delta g / L} = \frac{m * L}{t * A * \Delta g} \quad (4)$$

onde:

Dg - coeficiente de difusão do vapor d'água na madeira, cm²/s;

Δg - diferença de concentração de umidade, g/cm³.

Os valores calculados teoricamente pela equação de Fick representam aproximadamente o dobro dos valores experimentais no sentido longitudinal e 30 vezes no sentido tangencial, uma vez que o fluxo não é constante no espaço e no tempo (ROZAS MELLADO, 1993 e TOMASELLI, 1981).

Moreschi (1975²) e Tomaselli (1974), citado por Rozas Mellado (1993), atribuem essa discrepância ao fenômeno de difusão impedida, o qual ocorre nas aberturas minúsculas das pontoações cujo diâmetro é menor que o caminho livre médio das moléculas de gás. Neste caso as moléculas que entram na abertura chocam-se com a parede lateral do capilar e são adsorvidas, fato que dificulta o transporte das moléculas quando comparado com a difusão através de capilares de diâmetros maiores, como os lúmens celulares.

Como o fluxo e o gradiente de umidade são variáveis no tempo e no espaço, durante a secagem da madeira, a segunda lei de Fick expressa melhor o fluxo de difusão, como mostra a equação (5). Essa equação considera um coeficiente de difusão médio para a madeira.

$$\frac{dM}{dt} = Dg_M * \frac{d^2 M}{dx^2} \quad (5)$$

onde:

dM / dt - quantidade de água removida (M) na unidade de tempo (t);

Dg_M - coeficiente de difusão médio, cm^2/s ;

d^2M / dx^2 - variação da umidade na distância (x).

Kollmann (1959), afirma que Stamm efetuou o cálculo do comportamento do coeficiente de difusão perpendicular às fibras em função da umidade, para madeiras de diferentes massas específicas. Para Stamm, citado por Kollmann (1959), o coeficiente de difusão médio da madeira desde o ponto de saturação das fibras até qualquer umidade intermediária é obtido através da integração gráfica da curva do coeficiente de difusão dividindo pela amplitude de umidade verificada durante a secagem.

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

² MORESCHI, J.C. **Relação água madeira e sua secagem**. Curitiba: Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, (1975). 91p. (Apostila apresentada à Disciplina Relação Água-Madeira, do curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal). Não publicado.

Simpson (1991) afirma que o fluxo de água no sentido longitudinal é aproximadamente 10 a 15 vezes mais rápida que no sentido transversal. Porém, na prática a saída de maior volume de água higroscópica durante o processo de secagem se dá pela secção transversal da peça de madeira, uma vez que a espessura da tábua é muito menor que o comprimento da mesma.

O mesmo autor afirma que a difusão radial é um tanto maior que a tangencial, fato esse que explica a secagem mais rápida de uma face em relação à outra na peça de madeira e a contração diferenciada nas duas direções.

3.3.2 Processo de secagem de eucalipto

As madeiras de eucalipto geralmente secam lentamente. A maioria das espécies de eucalipto tem massa específica básica entre 0,5 e 0,8 g/cm³ e são relativamente impermeáveis e de difícil secagem (VERMAAS, 1995).

Para Jankowsky et al. (2000) e Santos, G. (2002), o acentuado gradiente de umidade gera tensões internas que resultam na ocorrência do colapso e nas rachaduras de topo e de superfície. Essa é a razão para que o eucalipto seja conhecido como madeira de secagem lenta e difícil, e com alta propensão à defeitos de secagem.

Segundo Jankowsky et al. (2000, p.C2-3), “a permeabilidade reduzida implica na necessidade de uma secagem lenta e no desenvolvimento, durante o processo, de gradientes de umidade acima do normal.”

Andrade (2000), estudando programas de secagem convencional de *Eucalyptus grandis* salienta que a adoção de um programa mais drástico implica em redução do padrão de qualidade da madeira seca, pelo aumento na incidência de arqueamento e rachaduras de topo.

O mesmo autor cita que para a utilização de programas mais agressivos, que reduzirão o tempo de secagem, recomenda-se que a madeira seja submetida a uma pré-secagem anterior à secagem convencional.

A secagem convencional é a conhecida secagem em estufa, onde são controladas a temperatura e a umidade relativa, e a combinação dessas duas características,

associadas a movimentação de ar faz com que a secagem seja processada de forma muito mais rápida. Esse é o melhor método quando são necessárias madeiras secas próximas à umidade de equilíbrio (GALVÃO & JANKOWSKY, 1988).

No caso da secagem da madeira de eucaliptos desde seu estado verde até o teor de umidade final em estufa convencional, vários autores recomendam sempre iniciar a secagem com temperaturas inferiores a 45°C e, posteriormente, mantê-la até que toda a água capilar seja removida da madeira (HARTLEY & GOUCH, 1990).

Na fase final da secagem, ou seja, abaixo do PSF, em torno de 25% de umidade, até a madeira atingir o teor de umidade final de 10-12% de umidade, a secagem desta espécie não é mais problemática e a temperatura pode ser aumentada consideravelmente nesta fase (CHRISTENSEN, 1984).

De acordo com Christensen (1985), a secagem final da madeira de *Eucalyptus spp*, com espessura de 25-50 mm, pode ser completada com temperaturas de até 110°C sem maiores problemas para qualidade da madeira.

Neuman (1989), comenta que é possível secar madeira de *Eucalyptus globulos* com 30 mm de espessura através de um sistema misto de pré-secagem e secagem a alta temperatura. Neste caso, o tempo de secagem é de aproximadamente 35 dias para secar desde 70 % até 21% à uma temperatura inicial de 22,5°C e final de 35°C. Já para secar de 21% até 10%, com uma temperatura de 110°C, o tempo de secagem seria de 20 horas.

Estudo conduzido por Rozas Mellado (1993) com madeira de *Eucalyptus grandis* com 30 mm de espessura mostra que para secar esta espécie desde 97,6% até 7,6% de umidade final leva-se aproximadamente 26 dias. O que corresponde a uma velocidade de secagem de aproximadamente 3,5 %/dia.

3.3.3 Defeitos de secagem

Há uma série de defeitos que podem aparecer durante a secagem ao ar livre e em estufa, reduzindo o valor e o volume da madeira de boa qualidade a ser comercializada (PONCE & WATAI, 1985).

Para Simpson (1991), o sucesso da secagem convencional pode depender da cumplicidade das causas dos defeitos em madeiras e dos métodos para prevenir sua ocorrência. O mesmo autor afirma que o principal objetivo da secagem da madeira é o menor desenvolvimento de defeitos possível.

Segundo Ducatti (2000), para as indústrias que utilizam a secagem convencional de madeiras atinjam um padrão de qualidade superior e que mantenham a sua posterior manutenção é necessário a execução de procedimentos voltados ao controle de qualidade, principalmente ao que se refere à quantificação de defeitos, distribuição de umidade e as tensões residuais nas peças de madeira.

Segundo Ponce & Watai (1985), na secagem, a madeira atinge umidades abaixo do ponto de saturação das fibras, começando a se contrair de maneira irregular, de acordo com três planos: radial, tangencial e longitudinal. Galvão e Jankowsky (1988), ainda afirmam que as tensões que se desenvolvem na madeira são a causa básica dos defeitos de secagem.

Os principais tipos de defeitos gerados durante o processo de secagem são: rachaduras, empenamentos, colapso, etc (ANDRADE, 2000; CINIGLIO, 1998; GALVÃO & JANKOWSKY, 1988; PONCE & WATAI, 1985; SIMPSON, 1991; e VERMAAS, 1995). Estes defeitos estão esquematizados na Figura 6.

Galvão & Jankowsky (1988) e Simpson (1991), citam que as rachaduras aparecem como consequência da diferença de retração nas direções radial e tangencial da madeira e de diferenças de umidades na mesma peça de madeira, durante o processo de secagem. Para os mesmos autores, os empenamentos são definidos como qualquer distorção da peça de madeira em relação aos planos originais de suas superfícies.

Simpson (1991), cita que os empenamentos podem ter duas causas: diferenças entre as contrações tangencial, radial e longitudinal na peça durante a secagem e/ou tensões de crescimento. O mesmo autor afirma que os empenamentos são agravados pela grã irregular ou distorcida e pela presença anormal de madeira juvenil e de madeira de reação.

O colapso é uma distorção, achatamento ou rompimento das células da madeira (SANTOS, 1998 e SIMPSON, 1991). Galvão e Jankowsky (1988) afirmam que o colapso é ocasionado pelas forças geradas durante a movimentação de água capilar, as quais deformam as células. Os fatores que influem no colapso são: pequeno diâmetro dos capilares;

baixa massa específica da madeira; alta tensão superficial do líquido que é removido pela madeira; e altas temperaturas no início da secagem.

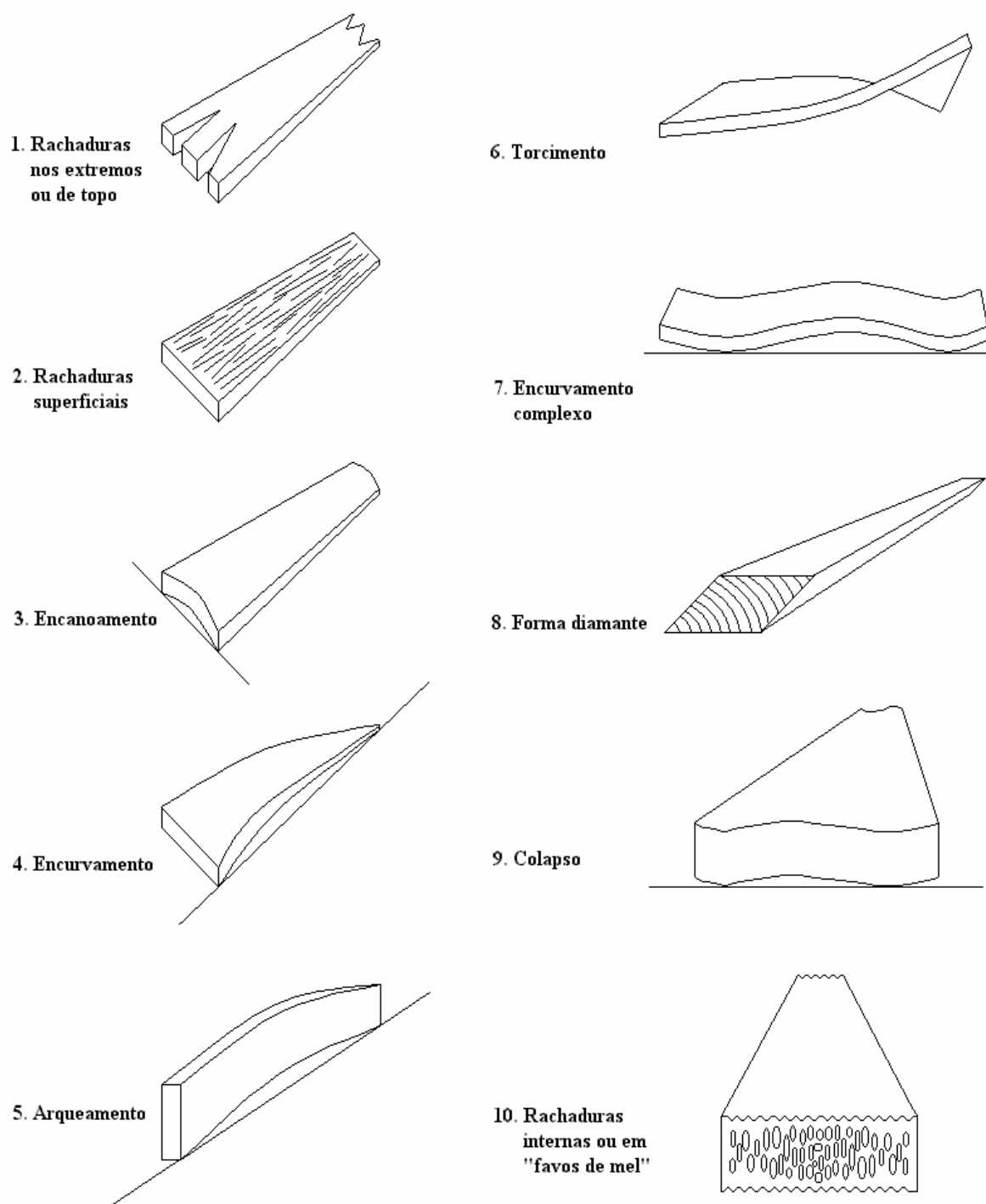


Figura 6. Principais tipos de defeitos que ocorrem na madeira durante sua secagem.

Segundo Vermaas (1995), as madeiras de eucalipto jovem e adulto apresentam similaridades no desenvolvimento de defeitos de secagem, entretanto as madeiras jovens apresentam menor massa específica e espécies com madeiras de baixa massa específica tendem a colapsar mais em relação àquelas com maiores massas específicas.

Rozas Mellado (1993), Severo (1998) e Simpson (1991) entre outros autores, constataram que o colapso está diretamente associado com as altas temperaturas no início da secagem. Cavalcante (1991), estudando as espécies *E. grandis* e *E. saligna*, verificou que a temperatura de secagem é um fator decisivo para a ocorrência do colapso sendo que a intensidade desse defeito aumenta com o aumento da temperatura de secagem.

Severo (1998) e Vermaas (1995) recomendam, para a secagem do gênero *Eucalyptus*, a utilização de temperaturas iniciais inferiores à 45°C. Rozas Mellado (1993) explica que a baixa percentagem de colapso na madeira de *Eucalyptus grandis*, encontrada em seu estudo, se deve principalmente à menor temperatura inicial utilizada (40°C) para secar a madeira.

Simpson (1991), afirma que na maioria dos casos o colapso pode ser removido pelo condicionamento ou vaporização após a secagem. A aplicação de vapor se dá à 100°C de temperatura e 100% de umidade relativa durante 4 a 8 horas.

Oliveira (1997), afirma que a técnica de pré-aquecimento ou pré-ebulição em amostras de cerne de *E. regnans* contorna os problemas das contrações conseqüentes de colapso e minimiza a perda de volume nos produtos de madeira, face ao aumento na quantidade de colapso recuperável.

Severo (2000), estudando aplicação de vapor preliminar à secagem convencional de *Eucalyptus dunnii* recomenda não usar temperaturas acima de 45°C nas fases iniciais da secagem e a realizar a vaporização para reduzir a incidência de defeitos, principalmente o colapso.

Rozas Mellado (1993), estudando a quantificação de defeitos de madeira serrada de *E. grandis* com 30mm de espessura após a secagem através do emprego de programas suaves (temperatura inicial da secagem de 40°C) e de programas severos (temperatura inicial da secagem de 45°C) concluiu que o programa que apresentou menor incidência de defeitos foi o que manteve a temperatura inicial de secagem de 40°C.

Severo (1998), em estudo similar, concluiu para a espécie de *E. dunnii* com 24mm de espessura, que o programa que apresentou menor incidência de defeitos foi o que manteve a temperatura inicial de secagem abaixo de 45°C quando comparado com aquele cuja temperatura inicial igualava à 50°C. Entretanto, os defeitos apresentaram-se na seguinte ordem de importância: colapso, encanoamentos e rachaduras.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Espécie utilizada

Foram estudadas árvores de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden com 30 anos de idade. Essa espécie ocorre naturalmente na Austrália, nos estados de Nova Gales do Sul e Queenslândia, em áreas de altitude entre 300 a 900 metros e a temperatura média do mês mais quente compreendida em torno de 30°C e a do mês mais frio em 6°C (GOES, 1985).

O material coletado para o presente estudo é proveniente da Floresta Estadual de Santa Bárbara pertencente ao Instituto Florestal – Seção de Manduri, localizada em Águas de Santa Bárbara, cujo plantio foi realizado em 1973. A altitude do local varia de 600 a 688 metros e a temperatura média anual é de 19,8°C. A área em estudo, com 2,2 hectares, possuía espaçamento inicial de 2,0 m x 3,0 m e passou por 3 (três) desbastes seletivos antes da coleta do material.

4.2 Coleta do material

A coleta do material envolveu o abate ao acaso de 14 (quatorze) árvores de *Eucalyptus grandis*.

Para este estudo foram utilizadas toras agrupadas nas seguintes classes de diâmetro: 20 a <25cm, 25 a <30cm e 30 a <35cm.

A operação de abate foi realizada com motosserra e as árvores foram cortadas o mais próximo do solo.

As árvores foram traçadas a cada 2,9m de comprimento e entre as toras foram retirados discos de 5cm de espessura, sendo o primeiro localizado na base da árvore.

Todo o material foi identificado por lápis cópia e os discos armazenados em sacos plásticos. A Figura 7 é um esquema simplificado da coleta das toras e dos discos numa árvore.

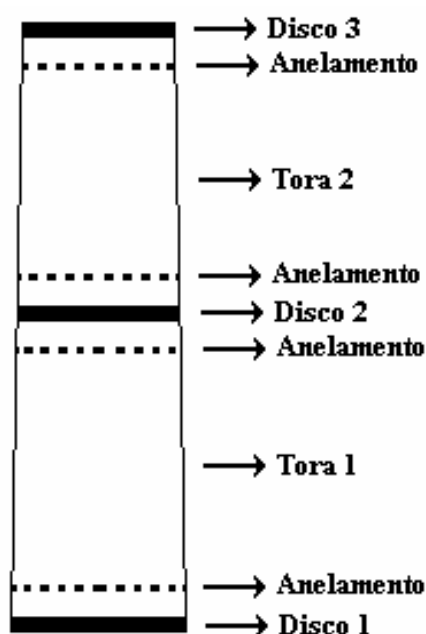


Figura 7. Esquema simplificado da coleta do material.

4.3 Determinação do teor de umidade e da massa específica das toras

Tanto o ensaio de determinação de massa específica básica quanto o de umidade das toras, foram realizados em todos os discos coletados entre as toras. Posteriormente, uma média simples entre a massa específica básica dos discos entre toras e o teor de umidade médio de cada um deles, representou cada tora envolvida no estudo.

Para a verificação dessas variáveis utilizou-se uma balança de precisão de 0,1g e uma estufa com regulagem de temperatura à $103\pm 2^{\circ}\text{C}$.

A massa específica básica foi determinada pelo método de pesagem através da equação (6):

$$M_{eb} = \frac{M_s}{V_U} \quad (6)$$

onde:

M_{eb} - massa específica básica, g/cm^3 ;

M_s - massa seca em estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ até peso constante, g;

V_U - volume no estado verde, cm^3 .

O teor de umidade inicial com base em massa seca foi determinado pelo método da estufa e através do uso da equação (7):

$$U \% = \frac{M_U - M_s}{M_s} * 100 \quad (7)$$

onde:

$U\%$ - teor de umidade da madeira, %;

M_U - massa úmida, g;

M_s - massa seca em estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ até peso constante, g;

4.4 Tratamentos para alívio das tensões de crescimento

Esses tratamentos constituíram-se em anelamento de todas as toras, realizados no campo, e em vaporização de parte das toras das três classes de diâmetros envolvidas no estudo, no Laboratório de Secagem e Preservação de Madeiras da FCA-UNESP de Botucatu-SP.

4.4.1 Anelamento das toras

As toras de 2,9m de comprimento foram aneladas a 10cm de cada uma das extremidades numa profundidade aproximada de $1/3$ do raio da tora, conforme proposto por Kubler (1987), Rozas Mellado (1993) e Sales (1986). Esse procedimento pode ser observado no esquema simplificado da Figura 8.

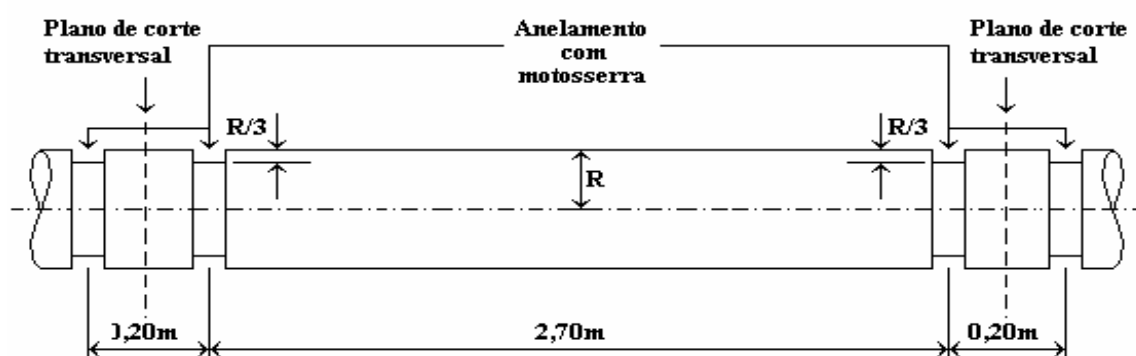


Figura 8. Esquema de anelamento das toras com motosserra.

4.4.2 Vaporização de toras

O fuste, de cada uma das 14 (quatorze) árvores, foi traçado de forma que permitiu a retirada de toras com 2,9 m de comprimento, as quais foram agrupadas em três classes de diâmetro. Todas as toras de 7 (sete) árvores foram mantidas como controle e as das árvores restantes foram submetidas ao tratamento de vaporização.

O meio vaporizador, neste estudo, foi a estufa de secagem convencional do Laboratório de Secagem e Preservação de Madeiras – FCA-UNESP, que devido à presença de uma caldeira capaz de gerar vapor com 8kgf/cm^2 de pressão teve a mesma finalidade de um tanque vaporizador de toras.

As toras foram vaporizadas nas seguintes condições: 90°C de temperatura e 100% de umidade relativa, por 20 horas. Segundo Rozas Mellado (1993), para toras de *Eucalyptus grandis* com 15 a 20cm de diâmetro, um período de 18 horas de vaporização é suficiente para aliviar, por completo, as tensões de crescimento da madeira.

4.5 Determinação do tempo de aquecimento de toras

4.5.1 Verificação da temperatura no centro das toras durante a vaporização

4.5.1.1 Construção dos termopares

Os termopares tipo “T” (cobre X constantan) foram construídos através da união de ambos termoelementos utilizando-se um equipamento de solda elétrica.

Após a construção dos termopares, estes foram submetidos a teste de 0°C e 100°C que representam os pontos de gelo fundente e água em ebulição, respectivamente.

Os valores obtidos foram em média de 0,31°C e 97,40°C para o ponto de gelo fundente e água em ebulição, respectivamente.

4.5.1.2 Processo de furação das toras e acondicionamento dos termopares

Cada tora recebeu 1 (um) termopar. Para tanto, foram realizados furos com bitolas escalonadas devido à utilização de brocas com dimensões específicas, o que proporcionou a colocação do termopar no centro de cada tora e facilitou o manuseio do sensor de temperatura e dos isolantes térmicos. O esquema simplificado do termo-sensor inserido na tora é mostrado na Figura 9.

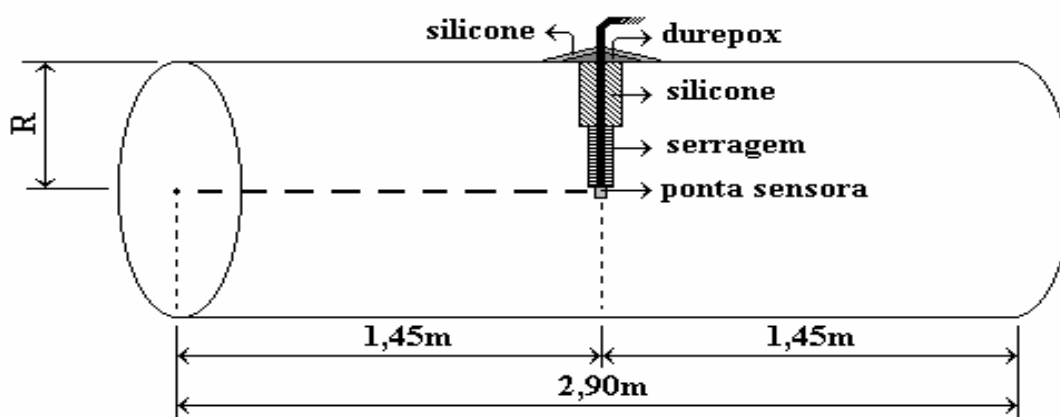


Figura 9. Esquema de um furo para acomodação de um termopar na tora.

Depois da acomodação dos termopares, os orifícios foram vedados com camadas de: serragem, retirada do próprio furo no momento da furação; silicone, material resistente à temperaturas e umidades elevadas; resina durepox, material isolante térmico; e uma película de silicone, resistente à umidade, temperatura e possíveis choques mecânicos.

Cada material isolante foi aplicado durante um intervalo de no mínimo 24 horas, garantindo, dessa maneira, a perfeita fixação dos isolantes na madeira.

A Figura 10 permite a visualização da tora, com o termo-sensor, prontos para o processo de aplicação de vapor.



Figura 10. Termopar inserido na tora de *Eucalyptus grandis*.

4.5.1.3 Monitoramento da temperatura no centro das toras

As toras, das três classes de diâmetro, com os termopares acoplados, foram colocadas no meio vaporizador através do auxílio de um guincho denominado “girafa”, como mostra a Figura 11.



Figura 11. Guincho utilizado para a colocação das toras no meio vaporizador.

O comportamento da temperatura nas toras foi verificado e monitorado pelos termopares acoplados em uma base coletora de dados (Datalogger Micrologger 21X), como mostrado na Figura 12.

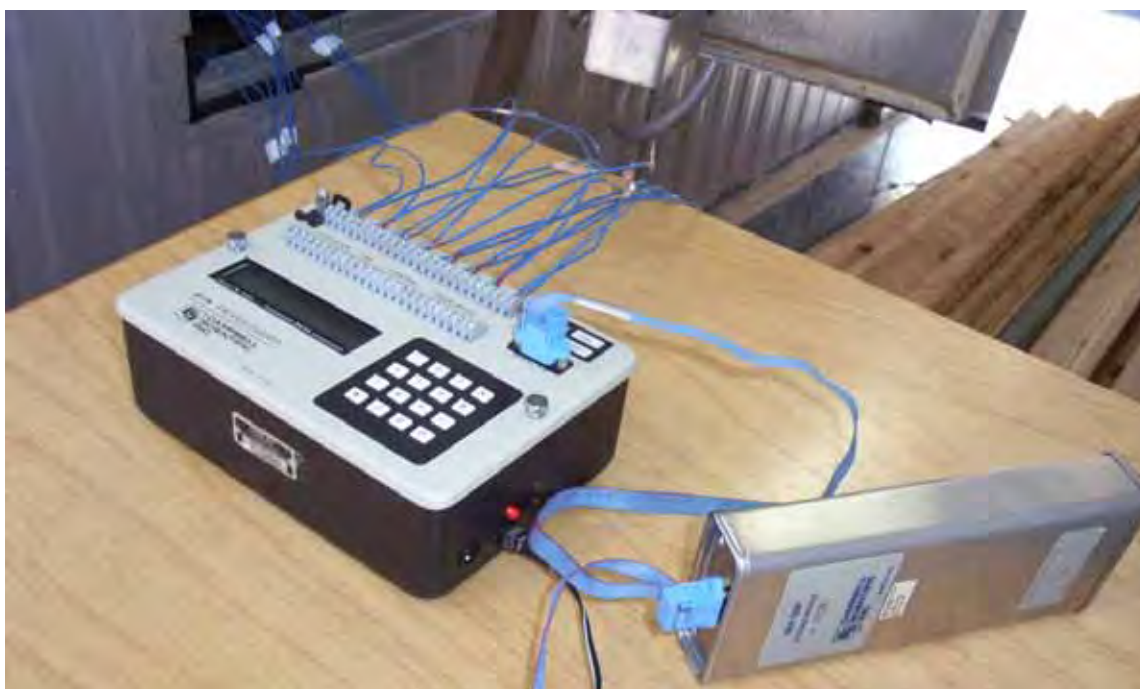


Figura 12. “Datalogger” acoplado aos termopares inseridos nas toras de *E. grandis*.

4.5.2 Modelo proposto por Steinhagen

O tempo real de vaporização, determinado pelo comportamento da temperatura verificado através do uso de termopares do tipo “T”, foi comparado com a determinação do tempo de aquecimento de toras proposto por Steinhagen et al. (1980), como mostram as equações (8) e (9) e descrito detalhadamente no Apêndice (1).

$$t' = \frac{F * R^2}{D^2} \quad (8)$$

onde:

t' - tempo de aquecimento das toras, horas;

F - número de Furier;

R - raio médio das toras, m;

D - difusividade térmica média das toras, m².h⁻¹.

$$D = d * Fa \quad (9)$$

onde:

d - difusividade térmica, m².h⁻¹;

Fa - fator de ajuste, em função do teor de umidade e da massa específica básica das toras.

4.6 Desdobro das toras

4.6.1 Sistema de corte utilizado

Todas as toras (controle e vaporizadas) foram desdobradas em tábuas tangenciais conforme sistema de corte apresentado na Figura 13. O sistema de corte utilizado para a obtenção das tábuas tangenciais é o mesmo utilizado por Montagna et al. (1991) e proposto por Acosta (1999) para o gênero *Eucalyptus*.

A serraria está localizada no horto florestal de Manduri, e para a confecção de blocos foi utilizada uma serra de fita dupla com as seguintes características: Diâmetro dos volantes: 1,10 m; Largura dos volantes: 11,5 cm; Dimensão da polia do motor:

27 cm; Dimensão da polia do volante: 38 cm; RPM do motor: 1170 rpm; Potência do motor: 22 Kw = 29,9 Hp; Altura de corte máximo da serra: 35,36 cm; Espessura da lâmina de serra: 1,3 mm e Largura de corte da serra: 3,2 mm.

As tábuas com 28 mm de espessura foram confeccionadas com uma re-serra de fita com as seguintes características: Diâmetro dos volantes: 1,10 m; Largura dos volantes: 11,5 cm; Dimensão da polia do motor: 27 cm; Dimensão da polia do volante: 38 cm; RPM do motor: 1175 rpm; Potência do motor: 18,5 Kw = 25,15 Hp; Espessura da lâmina de serra: 1,2 mm e Largura de corte da serra: 3,2 mm.

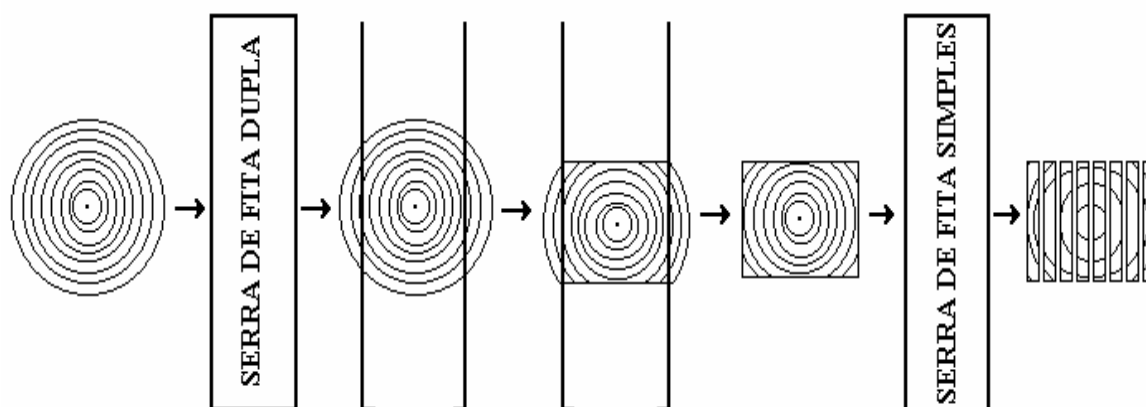


Figura 13. Método de desdobro visando a obtenção de peças tangenciais baseado em serras de fita geminada e simples.

Como as toras desdobradas estavam agrupadas nas classes de diâmetro de 20 a <25cm, de 25 a <30cm e de 30 a <35cm, obtivemos tábuas com larguras de 14,0cm, de 17,5cm e de 21,0cm respectivamente definidas de acordo com as dimensões dos blocos. O esquema simplificado pode ser verificado na Figura 14.

Com a adoção desse critério podemos otimizar o desdobro e a obtenção de madeira serrada e avaliar o efeito da vaporização na qualidade do desdobro e o efeito do diâmetro das toras na qualidade dos serrados.

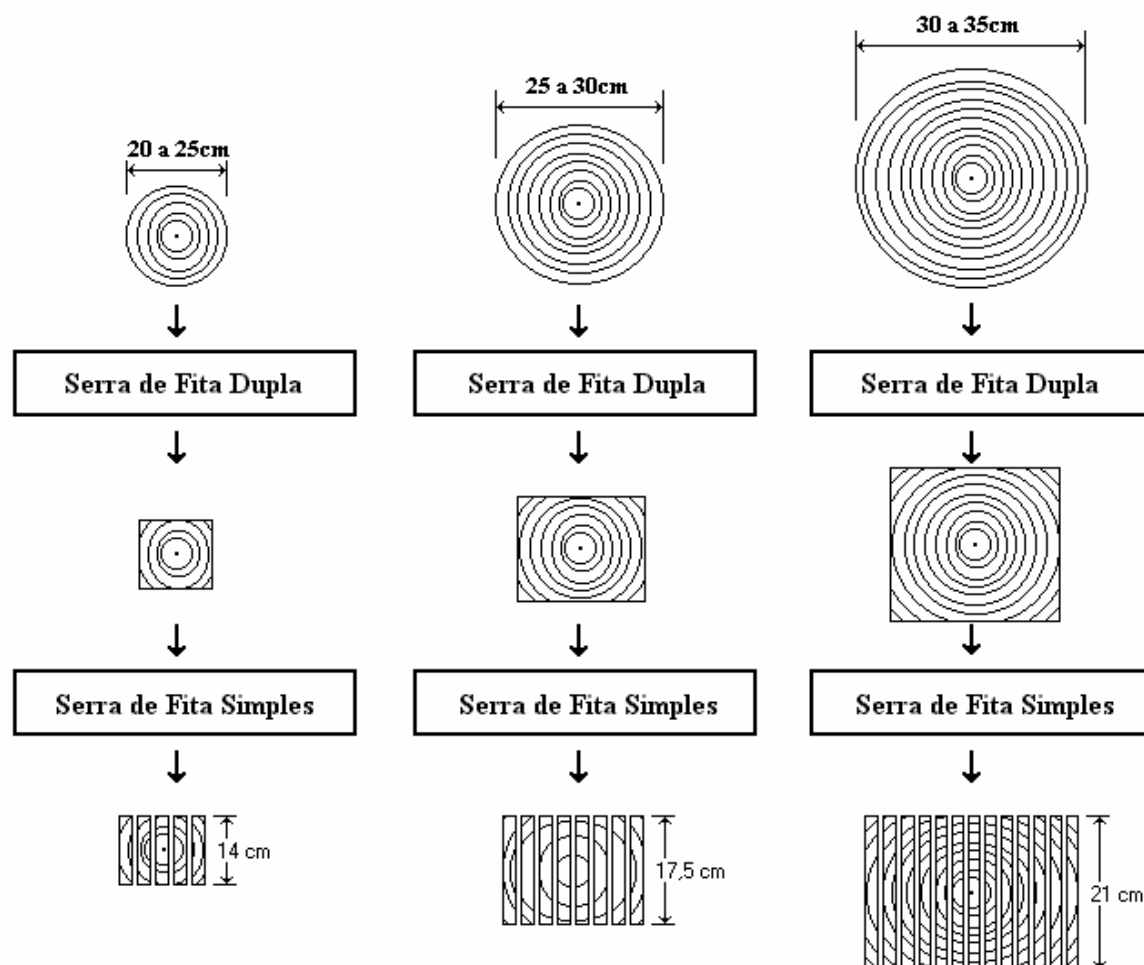


Figura 14. Esquema da obtenção de peças com larguras definidas pelo diâmetro das toras.

4.6.2 Avaliação das tensões de crescimento

Para avaliação das tensões de crescimento levou-se em consideração a forma como estas tensões manifestaram-se na madeira serrada, ou seja: rachaduras, abertura das tábuas em relação ao bloco no momento do desdobro e empenamentos.

Para avaliação das rachaduras foram medidos o comprimento e a largura das rachaduras nas tábuas, tanto na entrada como na saída da serra (dois extremos das tábuas). O esquema dessas medições pode ser verificado na Figura 15.

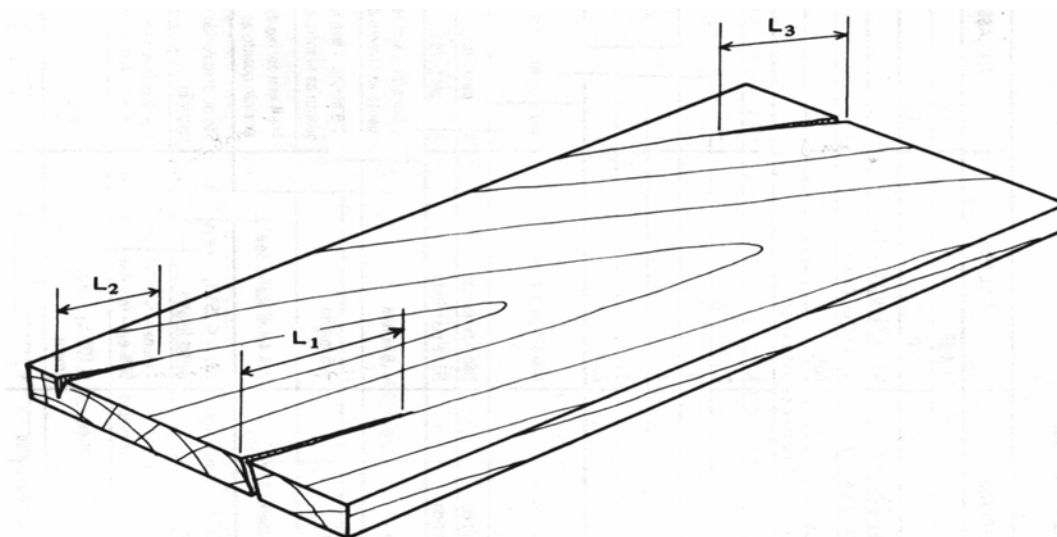


Figura 15. Esquema de medição do comprimento de rachadura de uma tábua após o desdobro.

A abertura da tábua em relação ao bloco foi tomada quando a serra fita simples encontrava-se à cerca de 2,0 metros do comprimento final da tábua. A medição desse defeito pode ser visualizada na Figura 16.



Figura 16. Medição da abertura da tábua em relação ao bloco no desdobro.

4.7 Secagem da madeira

4.7.1 Equipamento de secagem

A secagem da madeira foi realizada em uma estufa piloto de secagem com as dimensões úteis de 2,5 m x 3,0 m x 3,0 m, largura, altura e comprimento, respectivamente, com capacidade para aproximadamente 2,5 m³ de madeira serrada.

A estufa possui um sistema de aquecimento através de resistência elétrica que permite o alcance de uma temperatura máxima de 130 °C; um sistema de umidificação por vapor a baixa pressão (1 a 2 Kgf/cm²) ou por pulverização; uma caldeira elétrica da marca ETNA com capacidade de geração de vapor de 30 Kgf/h e uma pressão máxima de trabalho de 8 Kgf/cm²; um sistema de circulação de ar superior com 3 ventiladores de 3 cavalos vapor cada, controlado por inversor de frequência com capacidade de variação de velocidade do ar de 0,5 a 8 m/s; e um sistema de ventilação através de chaminés, controlado por um sistema de válvulas proporcionais.

A estufa possui ainda um sistema de gerenciamento do processo de secagem composto por um microcomputador e um programa específico denominado LIGNOMAT.

O “software”, como elemento dinâmico do sistema, permite uma configuração pelo usuário que consiste na colocação do programa de secagem desejado com suas respectivas temperaturas e umidade de equilíbrio nos intervalos de umidade requerido, bem como o teor de umidade inicial da carga de madeira e a umidade final desejada.

Após esta configuração, o “software” tem como função comandar o “hardware”, realizar as leituras dos sensores, o processamento e o registro dos dados, o acionamento do sistema de aquecimento, ventilação e umidificação da estufa com base nas informações coletadas e configuração previamente estabelecida.

A Figura 17 permite a visualização geral da estufa de secagem e também apresenta vistas específicas do sistema de aquecimento, umidificação e circulação do ar.



Figura 17. Vista geral da estufa de secagem de madeira e sistemas de: (a) ventilação, (b) umidificação e (c) aquecimento.

4.7.2 Preparo e empilhamento das tábuas

As tábuas de 28 mm de espessura de *Eucalyptus grandis* destinadas à secagem em estufa piloto foram empilhadas de modo gradeado.

O sistema de empilhamento foi realizado através de um carrinho transportador o qual permite uma pilha de madeira com largura máxima de 1,18m. A largura da pilha foi determinada em função do número de tabuas a serem secas.

Para a construção da pilha de madeira foram utilizados separadores de 3cm de altura por 4cm de largura, que permitem perfeita circulação do ar na pilha.

Também foram utilizadas tábuas que não pertencem ao experimento, material denominado “boneco”, o qual tem a função de preencher todos os espaços vazios na pilha que ultrapassam a dimensão dos vãos formados entre tábuas.

4.7.3 Programa de secagem utilizado

O programa de secagem que foi utilizado na secagem em laboratório, para a madeira de *Eucalyptus grandis* com 28 mm de espessura é dado na Tabela 1.

Santos, G. (2002) sugere o programa descrito como um programa geral para a madeira de *Eucalyptus grandis*. Ciniglio (1998) e Andrade (2000) propõem programas de secagem para o gênero eucalipto semelhante ao adotado.

Tabela 1. Programa de secagem para *Eucalyptus grandis* com 28mm de espessura.

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

onde:

Ts - temperatura do bulbo seco, °C;

Tu - temperatura do bulbo úmido, °C;

UR - umidade relativa, %;

UE - umidade de equilíbrio, %;

PS - potencial de secagem.

4.7.4 Avaliação dos defeitos de secagem

A avaliação da qualidade da madeira foi realizada ao término de cada secagem através da análise dos defeitos encontrados nas tábuas.

Os defeitos foram classificados em ausentes, leves e fortes tomando-se como base a norma de classificação de madeira serrada de folhosa (IBDF, 1983) e classificação proposta por Mendes & Severo (1984). Os defeitos avaliados foram:

a) Empenamentos.

O encurvamento e arqueamento foram medidos e quantificados porcentualmente em relação ao comprimento da peça pela equação (10) e conforme pode ser observado na Figura 18.

$$I_{ea} = \frac{x}{L_1} \times 100 \quad (10)$$

onde

I_{ea} = Intensidade do encurvamento ou arqueamento, %;

x = flecha na curvatura da peça, mm;

L_1 = comprimento da tábua, mm.

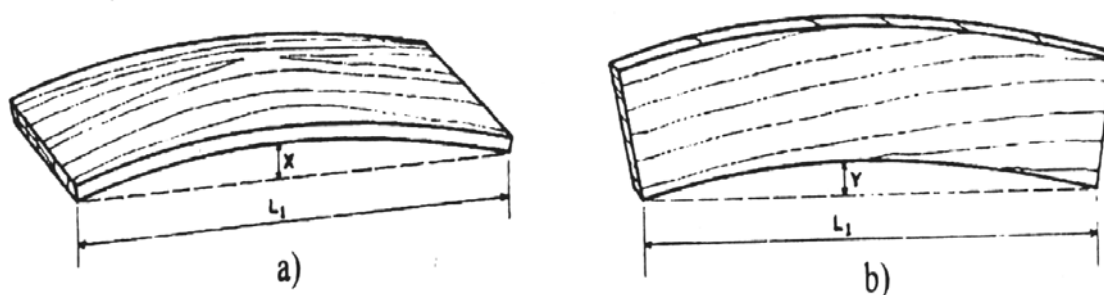


Figura 18. Empenamentos e sua medição: a) encurvamento e b) arqueamento.

O encanoamento foi medido conforme Figura 19 e seus valores foram apresentados como sua flecha máxima em milímetros, segundo metodologia adotada por Rocha (2000).

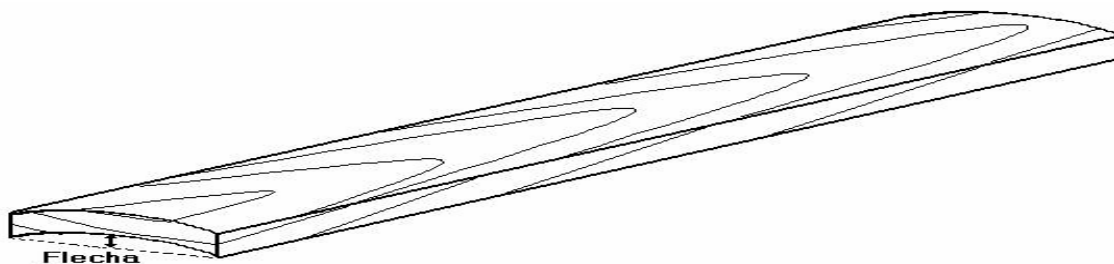


Figura 19. Medição do encanoamento das tábuas.

b) Rachaduras

As rachaduras de topo foram avaliadas e quantificadas considerando-se o somatório dos comprimentos individuais das rachaduras em relação ao comprimento da peça conforme a equação (11):

$$R = \frac{(l_2 + l_3 + \dots + l_n)}{L_1} \times 100 \quad (11)$$

onde:

R - índice representativo das rachaduras, %;

$l_2 + l_3 + \dots + l_n$ - comprimento individual das rachaduras, mm

L_1 - comprimento total da peça, mm.

c) Colapso

A determinação do colapso foi realizada através da remoção de alguns milímetros da superfície da tábua com uma plaina levando-se em consideração os seguintes critérios:

- (1) Madeira livre de colapso: tábuas que após a remoção de 1- 1,5 mm da superfície não apresentarem ondulações na superfície.
- (2) Madeira com colapso leve: tábuas que após a remoção de 2,5 mm da superfície não apresentarem ondulações na superfície.
- (3) Madeira com colapso médio: tábuas que após a remoção de 3,5 mm da superfície não apresentarem ondulações na superfície.
- (4) Madeira com colapso forte: tábuas que apresentarem ondulações na superfície após removido 3,5 mm da superfície.

4.8 Análise estatística

Para a determinação de um fator de correção que permita a melhor utilização do modelo proposto por Steinhagen et al. (1980) foi realizada uma análise de regressão em função da tendência observada dos pares de dados: tempo de aquecimento real em função do tempo de aquecimento obtido pelo modelo geral. Esse procedimento foi adotado para as três classes de diâmetro de toras de *E. grandis* utilizadas no estudo.

A medição das tábuas durante o desdobro indicou que não houve nenhum tipo de empenamento tanto em madeira proveniente de toras controle como de toras vaporizadas. O mesmo não ocorreu para as variáveis abertura das tábuas em relação ao bloco e rachaduras.

No estudo dos defeitos proveniente da secagem de tábuas oriundas de toras controle e vaporizadas, verificou-se a ausência de colapso tanto em madeira proveniente de toras controle quanto de toras vaporizadas. Porém, rachaduras e empenamentos estiveram presentes em todos os tratamentos.

A análise exploratória dos dados, tanto nos obtidos durante o desdobro quanto nos obtidos após a secagem das tábuas, recomendou a adoção de métodos de análise não paramétrica (KRUSKAL-WALLIS) para análise de variância, com tratamentos no esquema fatorial levando-se em consideração o tratamento de vaporização e aplicação do teste de NEMENYI para comparações múltiplas.

Foi realizada essa análise para a abertura das tábuas em relação ao bloco e comprimento e largura das rachaduras produzidas durante o desdobro e para porcentagem de rachaduras nas tábuas, índices dos encurvamento, arqueamento e encanoamento presentes nas tábuas após o processo de secagem.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Massa específica básica e teor de umidade das toras

Conforme metodologia citada anteriormente (item 4.3) determinou-se, para as três classes de diâmetros de toras vaporizadas de *Eucalyptus grandis*, a massa específica básica e o teor de umidade através de uma média simples dos valores obtidos para os discos retirados entre toras.

Como pode ser observado na Tabela 2, as toras antes do processo de vaporização foram agrupadas nas classes de diâmetro de 20 a <25; 25 a <30; e 30 a <35 cm e apresentaram, respectivamente, massa específica básica de $0,604 \pm 0,021 \text{ g/cm}^3$; $0,596 \pm 0,024 \text{ g/cm}^3$; e $0,599 \pm 0,031 \text{ g/cm}^3$. As mesmas classes diamétricas de toras apresentaram teor de umidade da ordem de $69,6 \pm 3,2\%$; $75,3 \pm 5,0\%$; e $75,8 \pm 7,2\%$, respectivamente.

A importância do teor de umidade e da massa específica básica para a determinação do tempo de aquecimento de toras é referenciada por vários autores (MEDINA, 1986; SEVERO, 1998; STEINHAGEN et al., 1980; STEINHAGEN & ROZAS, 1998; TEJADA et al., 1997 e UMANÃ & BRITO, 2003).

Tabela 2. Massa específica básica e teor de umidade com base na massa seca das toras de *Eucalyptus grandis*, antes do processo de vaporização.

Toras de 20-25cm			Toras de 25-30cm			Toras de 30-35			Identificação Ubs		
M.E.	Identificação	Ubs	M.E.	Identificação	Ubs	M.E.	Identificação	Ubs	M.E.	Identificação	Ubs
(Árvore/Tora)	(%)	(g/cm3)	(Árvore/Tora)	(%)	(g/cm3)	(Árvore/Tora)	(%)	(g/cm3)	(Árvore/Tora)	(%)	(g/cm3)
0,579	7/2	82,64	0,577	7/7	65,39	0,603	7/6	65,57	0,605	7/3	77,71
67,91	0,640	8/7	66,14	0,635	7/5	68,65	0,611	8/3	69,35	0,624	8/2
	8/8	65,63	0,634	8/5	65,88	0,624	8/4	68,54	0,618		10/5
74,37	0,599	8/6	67,54	0,624	10/1	78,65	0,601	10/6	71,51	0,611	10/2
	84,15	0,577	11/1	67,80	0,642		10/7	72,86	0,604	10/3	80,81
0,578	11/2	87,96	0,543		10/8	68,99	0,604	10/4	78,20	0,586	11/3
86,31	0,545	11/6	74,20	0,570	11/4	83,91	0,555	12/1	70,88	0,596	11/7
	11/7	72,81	0,564	11/5	76,47	0,568	12/2	79,45	0,588		11/8
69,65	0,575	12/4	76,47	0,583	12/3	77,23	0,587	12/7	72,31	0,591	12/5
	74,92	0,589	13/1	69,39	0,615		12/8	67,39	0,612	12/6	73,26
0,594	13/2	79,43	0,611		13/6	70,60	0,621	13/3	77,00	0,592	13/7
Média	75,81	0,599		13/7	69,18	0,613	13/4	76,27	0,594	D.P. ou s	13/5
7,23	0,031	14/4	67,10	0,620	13/5	74,59	0,605	Coef.Var.		(%)	14/1
9,54	5,200	Média	69,61	0,604	14/1	71,82	0,651				14/2
	D.P. ou s	3,16	0,021	14/2	73,42	0,626					14/3
Coef. Var. (%)	4,55	3,411	Média	75,26	0,596						14/4
	D.P. ou s	4,97	0,024								14/5
	Coef.Var. (%)	6,60	3,981								14/6

onde:

D.P. ou s - desvio padrão;

Coef.Var. - coeficiente de variação, %;

Para a utilização do modelo de aquecimento de toras proposto por Steinhagen et al. (1980), exige-se a adoção da massa específica básica e do teor de umidade médios das toras a serem vaporizadas. Então, desenvolveu-se a correlação entre o tempo real de vaporização e o modelo proposto por Steinhagen, para as três classes de diâmetros de toras, levando em consideração os valores médios de massa específica e teor de umidade mostrados na Tabela 2.

5.2 Correlação entre o tempo real de vaporização e o modelo proposto por Steinhagen

Para as três classes de diâmetros de toras de *Eucalyptus grandis*, determinou-se o tempo de vaporização pelo modelo proposto por Steinhagen et al. (1980) e verificou-se o tempo de vaporização real.

Durante o processo de vaporização à 90°C de temperatura, 100% de umidade relativa e 20 horas, o centro das toras de 20 a <25, 25 a <30 e 30 a <35 cm de diâmetro atingiram as temperaturas máximas de 82, 68 e 42°C, respectivamente. Então os fatores de correções desenvolvidos para a aplicação do modelo proposto por Steinhagen et al. (1980) para a espécie *E. grandis* são válidos até que o centro das toras atinjam no máximo as temperaturas máximas encontradas no presente estudo.

Considerando que o modelo proposto por Steinhagen et al. (1980) não se aplica para o gênero eucalipto e conforme sugerido por Severo (1998) e Tejada et al. (1997), desenvolveu-se a partir daí um fator de correção que permite a utilização do modelo proposto pelos referidos autores para definir com maior exatidão o tempo de vaporização de toras de *E. grandis*.

Para cada ganho de 1°C de temperatura no centro das toras durante o processo de vaporização determinou-se o tempo de vaporização pelo modelo geral de Steinhagen et al. (1980) conforme o Apêndice (1) e coletou-se, conforme metodologia descrita no trabalho (item 4.5.1), o tempo de vaporização real.

Com os dados logaritimizados do tempo obtido por Steinhagen e do tempo real de vaporização aplicou-se o modelo de regressão em função da tendência observada dos pares de dados. Operação realizada para cada classe de diâmetro estudada.

Para toras de 20 a <25cm de diâmetro a dispersão dos dados é observada no Apêndice (2) e optou-se pela escolha de um modelo linear crescente ($Y=a+b*X$).

O modelo ajustado apresentou coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,97, Erro padrão da estimativa (Syx) igual a 0,10278 e valor de “F” da regressão igual a 9460,4, indicando que o mesmo estima o tempo de vaporização real em função do tempo de vaporização proposto por Steinhagen com bom grau de precisão, confirmado ainda pela dispersão dos erros e pelos intervalos de confiança e previsão também visualizados no referido apêndice.

Os coeficientes de regressão gerada apresentam-se altamente significativos, justificando suas presenças no modelo.

Na Figura 20, observa-se a aplicação do modelo proposto para o tempo de vaporização real em função do tempo de vaporização proposto por Steinhagen.

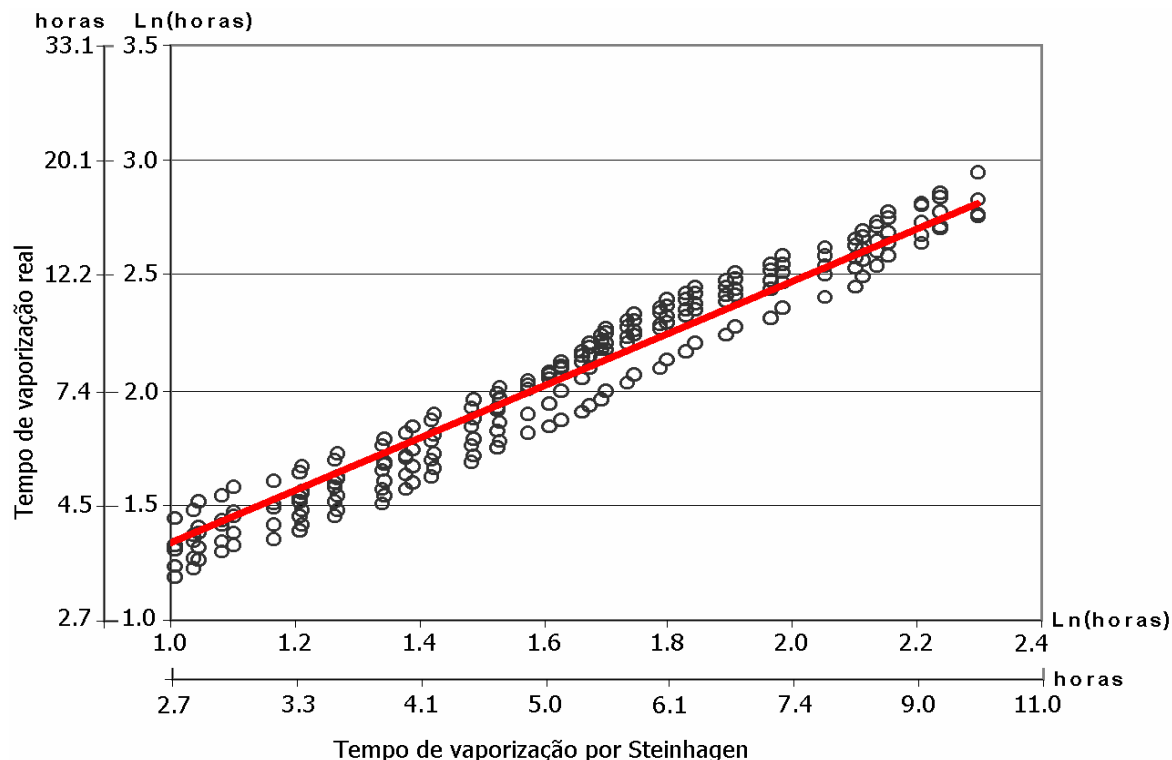


Figura 20. Regressão linear crescente ajustada para estimar o tempo de vaporização real para toras de *Eucalyptus grandis* com 20 a <25cm de diâmetro em função do tempo de vaporização determinado pelo modelo de Steinhagen.

A equação gerada em função da análise de regressão, para a classe de diâmetro de 20 a <25cm, foi a seguinte:

$$\text{Ln}(T)=0,201847+1,135681*\text{Ln}(t')$$

Através do desenvolvimento matemático da equação gerada em função da análise de regressão, obtemos a equação (12) que pode ser facilmente utilizada:

$$T_{20-25} = e^{(0,201847 + 1,135681 * \text{Ln}(t'))} \quad (12)$$

onde:

T = Tempo de vaporização real para a classe de diâmetro de 20 a <25cm, horas;

t' = Tempo de vaporização pelo modelo proposto por Steinhagen, horas.

Para o melhor entendimento do gráfico descrito na Figura 20 e conseqüentemente a utilização correta da equação (12), desenvolvida para a adequação do

modelo de vaporização proposto por Steinhagen et al. (1980), para *E. grandis* com 20 a <25cm de diâmetro verificamos a seguir um exemplo prático e real de como aplicá-la.

Como a dispersão dos erros e os intervalos de confiança e previsão verificados no Apêndice (2) mostram que a curva de regressão representa claramente todos os pares de dados, torna-se necessário o desenvolvimento de apenas um exemplo de como utilizar a equação (12).

Supondo que para o centro das toras de 20 a <25cm de diâmetro atinja 40°C de temperatura no processo de vaporização à 90°C seja necessário 2,84 (duas vírgula oitenta e quatro) horas pelo modelo de Steinhagen conforme a aplicação do guia descrito em Apêndice (1). Então, através da aplicação da equação (12), temos:

$$T_{20-25} = e^{(0,201847 + 1,135681 * \ln 2,84)}$$

$$T_{20-25} = e^{(0,201847 + 1,135681 * \ln 2,84)}$$

$$T_{20-25} = e^{(0,201847 + 1,1854284)}$$

$$T_{20-25} = e^{1,3872754}$$

$$T_{20-25} = 4,00 \text{ horas} \cong 4 : 00 \text{ horas}$$

Como mostra o gráfico da Figura 20 e o resultado do exemplo adotado para mostrar a utilização da equação (12), o tempo de vaporização por Steinhagen, no caso 2,84 (duas vírgula oitenta e quatro horas), é inferior ao real, no caso 4:00 (quatro horas), mostrando que o modelo de Steinhagen não é aplicável para a espécie e que a adoção do fator de correção proposto é necessária.

Para toras de 25 a <30cm de diâmetro a dispersão dos dados é observada no Apêndice (2) e optou-se pela escolha de um modelo linear crescente ($Y=a+b*X$).

O modelo ajustado apresentou coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,95, Erro padrão da estimativa (Syx) igual a 0,10657 e valor de “F” da regressão igual a 4309,6, indicando que o mesmo estima o tempo de vaporização real em função do tempo de vaporização proposto por Steinhagen com bom grau de precisão, confirmado ainda pela

dispersão dos erros e pelos intervalos de confiança e previsão também visualizados no referido apêndice.

Os coeficientes de regressão gerada apresentam-se altamente significativos, justificando suas presenças no modelo.

Na Figura 21, observa-se a aplicação do modelo proposto para o tempo de vaporização real em função do tempo de vaporização proposto por Steinhagen.

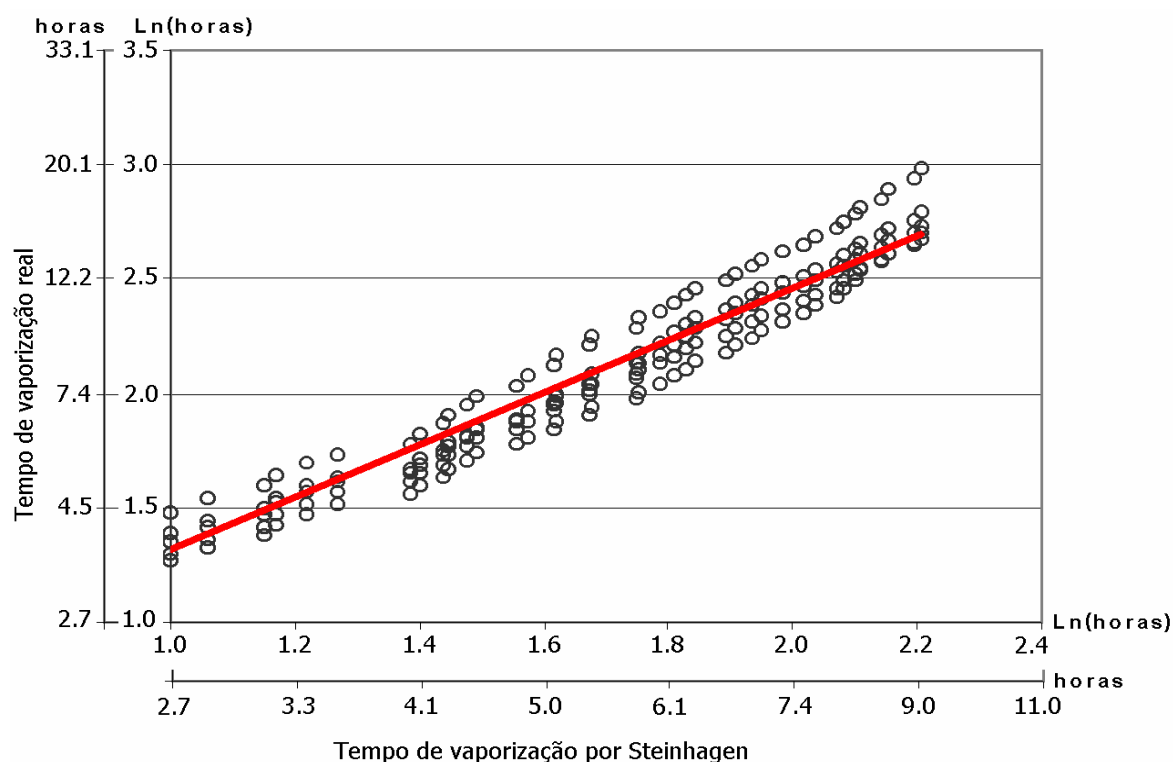


Figura 21. Regressão linear crescente ajustada para estimar o tempo de vaporização real para toras de *Eucalyptus grandis* com 25 a <30cm de diâmetro em função do tempo de vaporização determinado pelo modelo de Steinhagen.

A equação gerada em função da análise de regressão, para a classe de diâmetro de 25 a <30cm, foi a seguinte:

$$\ln(T) = 0,175077 + 1,140002 * \ln(t')$$

Através do desenvolvimento matemático da equação gerada em função da análise de regressão, obtemos a equação (13) que pode ser facilmente utilizada:

$$T_{25-30} = e^{(0,175077 + 1,140002 * \ln t')} \quad (13)$$

onde:

T = Tempo de vaporização real para a classe de diâmetro de 25 a <30cm, horas;

t' = Tempo de vaporização pelo modelo proposto por Steinhagen, horas.

Para o melhor entendimento do gráfico descrito na Figura 21 e conseqüentemente a utilização correta da equação (13), desenvolvida para a adequação do modelo de vaporização proposto por Steinhagen et al. (1980), para *E. grandis* com 25 a <30cm de diâmetro verificamos a seguir um exemplo prático e real de como aplicá-la.

Como a dispersão dos erros e os intervalos de confiança e previsão verificados no Apêndice (2) mostram que a curva de regressão representa claramente todos os pares de dados, torna-se necessário o desenvolvimento de apenas um exemplo de como utilizar a equação (13).

Supondo que para o centro das toras de 25 a <30cm de diâmetro atinja 40°C de temperatura no processo de vaporização à 90°C seja necessário 4,38 (quatro vírgula trinta e oito) horas pelo modelo de Steinhagen conforme a aplicação do guia descrito em Apêndice (1). Então, através da aplicação da equação (13), temos:

$$T_{25-30} = e^{(0,175077 + 1,140002 * \ln t')}$$

$$T_{25-30} = e^{(0,175077 + 1,140002 * \ln 4,38)}$$

$$T_{25-30} = e^{(0,175077 + 1,6838385)}$$

$$T_{25-30} = e^{1,8589155}$$

$$T_{25-30} = 6,42 \text{ horas} \cong 6 : 25 \text{ horas}$$

Como mostra o gráfico da Figura 21 e o resultado do exemplo adotado para mostrar a utilização da equação (13), o tempo de vaporização por Steinhagen, no caso 4,38 (quatro vírgula trinta e oito horas), é inferior ao real, no caso 6:25 (seis horas e vinte e cinco minutos), mostrando que o modelo de Steinhagen não é aplicável para a espécie e que a adoção do fator de correção proposto é necessária.

Para toras de 30 a <35cm de diâmetro a dispersão dos dados é observada no Apêndice (2) e optou-se pela escolha de um modelo linear crescente ($Y=a+b*X$).

O modelo ajustado apresentou coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,85, Erro padrão da estimativa (Syx) igual a 0,14609 e valor de “F” da regressão igual a 483,7, indicando que o mesmo estima o tempo de vaporização real em função do tempo de vaporização proposto por Steinhagen com bom grau de precisão, confirmado ainda pela dispersão dos erros e pelos intervalos de confiança e previsão também visualizados no referido apêndice.

Os coeficiente “b” de regressão gerada apresenta-se altamente significativo, justificando sua presença no modelo. O coeficiente “a” da regressão não é significativo e sua presença no modelo pode ou não ser adotada.

Na Figura 22, observa-se a aplicação do modelo proposto para o tempo de vaporização real em função do tempo de vaporização proposto por Steinhagen.

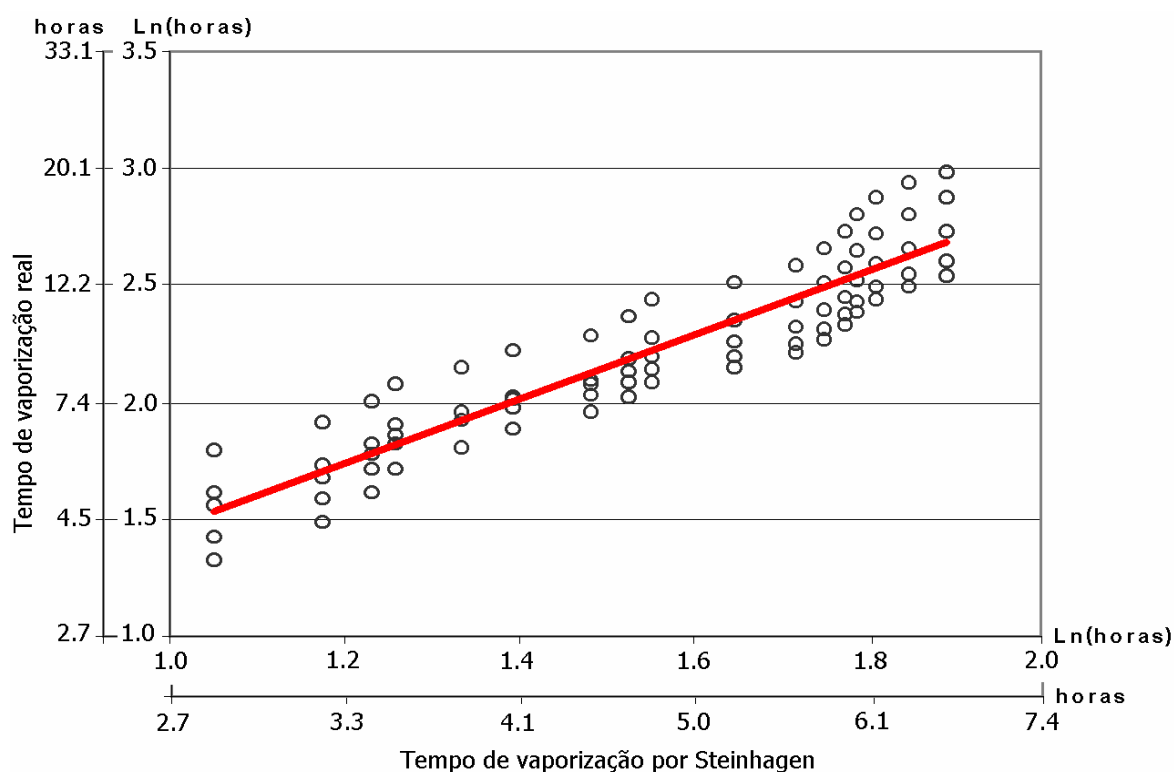


Figura 22. Regressão linear crescente ajustada para estimar o tempo de vaporização real para toras de *Eucalyptus grandis* com 30 a <35cm de diâmetro em função do tempo de vaporização determinado pelo modelo de Steinhagen.

A equação gerada em função da análise de regressão, para a classe de diâmetro de 30 a <35cm, foi a seguinte:

$$\ln(T)=0,0976576+1,36633*\ln(t')$$

Através do desenvolvimento matemático da equação gerada em função da análise de regressão, obtemos a equação (14) que pode ser facilmente utilizada:

$$T_{30-35} = e^{(0,0976576 + 1,36633 * \ln t')}$$

onde:

T = Tempo de vaporização real para a classe de diâmetro de 30 a <35cm, horas;

t' = Tempo de vaporização pelo modelo proposto por Steinhagen, horas.

Para o melhor entendimento do gráfico descrito na Figura 22 e conseqüentemente a utilização correta da equação (14), desenvolvida para a adequação do modelo de vaporização proposto por Steinhagen et al. (1980), para *E. grandis* com 30 a <35cm de diâmetro verificamos a seguir um exemplo prático e real de como aplicá-la.

Como a dispersão dos erros e os intervalos de confiança e previsão verificados no Apêndice (2) mostram que a curva de regressão representa claramente todos os pares de dados, torna-se necessário o desenvolvimento de apenas um exemplo de como utilizar a equação (14).

Supondo que para o centro das toras de 30 a <35cm de diâmetro atinja 40°C de temperatura no processo de vaporização à 90°C seja necessário 6,12 (seis vírgula doze) horas pelo modelo de Steinhagen conforme a aplicação do guia descrito em Apêndice (1). Então, através da aplicação da equação (14), temos:

$$T_{30-35} = e^{(0,0976576 + 1,36633 * \ln 6,12)}$$

$$T_{30-35} = e^{(0,0976576 + 1,36633 * \ln 6,12)}$$

$$T_{30-35} = e^{(0,0976576 + 2,4751916)}$$

$$T_{30-35} = e^{2,5728492}$$

$$T_{30-35} = 13,10 \text{ horas} \cong 13 : 06 \text{ horas}$$

Como mostra o gráfico da Figura 22 e o resultado do exemplo adotado para mostrar a utilização da equação (14), o tempo de vaporização por Steinhagen, no caso

6,12 (seis vírgula doze horas), é inferior ao real, no caso 13:06 (treze horas e seis minutos) mostrando que o modelo de Steinhagen não é aplicável para a espécie e que a adoção do fator de correção proposto é necessária.

Verifica-se através das Figuras 20, 21 e 22 e através dos exemplos realizados que o tempo de vaporização obtido experimentalmente com a utilização de termopares foi sempre superior ao obtido pela aplicação do modelo geral proposto por Steinhagen et al. (1980).

Tal fato pode ser explicado devido ao desenvolvimento do modelo geral de vaporização, do autor em questão, com base na utilização das seguintes espécies: *Populus sp*, *Prunus serotina*, *Quercus sp* e *Pinus strobus*. Portando a ausência do gênero eucalipto no desenvolvimento desse modelo requer o desenvolvimento de fatores de correções para a aplicação do mesmo na vaporização de toras de *E. grandis*.

Então, para que o modelo geral de determinação de tempo de vaporização de toras seja aplicado para o *Eucalyptus grandis* sugere-se as seguintes equações originadas das análises de regressões verificadas no Apêndice (2):

Para toras de 20 a <25cm de diâmetros e até 82°C de temperatura desejada no centro das toras:

$$T_{20-25} = e^{(0,201847 + 1,135681 * Lnt')}$$

Para toras de 25 a <30cm de diâmetros e até 68°C de temperatura desejada no centro das toras:

$$T_{25-30} = e^{(0,175077 + 1,140002 * Lnt')}$$

Para toras de 30 a <35cm de diâmetros e até 42°C de temperatura desejada no centro das toras:

$$T_{30-35} = e^{(0,0976576 + 1,36633 * Lnt')}$$

onde:

T = Tempo de vaporização real para as respectivas classes de diâmetro, horas;

t' = Tempo de vaporização pelo modelo proposto por Steinhagen, horas.

5.3 Efeito da vaporização no alívio das tensões de crescimento

A avaliação das tensões de crescimento foi realizada durante o desdobro das toras, levando-se em consideração a forma como essas tensões manifestam-se na madeira serrada, através de medições de empenamentos, rachaduras e abertura das tábuas em relação ao bloco.

É fato que a abertura das tábuas em relação ao bloco é a variável de resposta para o desbitolamento das tábuas. Porém, a avaliação da variação em espessura das tábuas não foi realizada devido à ausência de um carro-porta-toras na serra de fita simples. O avanço do bloco na serra ocorreu através do auxílio de 2 operários e conseqüentemente houve interferência na variação da espessura das peças.

A avaliação das tábuas durante o desdobro indicou que não houve nenhum tipo de empenamento tanto em tábuas provenientes de toras controle (aneladas) como de toras vaporizadas (aneladas e vaporizadas).

O mesmo não ocorreu para as variáveis rachaduras e abertura das tábuas em relação ao bloco. Os resultados dessa avaliação encontram-se na Tabela 3. Uma melhor visualização do efeito da vaporização das toras sobre a abertura das tábuas em relação ao bloco, comprimento e largura das rachaduras é verificada nas Figuras 23, 24 e 25, respectivamente.

Tabela 3. Efeito da vaporização no alívio das tensões de crescimento.

Estas figuras e os testes de KRUSKAL - WALLIS no Apêndice (4) mostram que a vaporização das toras proporcionou considerável redução em todas as variáveis utilizadas como parâmetros de comparação do nível das tensões de crescimento durante o desdobro de toras de *E. grandis* com 20 a <25, 25 a <30 e 30 a <35cm de diâmetro.

Considerando tábuas provenientes de todas as classes de diâmetros em estudo agrupadas em uma só classe verifica-se reduções da abertura das tábuas em relação ao bloco, comprimento e largura das rachaduras com a vaporização na ordem de 18,9%, 36,4% e 49,7%, respectivamente.

Verifica-se na Tabela 3 e Figura 23 que as reduções da abertura das tábuas em relação ao bloco devido à vaporização apresentam-se na ordem de 6,2% (não

significativa), 20,6 e 32,4% (significativas) para toras de 30 a <35, 25 a <30 e 20 a <25 cm, respectivamente. Isto mostra que a vaporização das toras por 20 horas foi mais efetiva no alívio das tensões de crescimento em toras de menor dimensão.

As reduções das variáveis comprimento das rachaduras das tábuas com a vaporização foram 34,7; 34,8 e 34,1% para toras de 30 a <35, 25 a <30 e 20 a <25 cm de diâmetro, respectivamente. Para as mesmas classes de diâmetros de toras obteve-se reduções da largura das rachaduras na ordem de 47,3; 50,0 e 47,0%. Esse comportamento mostra que a vaporização da madeira por 20 horas promoveu reduções semelhantes desses defeitos para toras de diferentes classes diamétricas.

Os resultados obtidos nesse estudo são semelhantes aos obtidos por Skolmen (1967) que obteve reduções de cerca de 50% das tensões de crescimento em toras de *Eucalyptus saligna* com diâmetro de 15-20cm após um tratamento de 24 horas em água quente.

De forma semelhante, Severo (1998) concluiu que a vaporização das toras de *Eucalyptus dunnii* por um período de 20 horas proporcionou uma redução significativa das tensões de crescimento.

Pode-se concluir que todos os defeitos decorrentes das tensões de crescimento foram minimizados significativamente com a vaporização, em todas as classes de diâmetro, mostrando assim que o processo de vaporização de toras é uma alternativa viável para o relaxamento das tensões de crescimento.

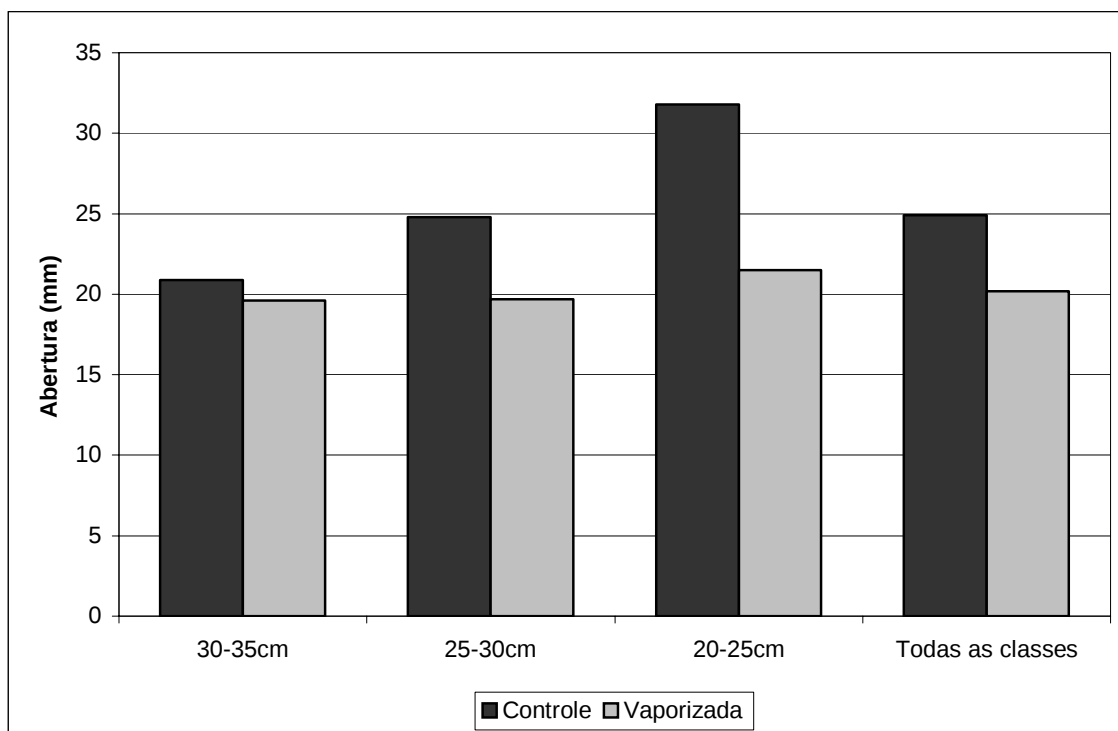


Figura 23. Efeito da vaporização das toras na abertura média das tábuas durante o desdobro.

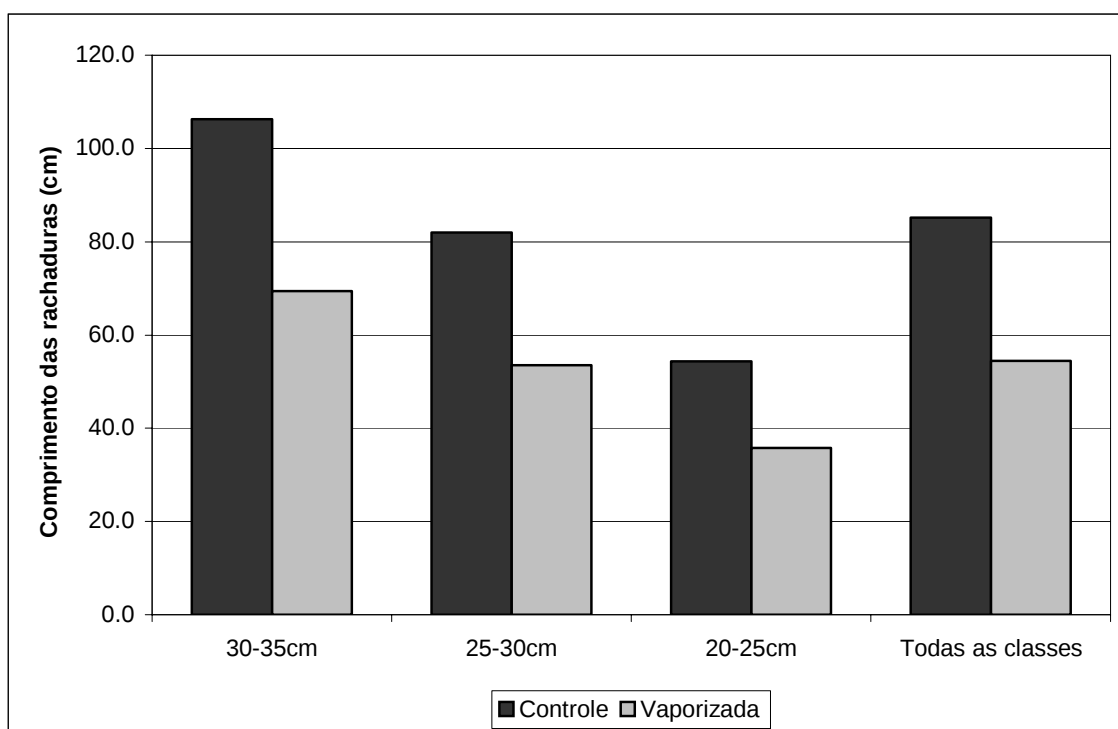


Figura 24. Efeito da vaporização das toras no comprimento médio das rachaduras.

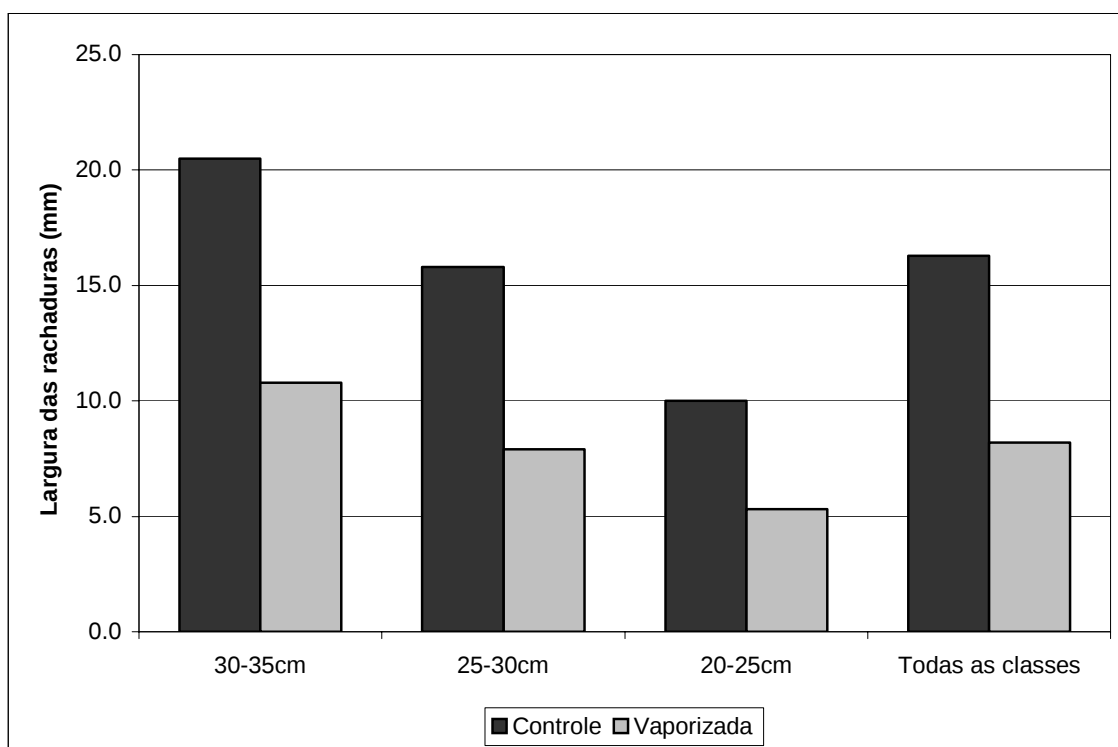


Figura 25. Efeito da vaporização das toras na largura média das rachaduras.

A vaporização por 20 horas promoveu redução semelhante dos defeitos (comprimento e largura das rachaduras) nas tábuas provenientes de toras das três classes de diâmetro em estudo, como mostra a tabela 3.

Porém, verifica-se através das Figuras 24 e 25 que as tábuas provenientes tanto de toras controle quanto de vaporizadas de 30 a <35cm de diâmetro apresentam maiores índices desses defeitos quando comparadas com as de 25 a <30cm. O mesmo ocorre quando compara-se os defeitos das tábuas de toras de 25 a <30cm com as de menor diâmetro (20 a <25cm).

Isto mostra que embora tábuas provenientes de toras vaporizadas de 20 a <25cm de diâmetro apresentem significativamente menor nível dos defeitos quando comparadas com tábuas oriundas de toras controle da mesma classe de diâmetro e também quando comparadas com tábuas provenientes de toras vaporizadas de dimensões maiores. Portanto, devido ao aumento do diâmetro das toras controle há um aumento do nível destes defeitos.

Alguns autores afirmam que o diâmetro das toras é de fundamental importância para a determinação do tempo de permanência do material no meio vaporizador (Kollmann et al., 1975 citados por Medina, 1986; Steinhagen et al., 1980).

O estudo realizado por Rozas Mellado (1993) com toras de *Eucalyptus grandis* de 15 a 20cm de diâmetro mostrou que a vaporização do material por um período de 18 horas a uma temperatura de 90°C foi suficiente para eliminar por completo as rachaduras da espécie e reduzir sobremaneira a abertura das tábuas em relação à tora. Segundo o mesmo autor não houve diferença significativa entre o tempo de vaporização de 18 horas e 36 horas.

Portanto, a não eliminação por completo das rachaduras na madeira de toras vaporizadas de 20 a <25, 25 a <30 e 30 a <35cm de diâmetro de *E. grandis* reforça o fato de que o diâmetro das toras é fundamental para a determinação exata do tempo de vaporização do material.

Tudo indica que o tempo de vaporização (20horas) utilizado não foi suficiente para aliviar por completo as tensões de crescimento em toras das três classes de diâmetro de *E. grandis* estudadas. Os resultados também permitem concluir que quanto maior for o diâmetro das toras maior será o tempo necessário de permanência do material durante o processo de vaporização para que ocorra o alívio, por completo, das tensões de crescimento.

5.4 Efeito do diâmetro das toras na qualidade do desdobro

As tensões de crescimento nas toras controle foram determinadas através da sua manifestação durante o desdobro, levando-se em consideração medições de empenamentos, rachaduras e abertura das tábuas em relação ao bloco, na madeira serrada.

Como citado anteriormente, a abertura das tábuas em relação ao bloco é a variável de resposta para o desbitolamento das tábuas. Porém a avaliação da variação em espessura das tábuas não foi realizada devido à ausência de um carro-porta-toras na serra de fita simples. Fato este que exigiu o avanço do bloco na serra através do auxílio de 2 operários, o que conseqüentemente ocasionou interferência na variação da espessura das peças.

A avaliação das tábuas durante o desdobro indicou que não houve nenhum tipo de empenamento em tábuas provenientes das três classes de diâmetro, em estudo, de toras de *E. grandis*.

O mesmo não ocorreu para rachaduras e abertura das tábuas em relação ao bloco. Os resultados dessa avaliação encontram-se na Tabela 4. Uma melhor visualização do efeito do diâmetro das toras sobre a abertura das tábuas em relação ao bloco, e comprimento e largura das rachaduras é mostrada nas Figuras 26, 27 e 28, respectivamente. Os valores do teste de KRUSKAL - WALLIS e NEMENYI são apresentados em Apêndices (4) e (5), respectivamente.

Tabela 4. Efeito do diâmetro das toras nas tensões de crescimento.

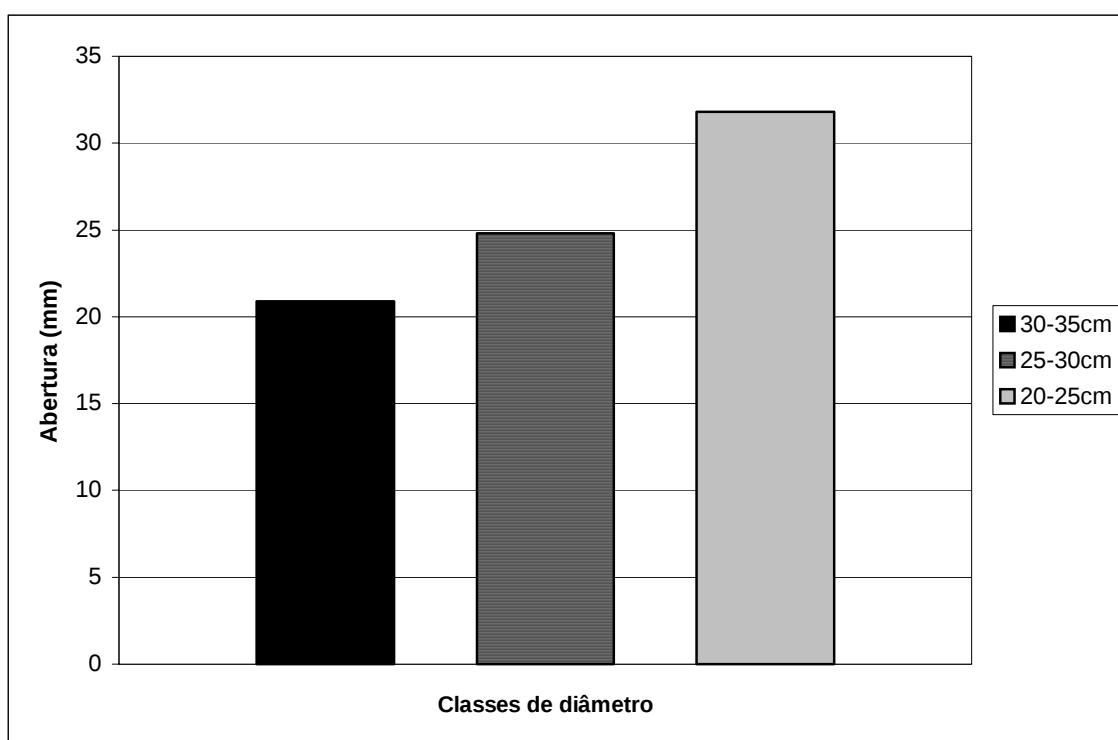


Figura 26. Efeito do diâmetro das toras na abertura média das tábuas durante o desdobro.

Verifica-se na Figura 26 que quanto menor é o diâmetro das toras maior é a variável abertura das tábuas em relação ao bloco durante o desdobro. Tábuas provenientes de toras de 30 a <35, 25 a <30 e 20 a <25cm de diâmetros apresentam respectivamente 20,9; 24,8; e 31,8mm de abertura em relação ao bloco. A abertura das tábuas oriundas das duas maiores classes de diâmetro não apresentou diferença significativa, quando

comparadas entre si e o contrário ocorreu quando comparadas com tábuas provenientes das toras de diâmetro menor. Porém, existe entre as tábuas uma diferença nas magnitudes das tensões de crescimento com o diâmetro das toras, indicando que toras menores têm maior propensão a apresentar abertura das tábuas em relação ao bloco e provavelmente, como descrito na literatura, maior variação em espessura na peça de madeira.

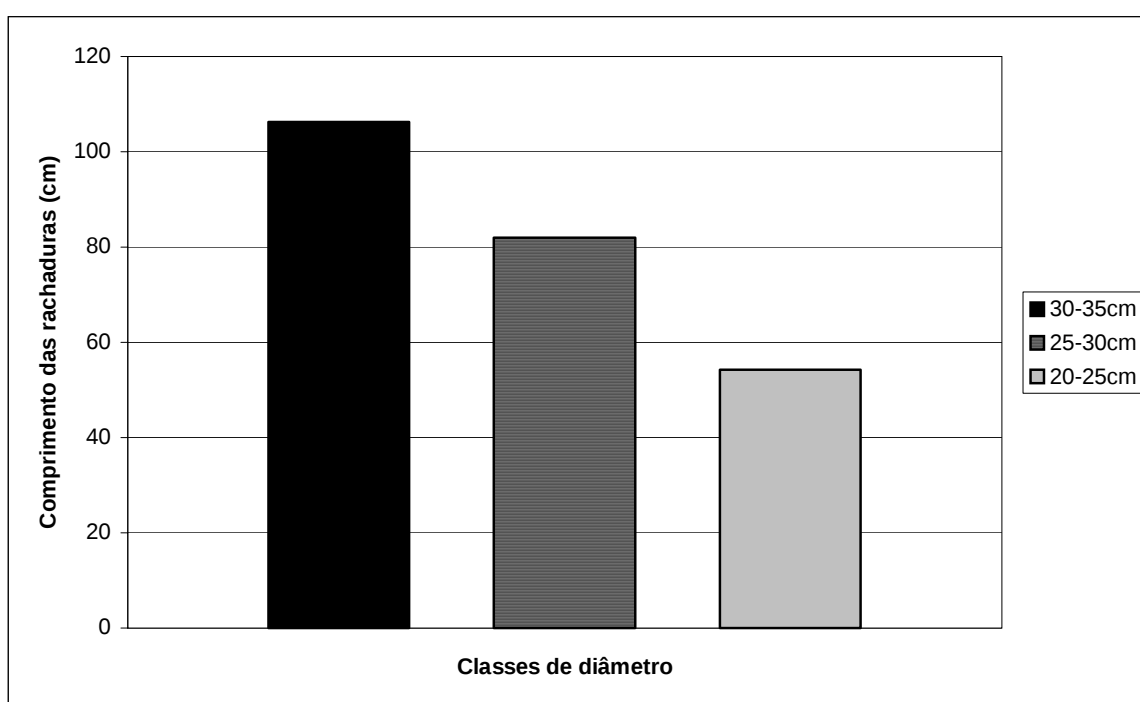


Figura 27. Efeito do diâmetro das toras no comprimento médio das rachaduras.

Pode-se observar na Figura 27 que o comprimento das rachaduras nas tábuas foi diferente significativamente entre as três classes de diâmetro de toras indicando que quanto maior é o diâmetro das toras maiores são os índices de comprimento de rachaduras de topos nas tábuas durante o desdobro. Tábuas de 2,70m de comprimento provenientes de toras de 30 a <35, 25 a <30 e 20 a <25cm de diâmetros apresentam comprimentos médios de rachaduras na ordem de 106,3; 82,0; e 54,3cm, respectivamente.

O mesmo comportamento é observado, na Figura 28, para a variável largura das rachaduras. Pois, toras de 30 a <35, 25 a <30 e 20 a <25cm de diâmetros originam tábuas com largura média das rachaduras na ordem de 20,5; 15,8; e 10,0mm, respectivamente. A largura média das tábuas oriundas das duas maiores classes de diâmetro não apresentou

diferença significativa, quando comparadas entre si e o contrário ocorreu quando comparadas com tábuas provenientes das toras de diâmetro menor. Porém, existe entre as tábuas uma diferença nas magnitudes das tensões de crescimento com o diâmetro das toras, indicando que as toras maiores produzem tábuas mais propensas a rachar.

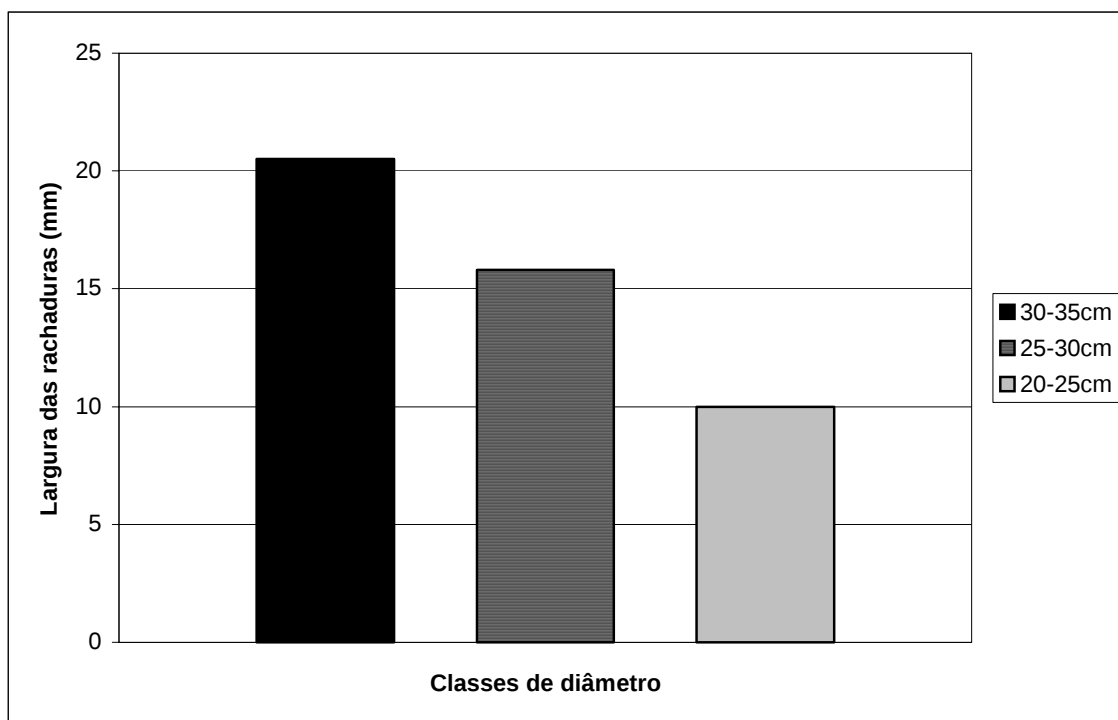


Figura 28. Efeito do diâmetro das toras na largura média das rachaduras.

Uma das possíveis causas das tábuas de toras de maiores diâmetros apresentarem maior comprimento e largura de rachaduras é devido, teoricamente, à presença dos lenhos juvenil e adulto nessas toras, quando comparadas com toras de menores diâmetros, constituídas provavelmente por apenas lenho juvenil. Também devido à presença de cerne quebradiço nas toras mais velhas sempre encontrados próximos à região da medula. Isso pôde ser verificado, quando realizada a medição dos defeitos. Na ocasião constatou-se a presença acentuada das rachaduras nas tábuas que continham a medula em toras de diâmetros maiores e baixo nível desse defeito nas tábuas retiradas próximas à periferia do tronco. E nas toras menores, as dimensões das rachaduras em todas as tábuas retiradas dos blocos apresentaram valores muito próximos.

Santos, P. (2002), afirma que não existe uma metodologia padrão para a quantificação das rachaduras das tábuas e que cada autor adota seu próprio índice de quantificação desses defeitos e determina sua própria amostragem no sentido radial do tronco para quantificar as tensões de crescimento. Segundo o mesmo autor, tal fato apresenta-se como entrave para a comparação entre os trabalhos descritos na literatura.

Na literatura existem divergências quanto ao comportamento das tensões de crescimento com a altura da árvore e conseqüentemente com o diâmetro das toras.

Santos, P. (2002, p.100), estudando o nível de tensões de crescimento em madeira de *E. grandis*, verificou que “para o índice de rachaduras de extremidades de tábuas verdes não se encontrou diferença significativa de comportamento entre as primeiras e as segundas toras”.

Em estudo sobre o nível de tensões de crescimento em *E. saligna*, conduzido por Fernandes & Ferreira (1986), os autores concluem que a intensidade das rachaduras diminui com o aumento do diâmetro das toras. Resultado semelhante encontrou Chafe (1981), onde estudos efetuados em *E. regnans* mostraram existir uma relação direta entre a altura e a tensão de crescimento.

Por outro lado, Rozas Mellado (1993) observou que a primeira e a terceira tora de *E. grandis* apresentaram menor porcentagem de tensões de crescimento (porcentagem obtida através das rachaduras das tábuas durante o desdobro) que a tora do meio, sendo estas porcentagens 29,3; 35,1; e 27,8%, respectivamente.

Porém, Malan (1984) citado por Rozas Mellado (1993), estudando *E. grandis* observou que as rachaduras de topo foram maiores nos primeiros 2 a 3 metros e diminuíram de intensidade com a altura da árvore. Num estudo conduzido por Chafe (1985) em 10 árvores de *E. nitens* de 8 anos de idade, medidas tomadas a seis diferentes alturas revelaram que a tensão de crescimento tem uma relação inversa com a altura da árvore.

Portanto, os resultados obtidos no presente estudo são concordantes com os obtidos por Chafe (1985) e Malan (1984) citado por Rozas Mellado (1993).

5.5 Efeito da vaporização das toras na secagem da madeira

Para a secagem da madeira em estufa piloto utilizaram-se tábuas das três classes de diâmetro de *Eucalyptus grandis* provenientes de toras controle e de toras vaporizadas. As tábuas de 28mm de espessura, com larguras padronizadas em função das classes de diâmetro das toras e comprimento igual a 2,70 metros, foram submetidas à secagem visando determinar a qualidade da madeira seca.

A avaliação e quantificação dos defeitos foram realizadas após o término da secagem das tábuas. Para tanto, mediu-se o comprimento das rachaduras nos extremos das tábuas, flecha dos encurvamentos, arqueamentos e encanoamento e colapso, conforme metodologia descrita anteriormente.

A avaliação das tábuas indicou que não houve colapso tanto em tábuas provenientes de toras controle como de toras vaporizadas. Tudo indica que a ausência de colapso está relacionada com a utilização de um programa de secagem caracterizado como suave devido à adoção de temperatura inicial de 40°C.

Vários autores constataram que o colapso está diretamente relacionado com as altas temperaturas no início da secagem (ROZAS MELLADO, 1993; SEVERO, 1998 e SIMPSON, 1991).

Hartley e Gouch (1990), Severo (1998) e Vermaas (1995) recomendam para a madeira de eucalipto, sempre iniciar a secagem com temperatura inicial inferior a 45°C. Andrade (2000), Ciniglio (1998) e Santos (2002) recomendam temperatura inicial de 40°C. Rozas Mellado (1993) em seu estudo com *E. grandis* concluiu que programas de secagem com temperatura inicial de 40°C apresenta baixos índices de colapso.

Associado à baixa temperatura inicial na secagem do gênero eucalipto está a massa específica do material. Segundo Vermaas (1995), as madeiras de eucalipto com alta massa específica tendem a colapsar menos em relação àquela com baixa massa específica. Então a massa específica encontrada no material em estudo ($0,6\text{g/cm}^3$) também pode ter sido um fator responsável pela ausência desse defeito.

Os resultados obtidos na avaliação dos defeitos de secagem da madeira de *Eucalyptus grandis* proveniente de toras controles e vaporizadas são mostrados nas Tabelas 5 e 6. A Tabela 5 mostra a classificação dos defeitos de secagem em função do número de peças de madeira serrada proveniente tanto de toras controle como de vaporizada. Por outro

lado, a Tabela 6 mostra o efeito da vaporização na redução do índice de defeitos decorrentes da secagem da madeira.

Através da análise dos dados da Tabela 5, pode-se observar que entre as três classes de diâmetro de toras estudadas, as toras vaporizadas de 20 a <25cm de diâmetro originam maior número de tábuas sem defeitos e concomitantemente menor número de tábuas com defeitos fortes em relação às tábuas provenientes de toras controle.

Esses defeitos são representados por 65,38% de tábuas com rachaduras fortes e 26,92% com encanoamentos fortes para o material vaporizado e 100,00% de tábuas com rachaduras fortes e 69,23% com encanoamentos fortes para o material controle.

Como era esperado, para a maioria dos defeitos, a percentagem do número de tábuas sem defeito diminuiu e a percentagem de tábuas com defeitos fortes provenientes de toras vaporizadas aumentou com o aumento do diâmetro das toras. Entretanto, observa-se que a vaporização das toras promoveu redução do número de peças com defeito nas três classes de diâmetro de toras.

Verifica-se também, que a percentagem de tábuas com rachaduras fortes foi maior que a percentagem de tábuas com encanoamento forte nas três classes de diâmetro em estudo, mostrando que a ordem de importância dos defeitos são: rachaduras e encanoamentos.

Os demais defeitos, tais como encurvamento e arqueamento, não se constituíram em maiores problemas mesmo em tábuas provenientes de toras controle pois os defeitos fortes ficaram no máximo muito próximos à 10% do número total de peças. Resultado semelhante foi descrito por Severo (1998), que encontrou o número de peças com encurvamento e arqueamento inferior a 10% do número total.

Tabela 5. Classificação dos defeitos de secagem para madeira serrada proveniente de toras controle e vaporizada de *E. grandis*.
 $\sum r$ = somatório do comprimento das rachaduras; L_r = comprimento total das tábuas; ea = espessura aplainada das tábuas; e = espessura nominal das tábuas; x = comprimento da flecha para o encurvamento e o arqueamento.

Estes resultados mostram que a vaporização de toras possibilita a obtenção de menor número de tábuas com defeitos de secagem. Que o tempo de permanência das toras no processo de aplicação de vapor está diretamente relacionado com o diâmetro do material. E que toras de menor diâmetro necessitam de menor tempo de vaporização para produzirem tábuas sem defeitos de secagem ou ainda com menor percentagem de peças com defeitos fortes.

Os resultados para as variáveis percentagem de rachaduras, encurvamentos, arqueamentos e encanoamentos das tábuas após o processo de secagem encontram-se na Tabela 6. Uma melhor visualização do comportamento desses defeitos é mostrada nas Figuras 29, 30, 31 e 32.

Tabela 6. Efeito da vaporização das toras na redução do índice dos defeitos de secagem.

Estas figuras e os testes de KRUSKAL-WALLIS em Apêndice (7) mostram que a vaporização das toras proporcionou considerável redução em todas as variáveis utilizadas como parâmetro de comparação da qualidade da madeira seca.

Através da Figura 29, verifica-se que a percentagem de rachaduras nas tábuas diminuiu devido à vaporização das toras, em todas as classes de diâmetro estudadas. Pode-se observar com o auxílio da Tabela 6 que a redução desse defeito, com a vaporização, foi da ordem de 18,4 (não significativo); 27,7 e 43,4% (significativos ao nível de 5%), para tábuas provenientes de toras de 30 a <35; 25 a <30 e 20 a <25cm de diâmetro, respectivamente.

Isso mostra que quanto menor o diâmetro das toras, maior será a eficiência do tratamento de vaporização à 90°C de temperatura por 20 horas. E quanto maior o diâmetro maior deverá ser o tempo de permanência das toras no processo para redução do índice de rachaduras das tábuas decorrentes da secagem do material.

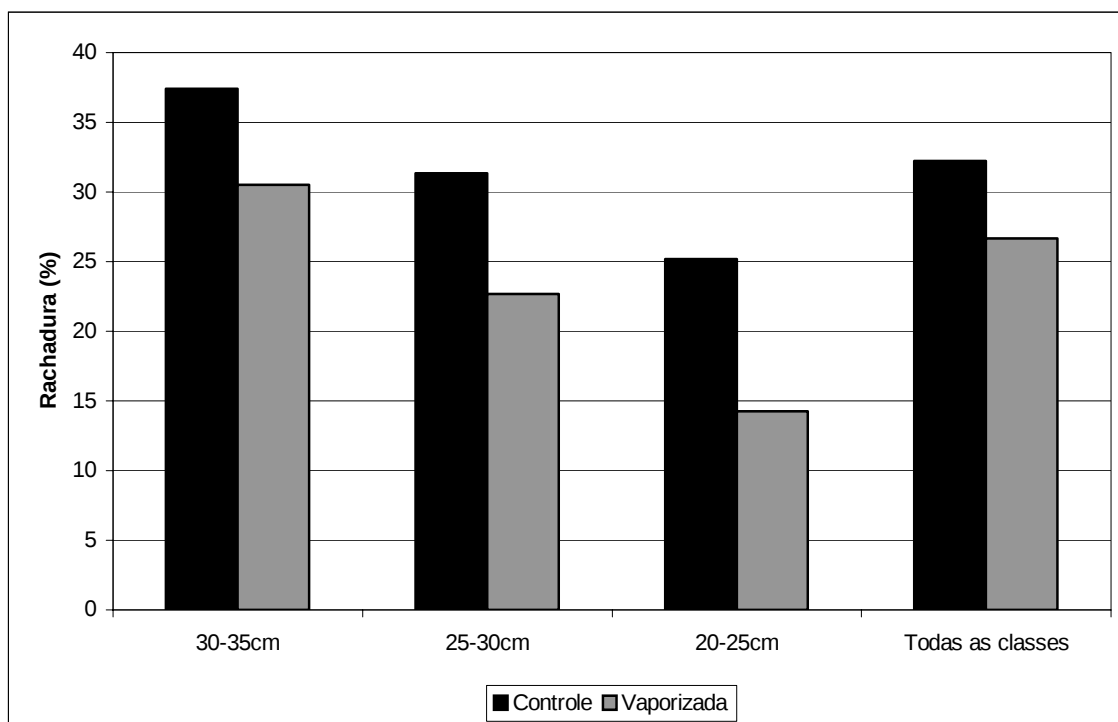


Figura 29. Efeito da vaporização das toras na percentagem de rachadura das tábuas após a secagem.

Através da Figura 30 podemos observar o comportamento do encurvamento das peças provenientes das toras controle e vaporizada. Verifica-se que tábuas provenientes das toras controle de 25 a <30cm de diâmetro apresentam menor índice de encurvamento após a secagem.

Embora as reduções do encurvamento com a vaporização não seja significativa a nível de 5%, observa-se que tábuas das toras vaporizadas de menor diâmetro apresentam menor índice do defeito, indicando que quanto menor o diâmetro das toras, maiores serão as reduções do índice do encurvamento das tábuas com a vaporização nas condições adotadas no estudo.

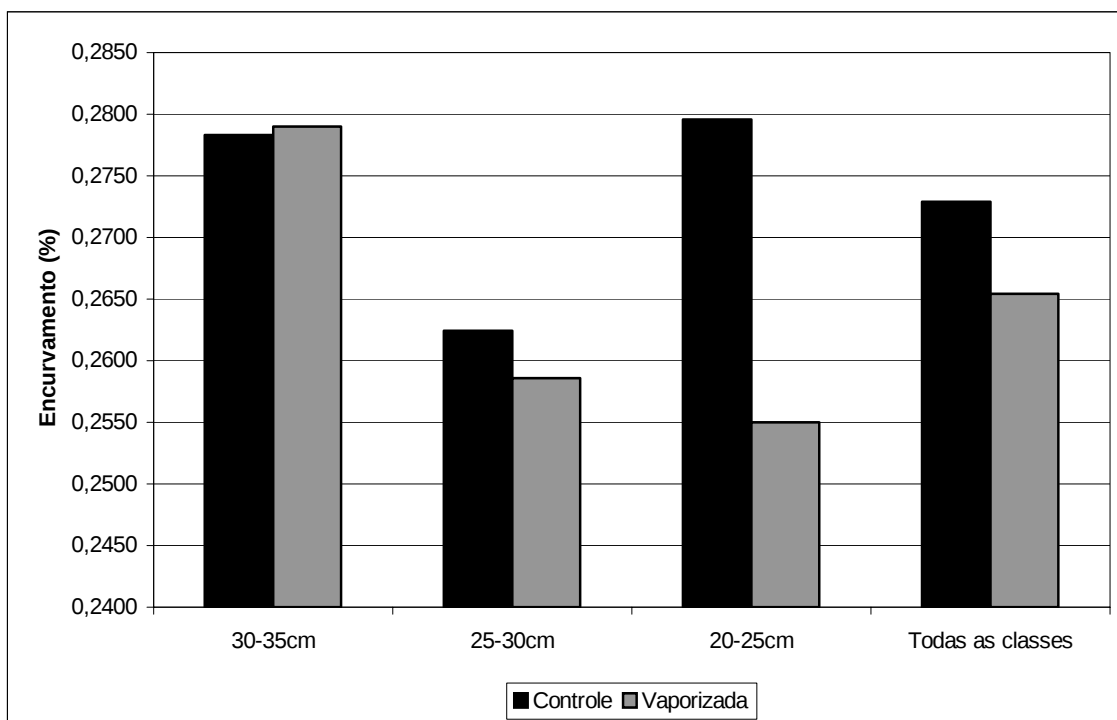


Figura 30. Efeito da vaporização das toras no encurvamento das tábuas após a secagem.

A observação da Figura 31 mostra que o arqueamento das tábuas após a secagem também é reduzido, embora não significativo a nível de 5%, com a aplicação de vapor nas toras de diferentes classes de diâmetro. Como pode ser observado na Tabela 6, as reduções deste defeito com a vaporização apresentou-se na ordem de 3,7; 11,5 e 5,5% para tábuas provenientes de toras de 30 a <35; 25 a <30 e 20 a <25cm de diâmetro, respectivamente.

A presença do encanoamento é justificada por Ciniglio (1998) como defeito de tábuas tangenciais. É facilmente visualizado nas Tabela 6 e Figura 32 que a maior redução significativa do encanoamento devido à vaporização de toras ocorre nas tábuas retiradas de toras de 20 a <25cm, e apresenta um valor na ordem de 59,7%.

Isso mostra que quanto menor o diâmetro das toras, maior será a eficiência do tratamento de vaporização à 90°C de temperatura por 20 horas. E quanto maior o diâmetro maior deverá ser o tempo de permanência das toras no processo para redução do encanoamento das tábuas decorrentes da secagem do material.

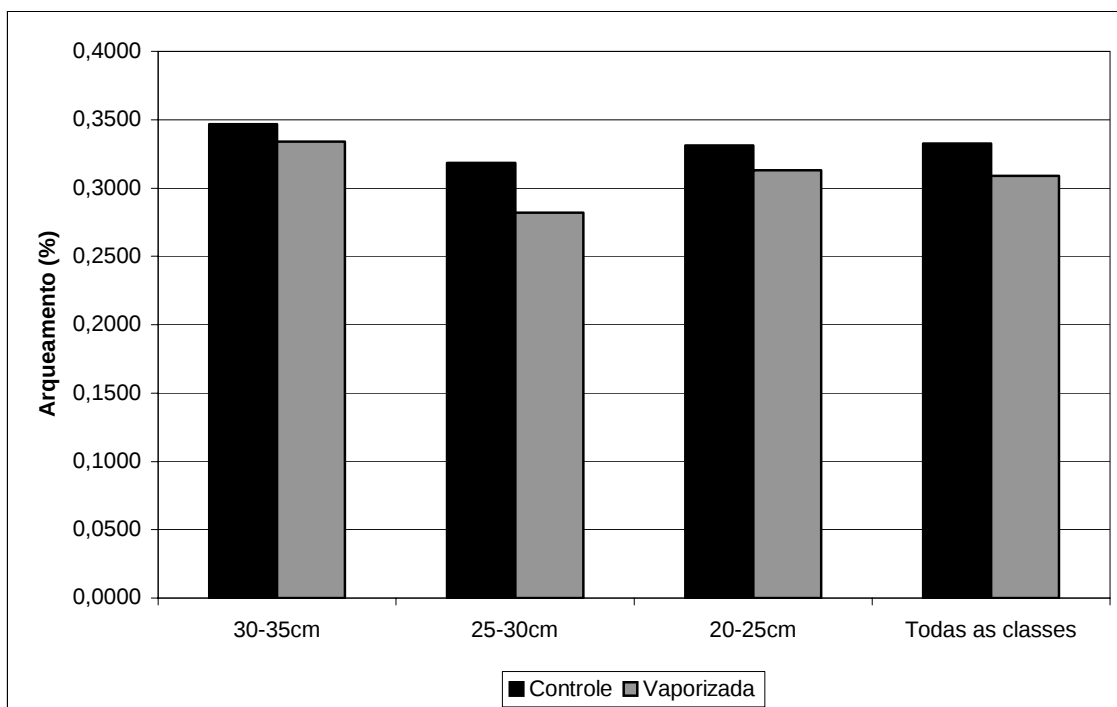


Figura 31. Efeito da vaporização das toras no arqueamento das tábuas após a secagem.

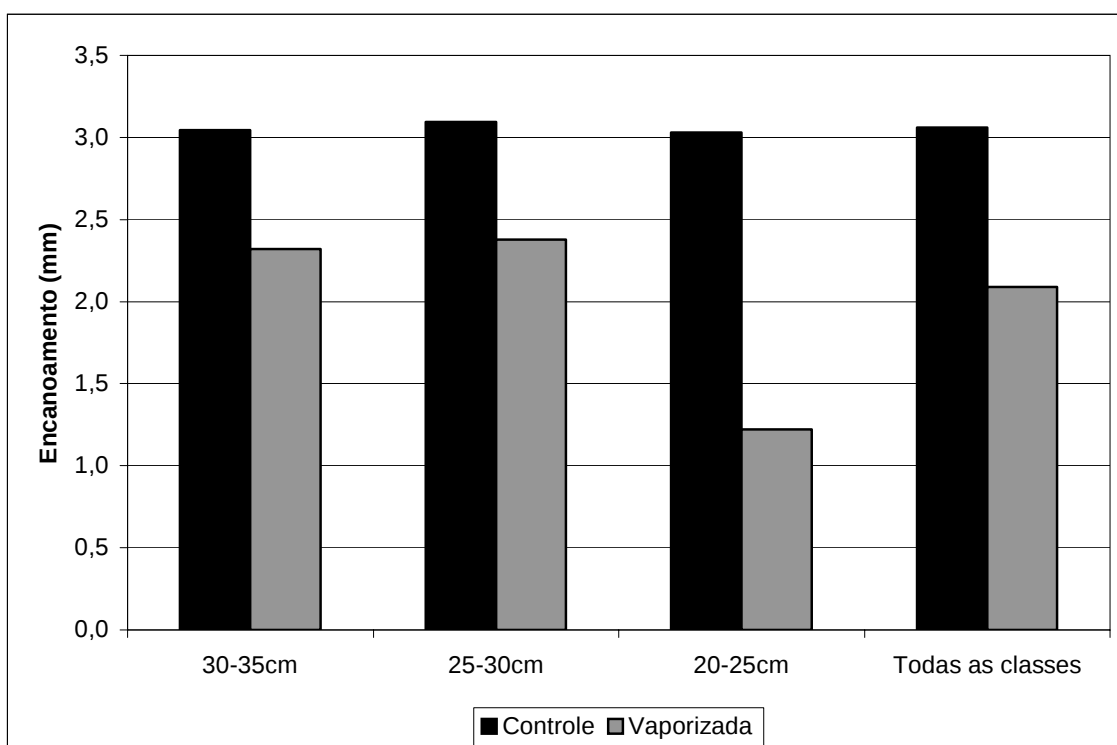


Figura 32. Efeito da vaporização das toras no encanoamento das tábuas após a secagem.

Com base nos resultados obtidos, é possível afirmar que o tratamento de vaporização de toras à 90°C de temperatura por 20 horas minimizou a ocorrência de todos os defeitos de secagem das tábuas provenientes das três classes de diâmetro das toras.

Conclui-se, também, que a classe de diâmetro de 20 a <25cm apresenta maior redução de percentagem de rachadura, encurvamento e encanoamento devido a vaporização de toras e que o índice de arqueamento foi reduzido com maior intensidade nas tábuas provenientes de toras de 25 a <30 e 20 a <25cm de diâmetro.

6 CONCLUSÕES

Com relação à adequação do tempo de vaporização (aquecimento) de toras proposto por Steinhagen et al. (1980) para a espécie *Eucalyptus grandis*, conclui-se que:

- a) o tempo de vaporização real é sempre superior àquele obtido pela aplicação do modelo dos autores em questão;
- b) para que o modelo geral de determinação de tempo de vaporização de toras seja aplicado para o *E. grandis* sugere-se as seguintes equações:

Para toras de 20 a <25cm de diâmetros e até 82°C de temperatura desejada no centro das toras:

$$T_{20-25} = e^{(0,201847 + 1,135681 * Lnt')}$$

Para toras de 25 a <30cm de diâmetros e até 68°C de temperatura desejada no centro das toras:

$$T_{25-30} = e^{(0,175077 + 1,140002 * Lnt')}$$

Para toras de 30 a <35cm de diâmetros e até 42°C de temperatura desejada no centro das toras:

$$T_{30-35} = e^{(0,0976576 + 1,36633 * Lnt')}$$

onde:

T = Tempo de aquecimento real para as respectivas classes de diâmetro, horas;

t' = Tempo de aquecimento pelo modelo proposto por Steinhagen, horas.

No estudo relativo ao efeito da vaporização de *E. grandis* no alívio das tensões de crescimento, conclui-se que:

- a) a vaporização de toras por um período de 20 horas, embora não eliminou por completo as tensões de crescimento de toras de 30 a <35, 25 a <30 e 20 a <25 cm de diâmetros, proporcionou uma redução significativa das mesmas;
- b) toras de menor diâmetro apresentaram maior abertura das tábuas em relação ao bloco. No entanto, após a vaporização todas as classes de diâmetros de toras apresentaram o mesmo índice do defeito;
- c) embora a redução do comprimento e da largura de rachaduras de tábuas oriundas de toras vaporizadas seja semelhante para as três classes de diâmetros, tanto toras controle quanto vaporizadas de menor diâmetro apresentaram menor magnitude desses defeitos quando comparadas com as de maiores dimensões.

Sobre o efeito do diâmetro de toras de *E. grandis* no comportamento das tensões de crescimento, conclui-se:

- a) de forma geral, existe entre as tábuas uma diferença nas magnitudes das tensões de crescimento com o diâmetro das toras, indicando que toras menores têm maior propensão a apresentar abertura das tábuas em relação ao bloco;
- b) existe entre as tábuas uma diferença significativa entre o comprimento e a largura das rachaduras de topo indicando que as toras de maior diâmetro produzem tábuas mais propensas a rachar.

Sobre o efeito da vaporização de toras na secagem da madeira, conclui-se:

- a) com base nos resultados obtidos, é possível afirmar que o tratamento de vaporização minimizou a ocorrência de todos os defeitos de secagem das tábuas provenientes das três classes de diâmetro das toras em estudo;
- b) tábuas de toras da classe de diâmetro de 20 a <25cm apresenta maior redução de percentagem de rachadura, encurvamento e encanoamento e a percentagem do arqueamento foi reduzida com maior intensidade nas tábuas provenientes de toras de 25 a <30 e 20 a <25cm de diâmetro.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACOSTA, M.S. Experiência argentina en la producción y utilización de la madera de eucalipto, Panorama a 1999. In: WORKSHOP: TECNICAS DE ABATE, PROCESSAMENTO E UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO, 1999, Viçosa. **Anais...** Viçosa: UFV/DEF/SIF/IEF, 1999. p.28-38.

AMARAL, A.C.B. **Defeitos na madeira de eucalipto: suas causas e possibilidades de redução (revisão bibliográfica)**. Piracicaba: ESALQ/LCF, 1991. 25p.

ANDRADE, A. **Indicação de programas para a secagem convencional de madeiras**. Piracicaba, 2000. 72f. Dissertação (Mestrado em Ciências/Ciência e Tecnologia de Madeiras) – Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiroz”/Universidade de São Paulo.

ANGYALOSSY-ALFONSO, V. **Caracterização anatômica do lenho e da casca das principais espécies de Eucalyptus L’HERIT cultivadas no Brasil**. São Paulo, 1987. 290f. Tese (Doutorado em Ciências/Botânica) – Instituto de Biociências/Universidade de São Paulo.

BOYD, J.D. The growth stresses: evidence of a origin in differentiation and lignification. **Wood Sci. Technol.**, New York, v.6, p.251-262, 1972.

CAMTEC. Catálogo eletrônico. Disponível em: <<http://www.camtec.com.br>>. Acesso em: 25 fevereiro 2003.

CAVALCANTE, A.A. **Ocorrência do colapso na secagem da madeira de Eucalyptus grandis e Eucalyptus saligna**. Piracicaba, 1991. 76f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiroz”/Universidade de São Paulo.

CECH, M.Y.; PFAFF, F. **Kiln operator’s manual Eastern Canada**. Ontário: Eastern Forest Products Laboratory, 1977. 189p.

- CHAFE, S. C. Growth stresses in trees. **Australian For. Rev.**, v.9, p.203-223, 1979.
- CHAFE, S. C. Variations in longitudinal growth stress, basic density and modulus of elasticity with height in tree. **Australian Forrest Research**, v.11, n.1, p.79-82, 1981.
- CHAFE, S. C. Variation in longitudinal with height in trees of *Eucalyptus nitens* Maiden. **Australian Forrest Research**, v.15, n.1, p.51-55, 1985.
- CHRISTENSEN, F.J. High temperature drying of hardwoods increases kiln throughput. **Forest Products Newsletters**, n.2, p.1-4 , 1985.
- CHRISTENSEN, F.J. Recent research on the hight temperature drying of sawn *Eucalyptus delegatensis* below fibre saturation point. In: 21ST FOREST PRODUCTS RESEARCH CONFERENCE, Clayton. **Proceedings** Clayton: 1984.
- CINIGLIO, G. **Avaliação da secagem de madeira serrada de *E. grandis* e *E. urophylla***. Piracicaba, 1998. 73f. Dissertação (Mestrado em Ciências/Ciências e Tecnologia de Madeiras) – Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiroz”/Universidade de São Paulo.
- DINWOODIE, J.M. Growth stresses in timber – a review of European investigations. In: INTERNATIONAL UNION OF FORESTRY RESEARCH ORGANIZATIONS – IUFRO MEETING SECCION 41., Melbourn, 1965. **Proceedings...** Melbourne: IUFRO; CSIRO, 1965. v.3, 10p.
- DUCATTI, M.A. **Diagnóstico da secagem convencional de madeiras no estado de São Paulo**. Piracicaba, 2000. 83f. Dissertação (Mestrado em Ciências/ Ciência e Tecnologia de Madeiras) – Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiroz”/Universidade de São Paulo.
- FERNADES, P.S.; FERREIRA, M.C. **Tensões de crescimento em toras de *Eucalyptus saligna* e suas relações com os diâmetros**. São Paulo: IF, 1986. 17p.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook - wood as an engineering material**. Washington: U.S. Department of Agriculture, 1999. 463p.
- FRADEN, J. **Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications**. New York: American Institute of Physics, 2 ed., 1996, 556p.
- GALVÃO, A.P.M. & JANKOWSKY, I.P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1988. 111p.
- GARCIA, J.N. Técnicas de desdobro de eucalipto. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, 1995, São Paulo. **Anais...** Piracicaba: Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais/ Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. p. 59-67.

GOES, E. **Os eucaliptos**. Portucel, 1985. 372p.

HART, C.A. **The drying of wood**. Raleigh: North Caroline Agricultural Extension Service, 1965. 24p. (Extension Circular, 471).

HARTLEY, J., GOUGH, D.K. **Future sawnood drying in Australia**. FDC, 847:232, 181: (94), p.179-190, 1990.

HAYGREEN, J.G. & BOWYER, J.L. **Forest products and wood science: an introduction**. Iowa: Iowa State University Press/AMES, 1996. 484p.

IBDF. **Norma para classificação de madeira serrada de folhosas**. Brasília: Brasiliiana, 1983. 67p.

JANKOWSK, I.P.; SANTOS, G.R.V. & ANDRADE, A. Secagem da madeira serrada de eucalipto. **Separata de Jornadas Forestales de Entre Rios**, 15, Concórdia, 2000, p.C2-1-C2-14.

KOLLMANN, F.F.P. **Tecnologia de la madera y sus aplicaciones**. Madrid: Gráficas Reunidas S.A., 1959. 677p.

KOLLMANN, F.F.P.; CÔTE Jr, W.A. **Principles of wood science and technology: I. solid wood**. New York : Springer-Verlag, 1968. 592p.

KREITH, F. Introdução. In: **Princípios da transmissão de calor**. 4ª ed., São Paulo: Edgard Blücher, 1985. cap. 1, p.1-21.

KUBLER, H. Growth stresses in trees and related wood properties. **Forest Products Abstracts**. Farnham Royal, v.10, n.3, p.61-119, 1987.

MACKAY, J.F.G.; OLIVEIRA, L.C. **Kiln operator's handbook for Western Canada**. Vancouver: Forintek Canada Corp., 1989. 61p. (Special Publication No. SP-31).

MEDINA, J.C. **Efeito da temperatura de aquecimento na obtenção de lâminas por desenrolamento e sobre a qualidade da colagem de compensados fenólicos de *Pinus elliottii* Engelm.** Curitiba, 1986. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal/Setor de Ciências Agrárias) – Universidade Federal do Paraná.

MENDES, A . M., SEVERO, E. T. D. Estudo comparativo entre três técnicas de secagem natural conduzido na região de Manaus com madeira de *Hura Creptans*. **Boletim informativo do centro de Pesquisas de Produtos Florestais/INPA**, n. 4, p. 1-14, 1984.

MONTAGNA, R.G.; PONCE, R.H.; FERNANDES, P.S.; RIBAS, C. Desdobro de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden visando a diminuir o efeito das tensões de crescimento. **Revista do Instituto Florestal**, v.3, v.2, p.181-190, 1991.

NEUMAN, R. Kiln drying young *Eucalyptus globulos* boards from green. In: WOOD DRYING SIMPOSIUM, 1989: Seattle. **Proceeding...** Seattle: IUFRO, 1989.p.107-115.

NICHOLSON, J.E. Growth stresses differences in eucalypts. **Forest Science**, v.9, n.3, p.169-174, 1973.

OLIVEIRA, J.T.S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. São Paulo, 1997. 429f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica/Universidade de São Paulo.

OLIVEIRA, J.T.S. Problemas e oportunidades com a utilização da madeira de eucalipto. **Workshop: Técnicas de abate, processamento e utilização da madeira de eucalipto**. Viçosa, 22 a 24 de junho de 1999. p. 39-52.

PONCE, R.H. Madeira serrada de eucalipto: desafios e perspectivas. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, 1995, São Paulo. **Anais...** Piracicaba: Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais/ Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. p. 50-58.

PONCE, R.H. & WATAI, L.T. **Secagem da madeira**. Brasília: STI/IPT, 1985. 70p.

ROCHA, M.P. *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus dunnii* Maiden como fontes de matéria prima para serraria. Curitiba, 2000. 185f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná.

ROCHA, M.P.; TOMASELLI, I. Efeito de modelo de corte nas dimensões de madeira serrada de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*. **Floresta e Ambiente**, v.8, n.1, p.94-103, 2001.

ROZAS MELLADO, E.C.E. **Contribuição ao desenvolvimento tecnológico para a utilização de madeira serrada de *Eucalyptus grandis* (Hill Ex Maiden) na geração de produtos com maior valor agregado**. Curitiba, 1993. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal/Setor de Ciências Agrárias) – Universidade Federal do Paraná.

SALES, C.G. Growth stresses: main results obtained on the study of guyana species and consequences for and use. In: IUFRO WORLD CONGRESS, 18, Ljubljana, 1986. **Proceedings...** Ljubljana: IUFRO, 1986, v.5, p.234-248.

SANTINI, E.J. **Alternativas para o monitoramento e controle do processo de secagem de madeira serrada em estufa**. Curitiba, 1996. 198f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal/Setor de Ciências Agrárias) – Universidade Federal do Paraná.

SANTOS, G.R.V. **Otimização da secagem da madeira de *Eucalyptus grandis* [Hill ex Maiden]**. Piracicaba, 2002. 70f. Dissertação (Mestrado em Ciências/Ciência e Tecnologia de Madeiras) – Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiroz”/Universidade de São Paulo.

SANTOS, J.A. Secagem da madeira de eucalipto. **Revista Florestal**, v.11, n.2, p.37-45, jul./dez. 1998.

SANTOS, P.E.T. **Avaliação de características tecnológicas de madeira para serraria em progênies de polinização aberta de eucalipto e implicações para o melhoramento genético**. Piracicaba, 2002. 153f. Tes (Doutorado em Agronomia/Genética e Melhoramento de Plantas) – Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiroz”/Universidade de São Paulo.

SEVERO, E.T.D. **Estudo sobre o efeito da vaporização nas propriedades e comportamento de secagem na madeira de *Eucalyptus dunnii* Maid.** Curitiba, 1998. 200f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal/Setor de Ciências Agrárias) – Universidade Federal do Paraná.

SEVERO, E.T.D. Qualidade da secagem de madeira serrada de *Eucalyptus dunnii*. **Ciência Florestal**, v.10, n.1, p.109-124, 2000.

SEVERO, E.T.D.; TOMASELLI, I. Efeito da vaporização no alívio das tensões de crescimento em toras de duas procedências de *Eucalyptus dunnii*. **Sciencia Agraria**, v.1, n.1-2, p.29-32, 2000.

SIAU, J.F. **Flow in wood**. Syracuse: Syracuse University Press, 1971. 131p.

SIMPSON, W.T. **Dry kiln operator's manual**. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, 1991. 274p.

SKAAR, C. **Wood-water relations**. New York: Springer-Verlag, 1988. 283p.

SKOLMEN, R. G. Heating Logs To Relieve Growth Stresses. **For. Prod. J.**, Madison, v. 17, p.41-2, 1967.

STEINHAGEN, H. P. Graphic method to estimate heat-conditioning periods of frozen and nonfrozen peeler blocks. **For. Prod. J.**, Madison, v. 39, n.11/12, p.21-22, 1989.

STEINHAGEN, H. P. Thermal conductive properties of wood, green or dry, from -40 to +100°C: a literature review. **USDA Forest Service FPL General Technical Report**, n. 9, p.1-10, 1977.

STEINHAGEN, H. P; LEE, H.W. & LOEHNERTZ, S.P. LOG-HEAT: a computer program for determining log heating times charts for frozen and nonfrozen logs. **For. Prod. J.**, Madison, v. 37, n.11/12, p.60-64, 1987.

STEINHAGEN, H. P; MEYERS, G.E. & KUBLER, H. Heating times charts for frozen and nonfrozen veneer logs. **For. Prod. J.**, Madison, v. 30, n.4, p.27-37, 1980.

STEINHAGEN, H. P. & ROZAS, C. Temperatura y tiempo de maceración de trozas para la obtención de chapas. **Maderas**, Concepción, v. 1, n.1, p.71-74, 1998.

TEJADA, A.; OKUYAMA, T.; YAMAMOTO, H. & YOSHIDA, M. Reduction of growth stress in logs by direct heat treatment: assessment of a commercial-scale operation. **For. Prod. J.**, Madison, v. 47, n.9, p.86-93, 1997.

TOMASELLI, I. **Aspectos físicos da secagem de madeira de *Pinus elliottii* Engelm. acima de 100°C.** Curitiba, 1981. 128f. Tese (Livre Docência em Engenharia e Tecnologia Rurais) – Universidade Federal do Paraná.- UFPR.

TURNBULL, R.F. Review of current attitudes to growth stresses. In: INTERNATIONAL UNION OF FORESTRY RESEARCH ORGANIZATIONS – IUFRO MEETING SECCION 41., Melbourn, 1965. **Proceedings...** Melbourne: IUFRO; CSIRO, 1965. v.3, 8p.

UMAÑA, C.L.A. & BRITO, E.O. Avaliação de tempos de cozimento de toras de três espécies florestais utilizadas na fabricação de laminas de madeira: In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE COMPENSADO E MADEIRA TROPICAL, 5, 2003, Pará. **Anais...** Pará: CDP, 2003. s.p.

Van WYLEN, G. J. & SONNTAG, R. E. Trabalho e calor. In: **Fundamentos da termodinâmica clássica.** 4^a ed., São Paulo: Edgard Blücher, 1984. cap. 4, p.49-66.

VERMAAS, H.F. Drying eucalypts for quality: Material characteristics, pré-drying treatments, drying methods, schedules and optimization of drying quality. **Suid-Afrikaanse Bosbouydskrif**, South Africa, n. 174, p. 41-49, 1995.

APÊNDICE 1

GUIA PARA DETERMINAR O TEMPO DE VAPORIZAÇÃO DE TORAS PROPOSTO
POR Steinhagen et al. (1980).

Determinação empírica do tempo necessário para atingir a temperatura desejada, usando a metodologia proposta por Steinhagen et al. (1980).

Dados iniciais necessários:

Umidade média das toras (UE) = 70%;

Raio médio das toras (R) = 0,1125m;

Raio do rolo resto (r) = 0,00m;

Temperatura inicial das toras (Ti) = 24,7°C;

Temperatura desejada nas toras (Td) = 82°C;

Temperatura do meio aquecedor (Ta) = 90°C;

Massa específica básica média (ME) = 0,60g/cm³.

Cálculos:

1º Passo - Determinação do raio normalizado (Rn) das toras:

$$Rn = \frac{\bar{r}}{R} = \frac{0,00}{0,1125} = 0,00 \text{ m}$$

2º Passo - Determinação da temperatura média (T) nas toras:

$$T = \frac{Ti + Td}{2} = \frac{24,7 + 82,0}{2} = 53,4^\circ \text{ C}$$

3º Passo - Determinação da difusividade térmica média das toras (D), utilizando as Figuras 33 e 34, para as seguintes condições do material: T=53,4°C, UE=70% e ME=0,60g/cm³:

$$D = d * Fa = (5,266 * 10^{-4}) * 0,98 = 5,176 * 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{h}$$

sendo:

d - difusividade térmica do material, m²/h;

Fa - fator de ajustamento;

D - difusividade térmica média das toras, m²/h.

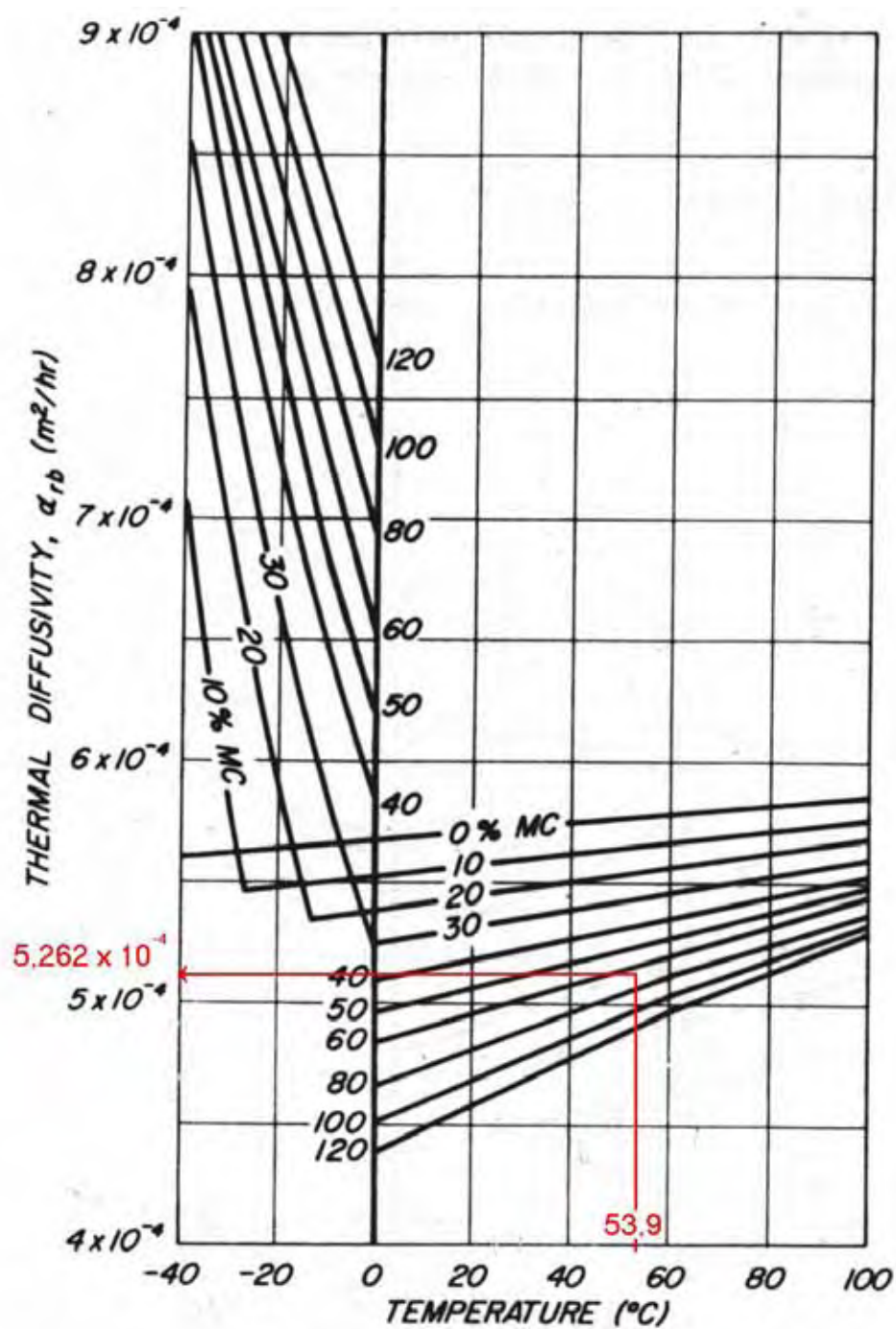


Figura 33. Difusividade térmica na direção radial em função da temperatura e do teor de umidade.

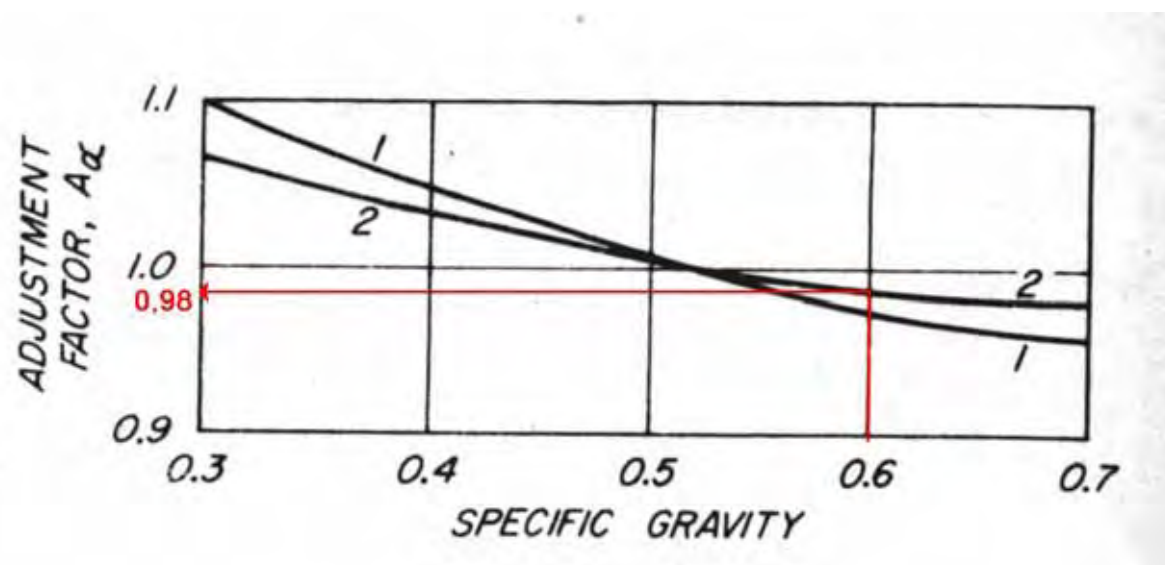


Figura 34. Fator de ajuste (Fa) segundo a massa específica para uso em conjunto com a difusividade da Figura 33. A linha 1 é válida para teores de umidade inferiores a 40%, e a linha 2 para teores de umidade superiores a 40%.

4º Passo - Determinação da temperatura normalizada (Tn) para a temperatura desejada na tora de 82°C:

$$T_n = \frac{(T_d - T_a)}{(T_i - T_a)} = \frac{(82,0 - 90,0)}{(24,7 - 90,0)} = 0,12 \text{ } ^\circ\text{C}$$

sendo:

Tn - temperatura normalizada, °C;

Td - temperatura desejada no centro das toras, °C;

Ti - temperatura inicial no centro das toras, °C.

5º Passo - Determinação do número de Furier (F) utilizando-se da Figura 35 e os valores do raio normalizado, Rn=0,00m, e temperatura normalizada, Tn=0,12°C:

$$F = 0,46$$

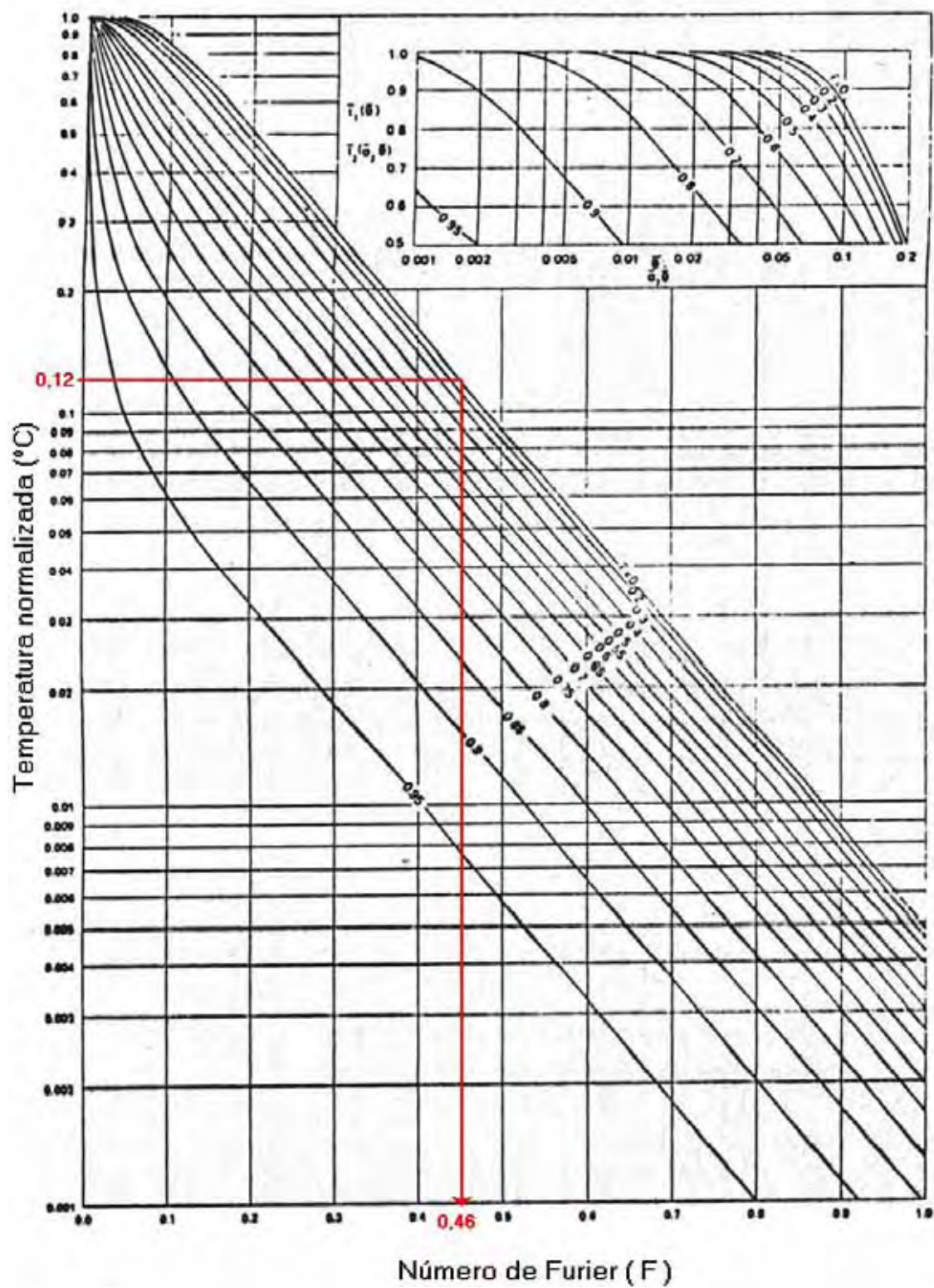


Figura 35. Relações do número de Furier (F), raio normalizado (R_n) e temperatura normalizada (T_n).

6º Passo - Cálculo do tempo de vaporização (t') para a temperatura desejada de 82°C:

$$t' = \frac{F * R^2}{D} = \frac{0,46 * (0,1125)^2}{0,0005176} = 11,3 \text{ horas}$$

sendo:

t' - tempo de vaporização das toras, horas;

F - número de Furier;

R - raio médio das toras, m;

D - difusividade térmica média das toras, $\text{m}^2 \text{h}^{-1}$.

Segundo o próprio modelo de Steinhagen et al. (1980):

- (1) Se a porcentagem dos raios lenhosos for menor que 10%, o tempo de vaporização permanece o mesmo;
- (2) Se a porcentagem dos raios lenhosos for maior que 10%, o tempo de vaporização deve ser reduzido em 12%;

Angyalossy-Alfonso (1987, p.42) estudando a caracterização anatômica da madeira de *Eucalyptus grandis* verificou que “os raios são extremamente finos (78%) e muito finos (22%) com média de 13 μm de largura e apresentam-se numa relação de 9 raios/mm”.

Portanto, para chegar à porcentagem de raios lenhosos para a espécie em estudo tem-se:

$$\text{raios (\%)} = [N_{\text{RAIOS}} * L_{\text{RAIO}}] / 100 = (9 * 13) / 100 = 11,7 \%$$

sendo:

N_{RAIOS} - número de raios por milímetro, raios/mm;

L_{RAIO} - largura média dos raios, μm ;

Raios (%) - porcentagem de raios lenhosos na madeira, %.

Como a porcentagem de raios lenhosos é maior a 10%, o tempo deverá reduzir-se em 12%:

$$t' (82^\circ \text{C}) = [11,3 - (11,3 * 0,12)] = 9,94 = 9 : 56 \text{ horas}$$

sendo:

t' - tempo de vaporização das toras pelo modelo de Steinhagen et al. (1980), horas;

APÊNDICE 2

ANÁLISES DE REGRESSÃO DOS TEMPOS DE VAPORIZAÇÃO REAL PARA TORAS
DE *EUCALYPTUS GRANDIS* EM FUNÇÃO DO TEMPO DE VAPORIZAÇÃO
DETERMINADO PELO MODELO DE STEINHAGEN.

APÊNDICE 2-1: ANÁLISE DE REGRESSÃO DO TEMPO DE VAPORIZAÇÃO REAL PARA TORAS DE *EUCALYPTUS GRANDIS* COM 20 A <25CM DE DIÂMETRO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE VAPORIZAÇÃO DETERMINADO PELO MODELO DE STEINHAGEN.

$$\ln(T)=0,201847+1,135681*\ln(t')$$

$$R^2=0,97$$

$$R^2_{\text{ajustado}}=0,97$$

$$F(1,283)=9460,4$$

$$P<0,000000$$

$$S_{yx}=0,10278$$

Variável	Coefficientes	Erro padrão	t (283)	P-valor
b₀	0.201847	0.017633	11.447008	<0.000000
b₁	1.135681	0.0116762	97.264383	<0.000000

Legenda:

T = Tempo de vaporização real;

t' = Tempo de vaporização determinado pelo modelo de Steinhagen;

R² = Coeficiente de determinação;

R²_{ajustado} = Coeficiente de determinação ajustado;

F = valor de “F” da Regressão;

P = Probabilidade;

S_{yx} = Erro Padrão da Estimativa;

b₀ e b₁ = Coeficientes da equação.

Curva de regressão representando o tempo de vaporização real para toras de *Eucalyptus grandis* com 20 a <25cm de diâmetro em função do tempo de aquecimento determinado pelo modelo de Steinhagen.

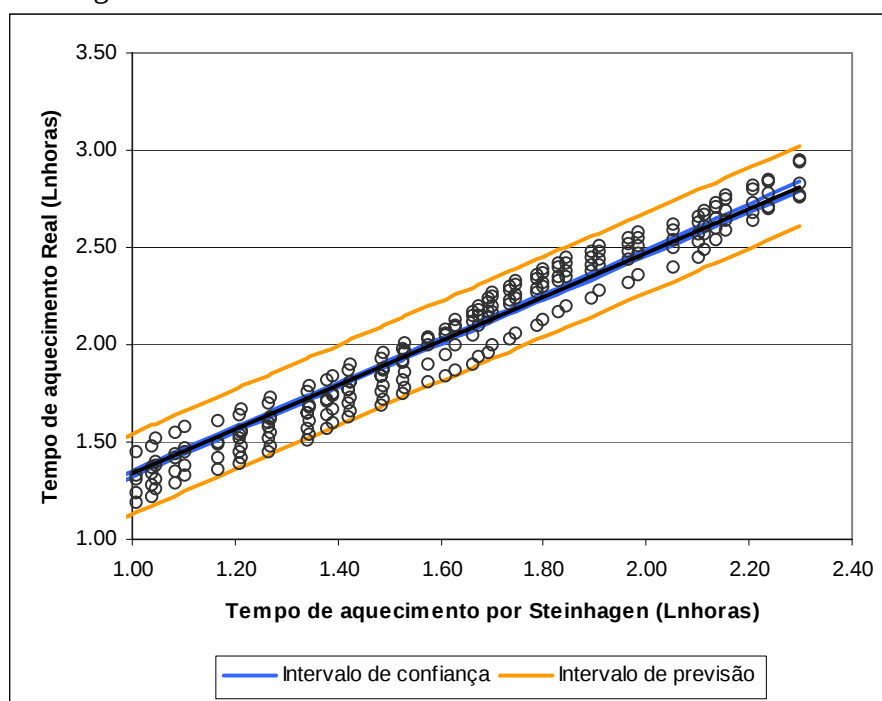
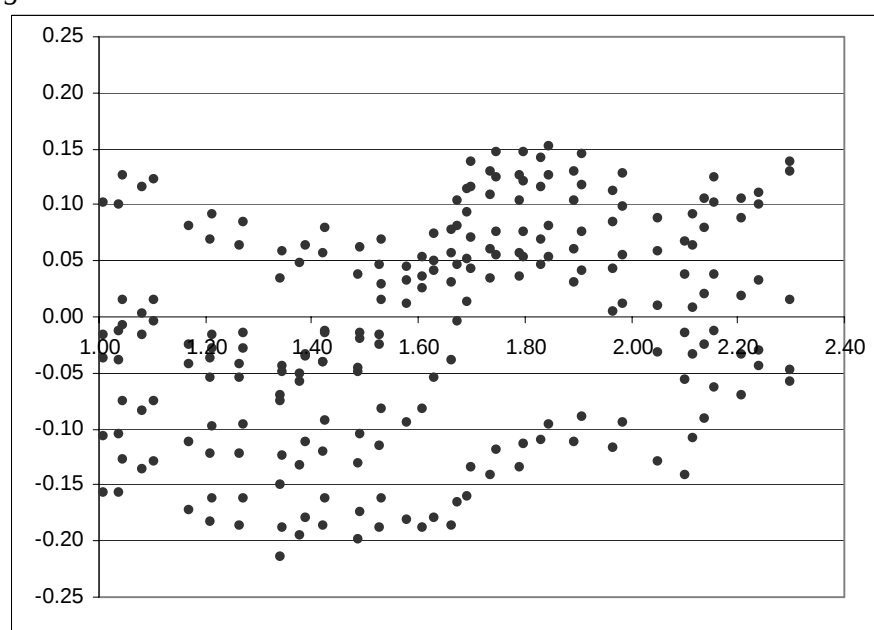


Gráfico da dispersão dos erros da regressão representando o tempo de vaporização determinado pelo modelo de Steinhagen em função do tempo de vaporização real para toras de *Eucalyptus grandis* com 20 a <25cm de diâmetro.



APÊNDICE 2-2: ANÁLISE DE REGRESSÃO DO TEMPO DE VAPORIZAÇÃO REAL PARA TORAS DE *EUCALYPTUS GRANDIS* COM 25 A <30CM DE DIÂMETRO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE VAPORIZAÇÃO DETERMINADO PELO MODELO DE STEINHAGEN.

$$\ln(T)=0,175077+1,140002*\ln(t')$$

$$R^2=0,95$$

$$R^2_{\text{ajustado}}=0,95$$

$$F(1,213)=4309,6$$

$$P<0,000000$$

$$S_{yx}=0,10657$$

Variável	Coefficientes	Erro padrão	t (283)	P-valor
b₀	0.175077	0.0291836	5.999149	<0.000000
b₁	1.140002	0.0173654	65.647655	<0.000000

Legenda:

T = Tempo de vaporização real;

t' = Tempo de vaporização determinado pelo modelo de Steinhagen;

R² = Coeficiente de determinação;

R²_{ajustado} = Coeficiente de determinação ajustado;

F = valor de “F” da Regressão;

P = Probabilidade;

S_{yx} = Erro Padrão da Estimativa;

b₀ e b₁ = Coeficientes da equação.

Curva de regressão representando o tempo de vaporização real para toras de *Eucalyptus grandis* com 25 a <30cm de diâmetro em função do tempo de vaporização determinado pelo modelo de Steinhagen.

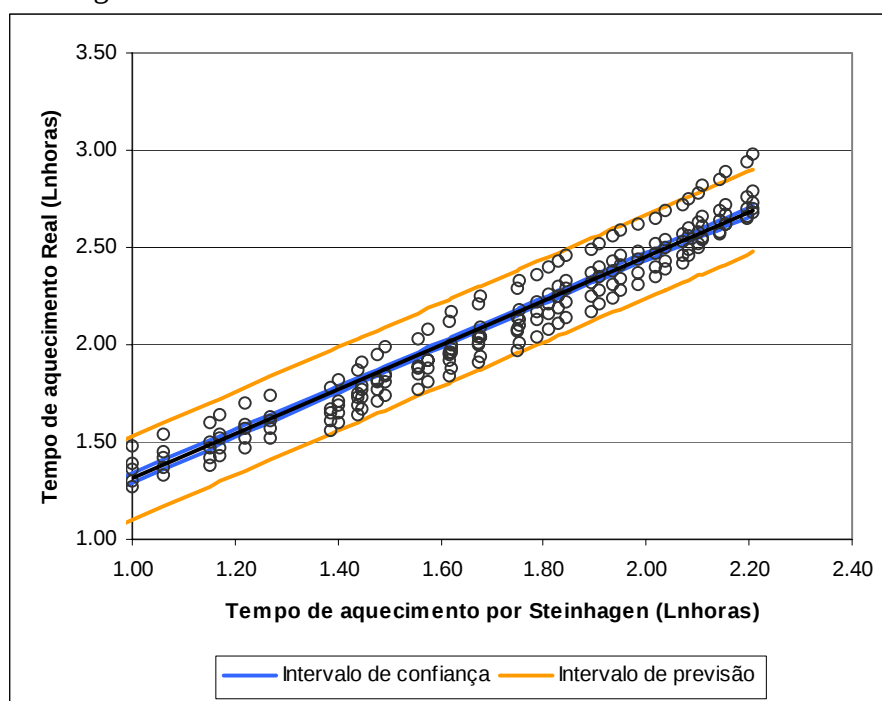
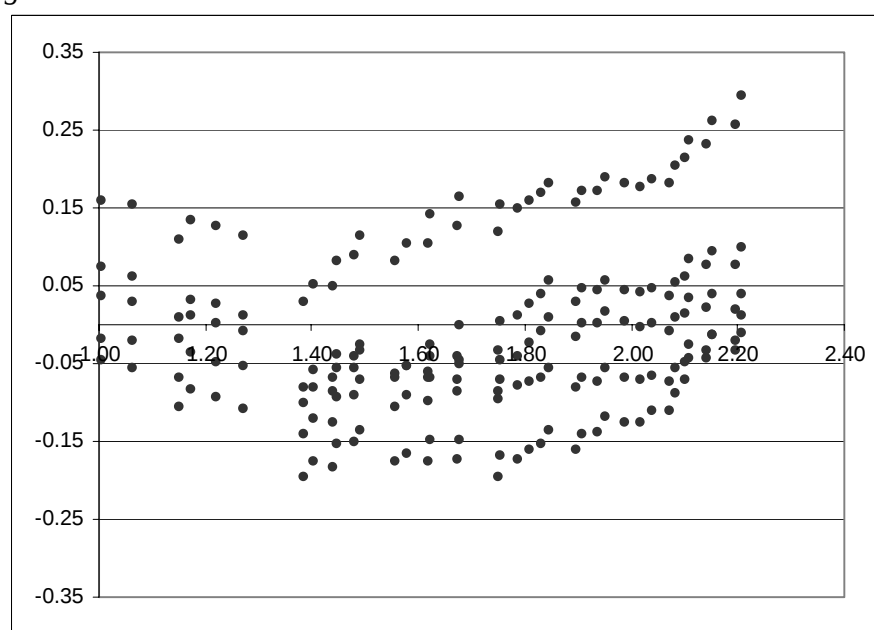


Gráfico da dispersão dos erros da regressão representando o tempo de vaporização determinado pelo modelo de Steinhagen em função do tempo de vaporização real para toras de *Eucalyptus grandis* com 25 a <30cm de diâmetro.



APÊNDICE 2-3: ANÁLISE DE REGRESSÃO DO TEMPO DE VAPORIZAÇÃO REAL PARA TORAS DE *EUCALYPTUS GRANDIS* COM 30 A <35CM DE DIÂMETRO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE VAPORIZAÇÃO DETERMINADO PELO MODELO DE STEINHAGEN.

$$\ln(T)=0,0976576+1,136633*\ln(t')$$

$$R^2=0,85$$

$$R^2_{\text{ajustado}}=0,85$$

$$F(1,83)=483,7$$

$$P<0,000000$$

$$S_{yx}=0,1461$$

Variável	Coefficientes	Erro padrão	t (83)	P-valor
b₀	0.0976576	0.0972439	1.004254	0.31817
b₁	1.136633	0.062124	21.993508	<0.000000

Legenda:

T = Tempo de vaporização real;

t' = Tempo de vaporização determinado pelo modelo de Steinhagen;

R² = Coeficiente de determinação;

R²_{ajustado} = Coeficiente de determinação ajustado;

F = valor de “F” da Regressão;

P = Probabilidade;

S_{yx} = Erro Padrão da Estimativa;

b₀ e b₁ = Coeficientes da equação.

Curva de regressão representando o tempo de vaporização real para toras de *Eucalyptus grandis* com 30 a <35cm de diâmetro em função do tempo de vaporização determinado pelo modelo de Steinhagen.

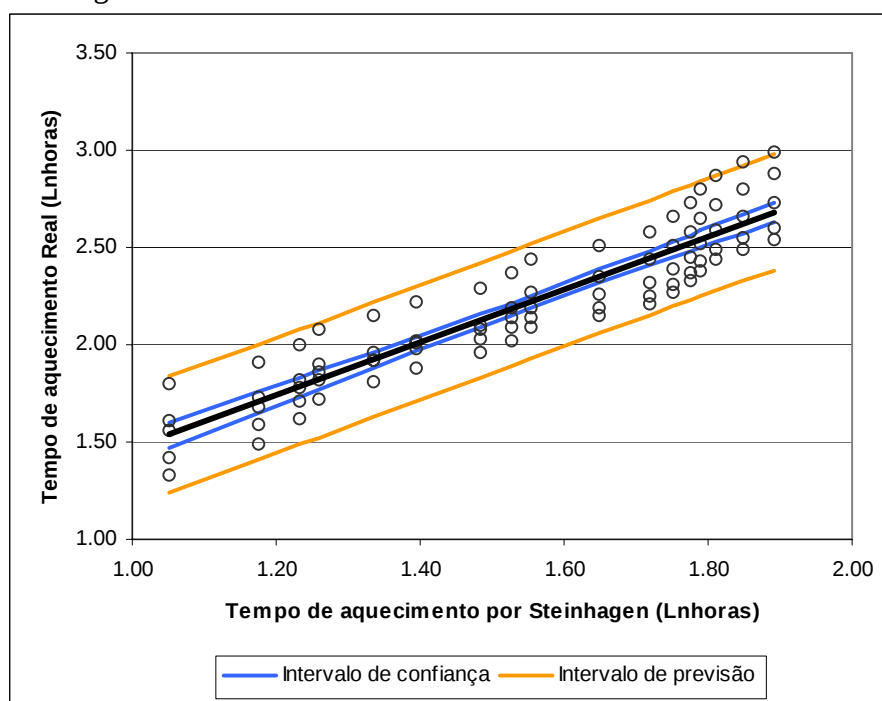
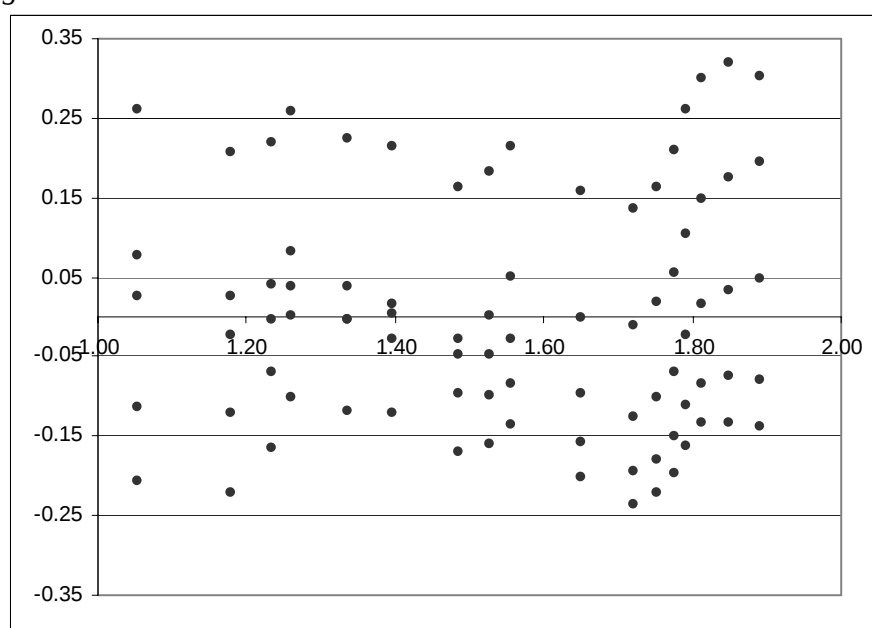


Gráfico da dispersão dos erros da regressão representando o tempo de vaporização determinado pelo modelo de Steinhagen em função do tempo de vaporização real para toras de *Eucalyptus grandis* com 30 a <35cm de diâmetro.



APÊNDICE 3

ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS PARA AS VARIÁVEIS DO DESDOBRO.

APÊNDICE 3-2: ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS DA VARIÁVEL COMPRIMENTO DE RACHADURAS (cm) DE TOPO DE TÁBUAS APÓS O DESDOBRAMENTO DE TORAS DE 20-25, 25-30 E 30-35CM DE DIÂMETRO.

Estatística básica

N	420
Média	68.82286
Desvio Padrão	38.70644
Coefficiente de variação	56.24067

Teste de Normalidade

Teste	P-valor
Shapiro – Wilk	<0.0001
Kolmogorov - Smirnov	<0.0100
Cramer - von Mises	<0.0050
Anderson - Darling	<0.0050

Histograma

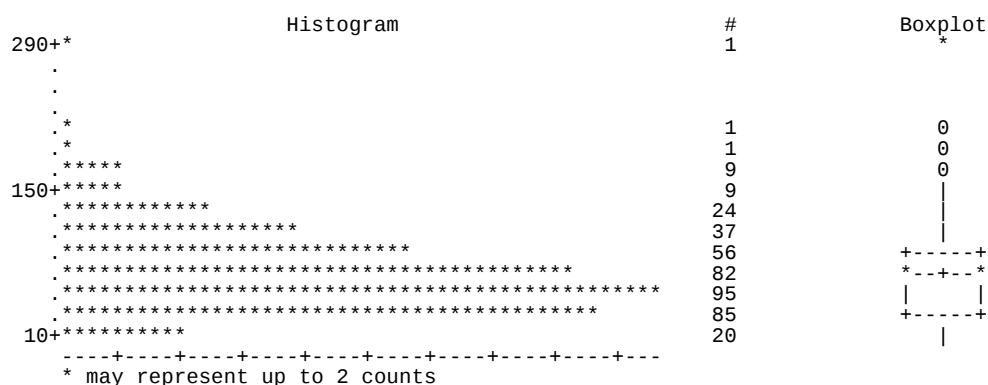
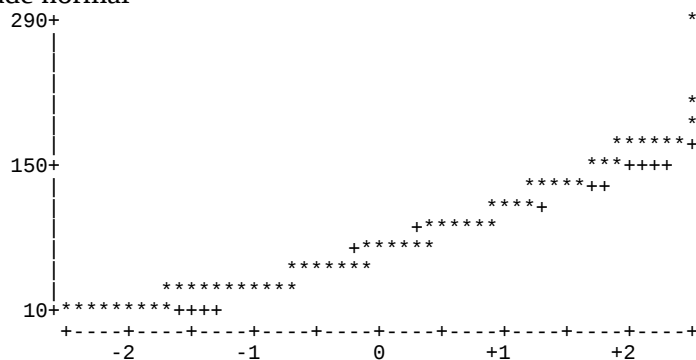


Gráfico de probabilidade normal



APÊNDICE 3-3: ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS DA VARIÁVEL LARGURA DE RACHADURAS (mm) DE TOPO DE TÁBUAS APÓS O DESDOBRAMENTO DE TORAS DE 20-25, 25-30 E 30-35CM DE DIÂMETRO.

Estatística básica

N	420
Média	12.00952
Desvio Padrão	9.98256
Coeficiente de variação	83.12201

Teste de Normalidade

Teste	P-valor
Shapiro – Wilk	<0.0001
Kolmogorov - Smirnov	<0.0100
Cramer - von Mises	<0.0050
Anderson - Darling	<0.0050

Histograma

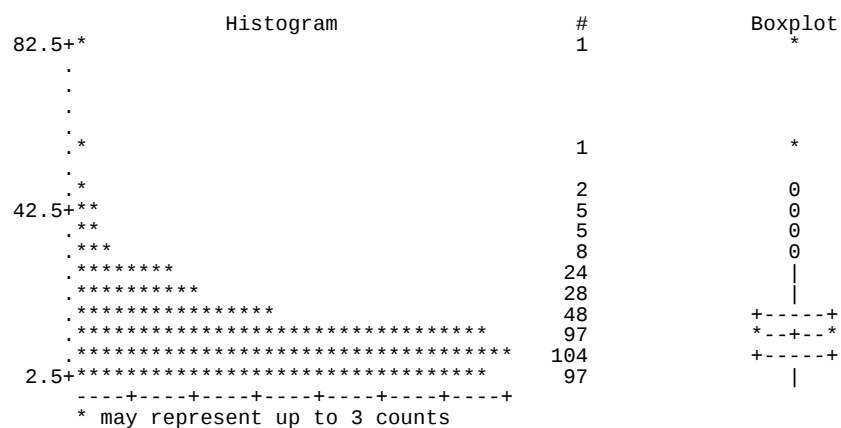
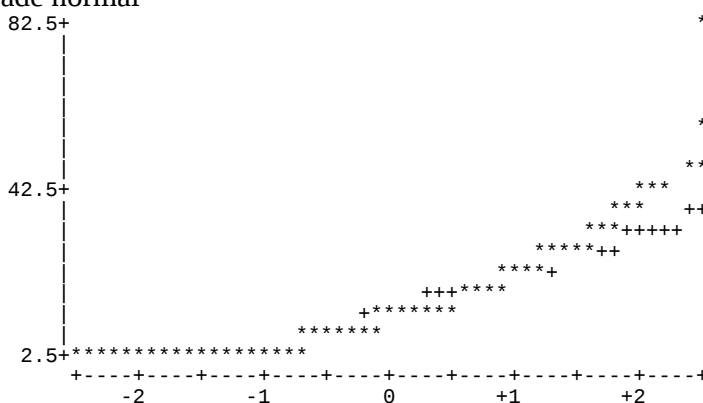


Gráfico de probabilidade normal



APÊNDICE 4

ANÁLISE ESTATÍSTICA NÃO PARAMÉTRICA PARA AS VARIÁVEIS DO
DESDODRO.

TABELA 4-1: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL ABERTURA DE TÁBUAS EM RELAÇÃO AO BLOCO CLASSIFICADAS SEGUNDO OS TRATAMANTOS, COM TODAS AS TORAS AGRUPADAS EM UMA ÚNICA CLASSE DE DIÂMETRO.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
Controle	192	44780.0	39264.0	1187.88713	232.854167	24.85417	<0.0001
Vaporizada	216	38728.0	44172.0	1187.88713	179.296292	20.15278	

TABELA 4-2: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL COMPRIMENTO DA RACHADURA DE TOPOS DE TÁBUAS CLASSIFICADAS SEGUNDO OS TRATAMANTOS, COM TODAS AS TORAS AGRUPADAS EM UMA ÚNICA CLASSE DE DIÂMETRO.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
Controle	196	51190.0	41258.0	1241.08423	261.173469	85.23827	<0.0001
Vaporizada	224	37220.0	47152.0	1241.08423	166.160714	54.45938	

TABELA 4-3: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL LARGURA DA RACHADURA DE TOPOS DE TÁBUAS CLASSIFICADAS SEGUNDO OS TRATAMANTOS, COM TODAS AS TORAS AGRUPADAS EM UMA ÚNICA CLASSE DE DIÂMETRO.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
Controle	196	52353.0	41258.0	1239.84854	267.107143	16.31633	<0.0001
Vaporizada	224	36057.0	47152.0	1239.84854	160.968750	8.24107	

TABELA 4-4: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL ABERTURA DE TÁBUAS EM RELAÇÃO AO BLOCO CLASSIFICADAS SEGUNDO OS TRATAMANTOS, PARA TORAS DE 30 A 35cm DE DIÂMETRO.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
Controle	73	5744.50	5511.50	265.71704	78.691781	20.89041	0.3806
Vaporizada	77	5580.50	5813.50	265.71704	72.474026	19.58442	

TABELA 4-5: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL COMPRIMENTO DA RACHADURA DE TOPOS DE TÁBUAS CLASSIFICADAS SEGUNDO OS TRATAMANTOS, PARA TORAS DE 30 A 35cm DE DIÂMETRO.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
Controle	75	7500.0	5812.50	276.64032	100.000000	106.31467	<0.0001
Vaporizada	79	4435.0	6122.50	276.64032	56.139241	69.38101	

TABELA 4-6: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL LARGURA DA RACHADURA DE TOPOS DE TÁBUAS CLASSIFICADAS SEGUNDO OS TRATAMANTOS, PARA TORAS DE 30 A 35cm DE DIÂMETRO.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
Controle	75	7317.0	5812.0	276.37613	97.560000	20.48000	<0.0001
Vaporizada	79	4618.0	6122.0	276.37613	58.455696	10.84810	

TABELA 4-7: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL ABERTURA DE TÁBUAS EM RELAÇÃO AO BLOCO CLASSIFICADAS SEGUNDO OS TRATAMANTOS, PARA TORAS DE 25 A 30cm DE DIÂMETRO.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
Controle	76	7123.50	6042.0	287.07920	93.730263	24.75000	<0.0002
Vaporizada	82	5437.50	6519.0	287.07920	66.310976	19.71951	

TABELA 4-8: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL COMPRIMENTO DA RACHADURA DE TOPOS DE TÁBUAS CLASSIFICADAS SEGUNDO OS TRATAMANTOS, PARA TORAS DE 25 A 30cm DE DIÂMETRO.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
Controle	78	7984.0	6435.0	303.70092	102.358974	82.00641	<0.0001
Vaporizada	86	5546.0	7095.0	303.70092	64.488372	53.52093	

TABELA 4-9: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL LARGURA DA RACHADURA DE TOPOS DE TÁBUAS CLASSIFICADAS SEGUNDO OS TRATAMANTOS, PARA TORAS DE 25 A 30cm DE DIÂMETRO.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
Controle	78	8298.0	6435.0	303.36775	106.384615	15.79487	<0.0001
Vaporizada	86	5232.0	7095.0	303.36775	60.837209	7.88372	

TABELA 4-10: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL ABERTURA DE TÁBUAS EM RELAÇÃO AO BLOCO CLASSIFICADAS SEGUNDO OS TRATAMANTOS, PARA TORAS DE 20 A 25cm DE DIÂMETRO.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
Controle	43	2787.50	2171.50	143.13892	64.825581	31.76744	<0.0001
Vaporizada	57	2262.50	2878.50	143.13892	39.692982	21.54386	

TABELA 4-11: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL COMPRIMENTO DA RACHADURA DE TOPOS DE TÁBUAS CLASSIFICADAS SEGUNDO OS TRATAMANTOS, PARA TORAS DE 20 A 25cm DE DIÂMETRO.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
Controle	43	2869.0	2214.50	147.56290	66.720930	54.33954	<0.0001
Vaporizada	59	2384.0	3038.50	147.56290	40.406780	35.84746	

TABELA 4-12: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL LARGURA DA RACHADURA DE TOPOS DE TÁBUAS CLASSIFICADAS SEGUNDO OS TRATAMANTOS, PARA TORAS DE 20 A 25cm DE DIÂMETRO.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
Controle	43	2856.50	2214.50	147.12417	66.430233	10.000000	<0.0001
Vaporizada	59	2396.50	3038.50	147.12417	40.618644	5.271186	

TABELA 4-13: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL ABERTURA DE TÁBUAS EM RELAÇÃO AO BLOCO CLASSIFICADAS SEGUNDO OS DIÂMETROS.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
30-35cm	73	5724.50	7044.50	373.50428	78.417808	20.89041	<0.0001
25-30cm	76	7307.50	7334.00	376.26729	96.151316	24.75000	
20-25cm	43	5496.00	4149.50	320.76578	127.813953	31.76744	

TABELA 4-14: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL COMPRIMENTO DA RACHADURA DE TOPOS DE TÁBUAS CLASSIFICADAS SEGUNDO OS DIÂMETROS.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
30-35cm	75	9798.00	7387.50	385.97920	130.640000	106.31467	<0.0001
25-30cm	78	7290.50	7683.00	388.71285	93.467949	82.00641	
20-25cm	43	2217.50	4235.50	328.64008	51.569767	54.33954	

TABELA 4-15: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL LARGURA DA RACHADURA DE TOPOS DE TÁBUAS CLASSIFICADAS SEGUNDO OS DIÂMETROS.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
30-35cm	75	8919.50	7387.50	385.57667	118.926667	20.48000	<0.0001
25-30cm	78	7728.50	7683.00	388.30747	99.083333	15.79487	
20-25cm	43	2658.00	4235.50	328.29735	61.813953	10.00000	

APÊNDICE 5

TESTE DE NEMENYI PARA COMPARAÇÕES MÚLTIPAS PARA AS VARIÁVEIS DO
DESDODRO.

TABELA 5-1: TESTE DE COMPARAÇÕES MULTIPLAS DE NEMENYI PARA A VARIÁVEL ABERTURA DE TÁBUAS EM RELAÇÃO AO BLOCO CLASSIFICADAS SEGUNDO OS DIÂMETROS.

Tratamento	30-35cm	25-30cm	20-25cm
30-35cm	X	X	X
25-30cm	NS	X	X
20-25cm	*	*	X

TABELA 5-2: TESTE DE COMPARAÇÕES MULTIPLAS DE NEMENYI PARA A VARIÁVEL COMPRIMENTO DA RACHADURA DE TOPOS DE TÁBUAS CLASSIFICADAS SEGUNDO OS DIÂMETROS.

Tratamento	30-35cm	25-30cm	20-25cm
30-35cm	X	X	X
25-30cm	*	X	X
20-25cm	*	*	X

TABELA 5-3: TESTE DE COMPARAÇÕES MULTIPLAS DE NEMENYI PARA A VARIÁVEL LARGURA DA RACHADURA DE TOPOS DE TÁBUAS CLASSIFICADAS SEGUNDO OS DIÂMETROS.

Tratamento	30-35cm	25-30cm	20-25cm
30-35cm	X	X	X
25-30cm	NS	X	X
20-25cm	*	*	X

APÊNDICE 6

ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS PARA AS VARIÁVEIS DA SECAGEM.

APÊNDICE 6-1: ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS DA VARIÁVEL ÍNDICE DE RACHADURA (%) NA TÁBUA APÓS A SECAGEM.

Estatística básica

N	218
Média	27.8361
Desvio Padrão	14.22367
Coefficiente de variação	51.09793

Teste de Normalidade

Teste	P-valor
Shapiro – Wilk	0.0004
Kolmogorov - Smirnov	0.0304
Cramer - von Mises	0.0083
Anderson – Darling	<0.0050

Histograma

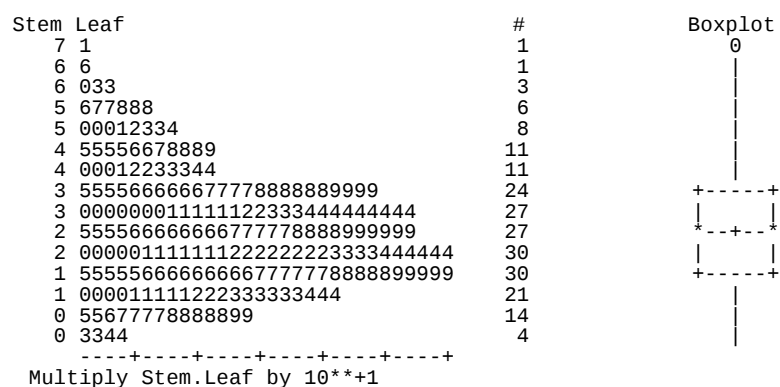
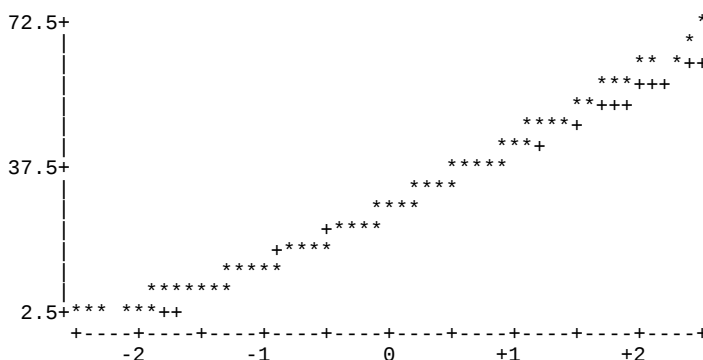


Gráfico de probabilidade normal



APÊNDICE 6-2: ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS DA VARIÁVEL ÍNDICE DE ENCURVAMENTO (%) NA TÁBUA APÓS A SECAGEM.

Estatística básica

N	4218
Média	0.26908
Desvio Padrão	0.12481
Coefficiente de variação	46.38716

Teste de Normalidade

Teste	P-valor
Shapiro – Wilk	0.0009
Kolmogorov – Smirnov	<0.0100
Cramer - von Mises	<0.0050
Anderson – Darling	<0.0050

Histograma

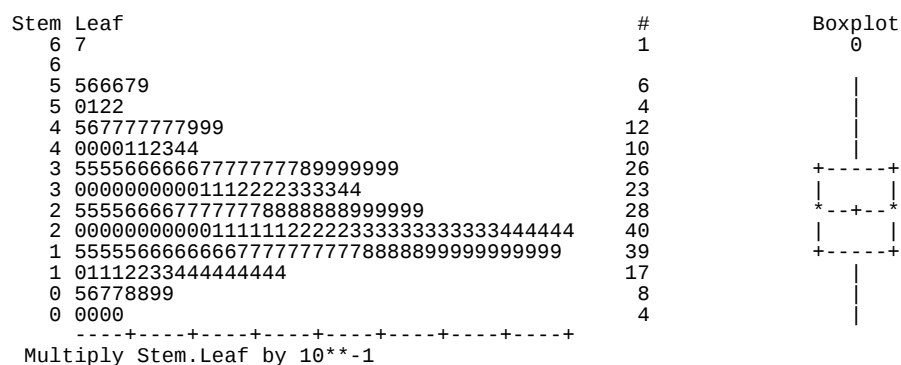
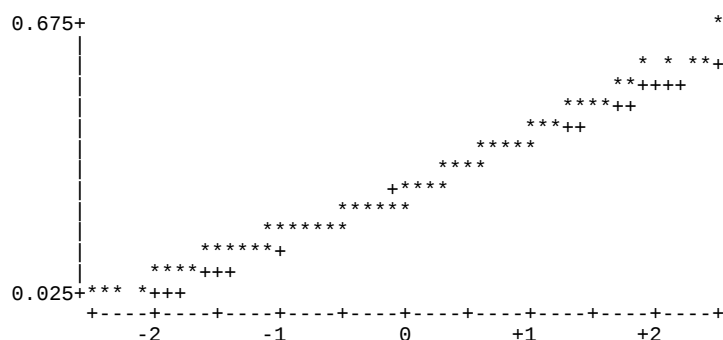


Gráfico de probabilidade normal



APÊNDICE 7

ANÁLISE ESTATÍSTICA NÃO PARAMÉTRICA PARA AS VARIÁVEIS DA SECAGEM.

TABELA 7-1: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL ÍNDICE DE RACHADURA (%) NA TÁBUA APÓS A SECAGEM, COM TODAS AS TÁBUAS PROVENIENTES DE TORAS AGRUPADAS EM UMA ÚNICA CLASSE DE DIÂMETRO.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
Controle	106	13672.50	11607.0	465.469377	128.985849	32.24	<0.0001
Vaporizada	112	10198.50	12264.0	465.469377	91.058036	26.67	

TABELA 7-2: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL ÍNDICE DE ENCURVAMENTO (%) NA TÁBUA APÓS A SECAGEM, COM TODAS AS TÁBUAS PROVENIENTES DE TORAS AGRUPADAS EM UMA ÚNICA CLASSE DE DIÂMETRO.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
Controle	106	11847.0	11607.0	465.220624	111.764151	0.2729	0.6059
Vaporizada	112	12024.0	12264.0	465.220624	107.357143	0.2654	

TABELA 7-3: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL ÍNDICE DE ARQUEAMENTO (%) NA TÁBUA APÓS A SECAGEM, COM TODAS AS TÁBUAS PROVENIENTES DE TORAS AGRUPADAS EM UMA ÚNICA CLASSE DE DIÂMETRO.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
Controle	106	12501.50	11607.0	465.110699	117.938679	0.3327	0.0545
Vaporizada	112	11369.50	12264.0	465.110699	101.513393	0.3087	

TABELA 7-4: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL ENCANOAMENTO (mm) NA TÁBUA APÓS A SECAGEM, COM TODAS AS TÁBUAS PROVENIENTES DE TORAS AGRUPADAS EM UMA ÚNICA CLASSE DE DIÂMETRO.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
Controle	106	13537.00	11607.0	464.222521	127.707547	3.0585	<0.0001
Vaporizada	112	10334.00	12264.0	464.222521	92.267857	2.0879	

TABELA 7-5: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL ÍNDICE DE RACHADURA (%) NA TÁBUA APÓS A SECAGEM, PARA TÁBUAS PROVENIENTES DE TORAS DE 30-35cm DE DIÂMETRO.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
Controle	42	1995.0	1785.0	111.779338	47.50	37.42	0.0603
Vaporizada	42	1575.0	1785.0	111.779338	37.50	30.53	

TABELA 7-6: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL ÍNDICE DE ENCURVAMENTO (%) NA TÁBUA APÓS A SECAGEM, PARA TÁBUAS PROVENIENTES DE TORAS DE 30-35cm DE DIÂMETRO.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
Controle	42	1815.0	1785.0	111.678001	43.214286	0.2783	0.7882
Vaporizada	42	1755.0	1785.0	111.678001	41.785714	0.2790	

TABELA 7-7: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL ÍNDICE DE ARQUEAMENTO (%) NA TÁBUA APÓS A SECAGEM, PARA TÁBUAS PROVENIENTES DE TORAS DE 30-35cm DE DIÂMETRO.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
Controle	42	1899.50	1785.0	111.665540	45.226190	0.3467	0.3052
Vaporizada	42	1670.50	1785.0	111.665540	39.773810	0.3340	

TABELA 7-8: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL ENCANOAMENTO (mm) NA TÁBUA APÓS A SECAGEM, PARA TÁBUAS PROVENIENTES DE TORAS DE 30-35cm DE DIÂMETRO.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
Controle	42	1988.50	1785.0	111.005943	47.345238	3.0441	0.0668
Vaporizada	42	1581.50	1785.0	111.005943	37.654762	2.3214	

TABELA 7-9: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL ÍNDICE DE RACHADURA (%) NA TÁBUA APÓS A SECAGEM, PARA TÁBUAS PROVENIENTES DE TORAS DE 25-30cm DE DIÂMETRO.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
Controle	38	1901.0	1577.0	107.538555	50.026316	31.35	0.0026
Vaporizada	44	1502.0	1826.0	107.538555	34.136364	22.67	

TABELA 7-10: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL ÍNDICE DE ENCURVAMENTO (%) NA TÁBUA APÓS A SECAGEM, PARA TÁBUAS PROVENIENTES DE TORAS DE 25-30cm DE DIÂMETRO.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
Controle	38	1612.0	1577.0	107.412075	42.421053	0.2624	0.7445
Vaporizada	44	1791.0	1826.0	107.412075	40.704545	0.2586	

TABELA 7-11: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL ÍNDICE DE ARQUEAMENTO (%) NA TÁBUA APÓS A SECAGEM, PARA TÁBUAS PROVENIENTES DE TORAS DE 35-30cm DE DIÂMETRO.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
Controle	38	1752.0	1577.0	107.402114	46.105263	0.3184	0.1032
Vaporizada	44	1651.0	1826.0	107.402114	37.522727	0.2818	

TABELA 7-12: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL ENCANOAMENTO (mm) NA TÁBUA APÓS A SECAGEM, PARA TÁBUAS PROVENIENTES DE TORAS DE 25-30cm DE DIÂMETRO.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
Controle	38	1820.0	1577.0	107.484116	47.894737	3.0934	0.0238
Vaporizada	44	1583.0	1826.0	107.484116	35.977273	2.3773	

TABELA 7-13: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL ÍNDICE DE RACHADURA (%) NA TÁBUA APÓS A SECAGEM, PARA TÁBUAS PROVENIENTES DE TORAS DE 20-25cm DE DIÂMETRO.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
Controle	26	920.50	689.0	54.638922	35.403846	25.18	<0.0001
Vaporizada	26	457.50	689.0	54.638922	17.596154	14.26	

TABELA 7-14: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL ÍNDICE DE ENCURVAMENTO (%) NA TÁBUA APÓS A SECAGEM, PARA TÁBUAS PROVENIENTES DE TORAS DE 20-25cm DE DIÂMETRO.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
Controle	26	711.0	689.0	54.602754	27.346154	0.2796	0.6870
Vaporizada	26	667.0	689.0	54.602754	25.653846	0.2550	

TABELA 7-15: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL ÍNDICE DE ARQUEAMENTO (%) NA TÁBUA APÓS A SECAGEM, PARA TÁBUAS PROVENIENTES DE TORAS DE 20-25cm DE DIÂMETRO.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
Controle	26	728.0	689.0	54.552547	28.0	0.3312	0.4747
Vaporizada	26	650.0	689.0	54.552547	25.0	0.3131	

TABELA 7-16: TESTE DE KRUSKAL – WALLIS PARA A VARIÁVEL ENCANOAMENTO (mm) NA TÁBUA APÓS A SECAGEM, PARA TÁBUAS PROVENIENTES DE TORAS DE 20-25cm DE DIÂMETRO.

Tratamento	N	Soma de Escore	Expectativa abaixo de H0	Desvio Padrão abaixo de H0	Escore Médio	Média	p-valor
Controle	26	891.50	689.0	54.277338	34.288462	3.0308	0.0002
Vaporizada	26	486.50	689.0	54.277338	18.711538	1.2212	