

ELIAS TAYLOR DURGANTE SEVERO

**ESTUDO SOBRE O EFEITO DA VAPORIZAÇÃO
NAS PROPRIEDADES E COMPORTAMENTO
DE SECAGEM DA MADEIRA DE
Eucalyptus dunnii Maid.**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de "Doutor em Ciências Florestais".

Orientador: Prof. Dr. Ivan Tomaselli

CURITIBA
1998



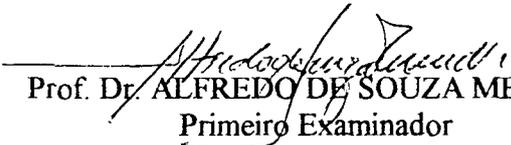
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA FLORESTAL

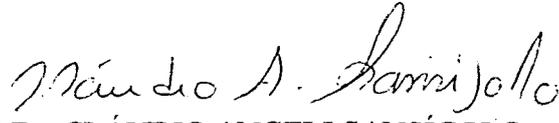
P A R E C E R

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, reuniram-se para realizar a arguição da Tese de **DOUTORADO**, apresentada pelo candidato **ELIAS TAYLOR DURGANTE SEVERO**, sob o título "**ESTUDO SOBRE O EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NAS PROPRIEDADES E COMPORTAMENTO DE SECAGEM DA MADEIRA DE *Eucalyptus dunnii* Maid.**". para obtenção do grau de **Doutor** em Ciências Florestais, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, Área de Concentração **TECNOLOGIA E UTILIZAÇÃO DE PRODUTOS FLORESTAIS**

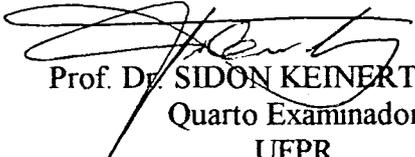
Após haver analisado o referido trabalho e arguido a Candidato são de parecer pela "**APROVAÇÃO**" da Tese, com média final: (9,36), correspondente ao conceito (A).

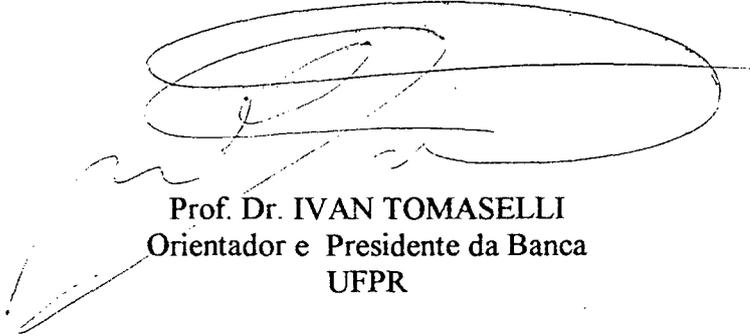
Curitiba, 27 DE NOVEMBRO DE 1998


Prof. Dr. ALFREDO DE SOUZA MENDES
Primeiro Examinador
MCT


Prof. Dr. CLÁUDIO ANGELI SANSÍGOLO
Segundo Examinador
UNESP/DCF


Pesq. Dr. JOSÉ CARLOS DUARTE
PEREIRA
Terceiro Examinador
EMBRAPA/CNPF


Prof. Dr. SIDON KEINERT JUNIOR
Quarto Examinador
UFPR


Prof. Dr. IVAN TOMASELLI
Orientador e Presidente da Banca
UFPR

À minha esposa LIZELE

À meus filhos WALTER e PAULA

À meus Pais ORIENTE e ARGEMIRA

DEDICO.

AGRADECIMENTO

Ao professor Ivan Tomaselli, pela orientação, sugestões, estímulo e amizade.

Ao professor Setsuo Iwakiri e ao pesquisador José Carlos Duarte Pereira, pela co-orientação e sugestões apresentadas.

Ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, pela aceitação na Área de Concentração Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais, e posterior apoio financeiro para realização do referido Curso.

À Universidade Estadual Paulista, que possibilitou a realização deste Curso.

A Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuária (EMBRAPA), pelo fornecimento do material, bem como a seus Pesquisadores e funcionários pelo auxílio prestado na coleta e preparo do material, sem o que a realização deste trabalho seria impossível.

Ao professor Jorge Matos, por suas sugestões apresentadas, estímulo e amizade.

Aos demais professores do Departamento de Engenharia e Tecnologia Rurais, bem como aos colegas pós-graduandos, que emprestaram sua amizade e apoio durante a realização deste Curso.

Aos funcionários que auxiliaram na preparação do material, em especial aos senhores Ricardo Klitzke, Ademir Cavalli, Vitor Herrera e Antonio Perin.

Ao Engenheiro Agrônomo Angelo Catâneo, pelo auxílio no planejamento e execução da análise estatística.

As funcionárias Sylvia e Shirley do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Estadual Paulista, pelo auxílio na digitação deste trabalho.

A todos aqueles que colaboraram de maneira direta ou indireta, e que emprestaram sua amizade durante a realização deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

ELIAS TAYLOR DURGANTE SEVERO, filho de Oriente Severo e Argemira Durgante Severo, nasceu em Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul, em 22 de Janeiro de 1956.

Em 1982 graduou-se em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Santa Maria, RS.

Em Julho de 1982 ingressou no convênio Universidade Federal de Santa Maria-Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal, atuando na Área de Sensoriamento Remoto.

Em 1984 ingressou no Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, como Pesquisador Assistente.

Entre os anos de 1986 e 1989 realizou o Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, na Universidade Federal do Paraná, onde obteve o título de Mestre em Ciências Florestais - M.Sc. na Área de Concentração Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

Em 1989 ingressou na Universidade Estadual Paulista, como Professor das disciplinas de Secagem e Preservação da Madeira, onde ocupa atualmente o cargo de Professor Assistente.

Em 1994 iniciou o Programa de Doutorado no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, concluindo o presente trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xiii
1. INTRODUÇÃO	01
OBJETIVOS	02
2. REVISÃO DE LITERATURA	03
2.1 EUCALYPTUS E SUA UTILIZAÇÃO	03
2.2. PROPRIEDADES DA MADEIRA	09
2.2.1. Composição Química.....	09
2.2.2. Propriedades Físicas.....	12
2.2.2.1. Massa Específica.....	12
2.2.2.2. Retratibilidade.....	14
2.2.3. Propriedades Mecânicas.....	15
2.2.3.1 Propriedades de Elasticidade.....	16
2.2.3.2 Propriedades de Resistência.....	19
2.2.3.3.Efeito da Temperatura nas Propriedades Mecânicas.....	22
2.3. SECAGEM DA MADEIRA	31
2.3.1. Aspectos Físicos da Secagem.....	31
2.3.2. Efeito da Vaporização na Secagem.....	38
2.3.2.1.Considerações Gerais.....	38
2.3.2.2. Vaporização Preliminar a Secagem.....	38
2.3.2.3. Vaporização Final.....	42
2.4. LIMITAÇÕES DO USO DA MADEIRA DE EUCALYPTUS	43
2.4.1. Tensões de Crescimento.....	43
2.4.1.1 Origem das Tensões de Crescimento.....	44
2.4.1.2. Distribuição das Tensões de Crescimento.....	47
2.4.1.3. Formas de Atenuação das Tensões de Crescimento.....	52
2.4.2. Processo de Secagem.....	55
2.4.3. Colapso na Madeira.....	56

2.4.3.1. Tensão Capilar - Tensão Hidrostática	57
2.4.3.2. Mecanismo do Colapso	60
3. MATERIAL E MÉTODO	64
3.1 ESPÉCIE UTILIZADA.....	64
3.2. COLETA DO MATERIAL	64
3.3. TRATAMENTO PARA ALÍVIO DAS TENSÕES DE CRESCIMENTO.....	66
3.3.1 Anelamento	66
3.3.2. Vaporização das Toras.....	68
3.4. DESDOBRO DAS TORAS	68
3.5 AVALIAÇÃO DAS TENSÕES DE CRESCIMENTO	69
3.6 SECAGEM EM ESTUFA DE LABORATÓRIO.....	70
3.6.1 Preparo do Material	70
3.6.2 . Vaporização da Madeira	72
3.6.3 Secagem da Madeira.....	73
3.6.4. Determinação da Taxa de Secagem.....	73
3.6.5. Determinação do Gradiente de Umidade	75
3.6.6. Determinação do Teor de Umidade, Volume Inicial, Massa específica e Contração Volumétrica	76
3.7 SECAGEM EM ESTUFA PILOTO.....	77
3.7.1. Preparo das Tábuas.....	77
3.7.2 Determinação do Teor de Umidade Inicial.....	78
3.7.3 Empilhamento da Madeira.....	79
3.7.4 Programas de Secagem	79
3.7.5 Monitoramento do Teor de Umidade	82
3.7.6. Equipamento de Secagem e Sistema Gerenciador.....	83
3.7.7 Avaliação da Secagem	86
3.7.7.1 Defeitos de Secagem.....	86
3.7.7.2 Taxa de Secagem.....	89
3.8 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA.....	89
3.8.1 Preparo do Material	89
3.8.2 Propriedades Mecânicas da Madeira.....	89

3.8.3. Análise Estatística	92
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	93
4.1 EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NO ALÍVIO DAS TENSÕES DE CRESCIMENTO	93
4.2 SECAGEM EM ESTUFA DE LABORATÓRIO	98
4.2.1 Efeito da Vaporização no Teor de Umidade Inicial	98
4.2.2 Efeito da Vaporização no Volume Inicial	101
4.2.3 Efeito da Vaporização na Contração Volumétrica	105
4.2.4 Efeito da Vaporização na Massa Específica	112
4.2.5 Efeito da Vaporização na Taxa de Secagem	115
4.2.6 Efeito da Vaporização no Gradiente de Umidade	121
4.3 SECAGEM EM ESTUFA PILOTO	126
4.3.1 Considerações Gerais	126
4.3.2 Qualidade da Madeira	126
4.3.3 Tempo e Taxa de Secagem	133
4.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA	138
4.4.1 Considerações Gerais	138
4.4.2 Considerações Sobre a Umidade de Equilíbrio nas Propriedades Mecânicas ...	138
4.4.3 Resultados do Efeito da Vaporização nas Propriedades Mecânicas	141
4.4.4 Discussão dos Resultados no Efeito da Vaporização nas Propriedades Mecânicas	151
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	156
ANEXOS	159
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	186

LISTA DE FIGURAS

FIGURA.

1	DIAGRAMA TENSÃO DEFORMAÇÃO DA MADEIRA EM FLEXÃO ESTÁTICA. MODELO TEÓRICO.	17
2	EFEITO IMEDIATO DA TEMPERATURA SOBRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA OS TEORES DE UMIDADE DE 0% E 12%, RELATIVO À TEMPERATURA DE 20°C	23
3	EFEITO IMEDIATO DA TEMPERATURA SOBRE O MÓDULO DE RUPTURA PARA OS TEORES DE UMIDADE DE 0%, 12% E 18%, RELATIVO À TEMPERATURA DE 20°C.	23
4	MÓDULO DE RUPTURA EM MADEIRA SUBMETIDA A AQUECIMENTO EM ÁGUA (LINHA CHEIA) E EM VAPOR SATURADO (LINHA TRACEJADA)	26
5	ESQUEMA SIMPLIFICADO DO MOVIMENTO DE ÁGUA EM UM CAPILAR).	33
6	ESQUEMA DE UMA BOLHA DE AR NO INTERIOR DA CÉLULA.	34
7	ESQUEMA DOS POSSÍVEIS CAMINHOS DA ÁGUA DURANTE O PROCESSO DE DIFUSÃO.	37
8	DISTRIBUIÇÃO TEÓRICA DAS TENSÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS.	48
9	EFEITO DAS TENSÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS: A) PONTOS DE MEDIÇÃO FIXADOS NA PRANCHA (B) EMPENAMENTO DE PEÇAS SERRADAS (C) VARIAÇÃO DE SEUS COMPRIMENTOS	49
10	DISTRIBUIÇÃO TEÓRICA DAS TENSÕES DE CRESCIMENTO TRANSVERSAIS: (A) ÁRVORE DE APROXIMADAMENTE 60 CM DE DIÂMETRO E (B) ÁRVORE DE APROXIMADAMENTE 120 CM DE DIÂMETRO.	50
11	DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAL, TANGENCIAL E RADIAL NO TRONCO DE <i>EUCALYPTUS</i> .	51
12	AUMENTO DA BOLHA NO LIQUIDO	59

13	MECANISMO DO COLAPSO	61
14	ANELAMENTO DAS ÁRVORES E TORAS COMO MOTOSSERRA; A) ANELAMENTO NA ÁRVORE; B) ANELAMENTO NAS TORAS	67
15	ESQUEMA UTILIZADO NO DESDOBRO DAS TORAS, A) TÁBUAS, B) PRANCHA PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA.	69
16	FORMA DE MEDIÇÃO DAS RACHADURAS APÓS O DESDOBRO E SECAGEM DAS TÁBUAS.	70
17	FORMA DE OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS TESTES PARA AVALIAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE SECAGEM.	71
18	ESQUEMA PARA OBTENÇÃO DAS SECÇÕES E SUAS RESPECTIVAS PORÇÕES “X “, “Y “ E “D” DAS AMOSTRA TESTES PAREADAS	72
19	ESQUEMA PARA OBTENÇÃO DO GRADIENTE DE UMIDADE.	75
20	FORMA DE OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA UTILIZADOS NO ESTUDO DO EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NAS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE SECAGEM	77
21	FORMA DE OBTENÇÃO DAS SUB-AMOSTRAS PARA DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE INICIAL DA CARGA DE MADEIRA PARA SECAGEM EM ESTUFA PILOTO	78
22	APARATO UTILIZADO PARA PESAGEM DA CARGA DE MADEIRA	82
23	ESQUEMA DA ESTUFA PILOTO DE SECAGEM UTILIZADA NO ESTUDO	84
24	FLUXOGRAMA DO SOFTWARE DE CONTROLE DO PROCESSO DE SECAGEM	85
25	EMPENAMENTOS E SUA MEDIÇÃO	86
26	AVALIAÇÃO DO ENCANOAMENTO	87
27	EFEITO DA VAPORIZAÇÃO DAS TORAS NA ABERTURA MÉDIA DAS TÁBUAS DURANTE O DESDOBRO..	95
28	EFEITO DA VAPORIZAÇÃO DAS TORAS NO COMPRIMENTO MÉDIO DAS RACHADURAS EM TÁBUAS.	95

29	EFEITO DA VAPORIZAÇÃO DAS TORAS NA LARGURA MÉDIAS DAS RACHADURAS EM TÁBUAS.	96
30	EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NO TEOR DE UMIDADE INICIAL DE MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS CONTROLE.	100
31	EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NO TEOR DE UMIDADE INICIAL DE MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS VAPORIZADAS.	100
32	EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NO VOLUME INICIAL DE MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS CONTROLE	103
33	EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NO VOLUME INICIAL DE MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS VAPORIZADAS	103
34	EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NA CONTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS CONTROLE	108
35	EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NA CONTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS VAPORIZADAS.	108
36	EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NO COLAPSO RECUPERÁVEL DE MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS CONTROLE.	110
37	EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NO COLAPSO RECUPERÁVEL DE MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS VAPORIZADAS.	111
38	EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NA MASSA ESPECÍFICA BÁSICA DE MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS CONTROLE.	114
39	EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NA MASSA ESPECÍFICA BÁSICA DE MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS VAPORIZADAS.	114
40	EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NA TAXA DE SECAGEM DE MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS CONTROLE.	119
41	EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NA TAXA DE SECAGEM DE MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS VAPORIZADAS.	119
42	EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NA REDUÇÃO DO GRADIENTE DE UMIDADE DA MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS CONTROLE	124
43	EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NA REDUÇÃO DO GRADIENTE DE UMIDADE DE MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS VAPORIZADAS.	124

44	PORCENTAGEM DE COLAPSO OBTIDO NOS TRÊS PROGRAMAS DE SECAGEM	128
45	PORCENTAGEM DE ENCANOAMENTO, RACHADURAS, ENCURVAMENTO E ARQUEAMENTO OBTIDO COM O EMPREGO DOS PROGRAMAS DE SECAGEM 1, 2 E 3.	131
46	TAXA DE SECAGEM OBTIDA NOS PROGRAMAS 1, 2 E 3 PARA O INTERVALO DE UMIDADE DE VERDE ATÉ 12% DE UMIDADE.	134
47	EFEITO DOS TRATAMENTOS DE VAPORIZAÇÃO NO MÓDULO DE ELASTICIDADE (MOE), TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL (TLP) E MÓDULO DE RUPTURA (MOR) NA CONDIÇÃO SATURADA	143
48	EFEITO DOS TRATAMENTOS DE VAPORIZAÇÃO NO MÓDULO DE ELASTICIDADE (MOE), TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL (TLP) E MÓDULO DE RUPTURA (MOR) NA CONDIÇÃO CLIMATIZADA.	143
49	EFEITO DOS TRATAMENTOS DE VAPORIZAÇÃO NO ESFORÇO NO LIMITE PROPORCIONAL (ELP) EM COMPRESSÃO PERPENDICULAR AS FIBRAS E RESISTÊNCIA MÁXIMA (R.MÁX.) EM COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS NA CONDIÇÃO SATURADA	147
50	EFEITO DOS TRATAMENTOS DE VAPORIZAÇÃO NO ESFORÇO NO LIMITE PROPORCIONAL (ELP) EM COMPRESSÃO PERPENDICULAR AS FIBRAS E RESISTÊNCIA MÁXIMA (R.MÁX.) EM COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS NA CONDIÇÃO CLIMATIZADA	147
51	EFEITO DOS TRATAMENTOS DE VAPORIZAÇÃO NA RESISTÊNCIA MÁXIMA AO CISALHAMENTO NO SENTIDO RADIAL E TANGENCIAL DA MADEIRA NA CONDIÇÃO SATURADA.	150
52	EFEITO DOS TRATAMENTOS DE VAPORIZAÇÃO NA RESISTÊNCIA MÁXIMA AO CISALHAMENTO NO SENTIDO RADIAL E TANGENCIAL DA MADEIRA NA CONDIÇÃO CLIMATIZADA	150

LISTA DE TABELAS

TABELA.

1	ÁREA PLANTADA E ESTIMATIVA DE VOLUME DE EUCALIPTOS POR ESTADO NO BRASIL	5
2	INCREMENTO MÉDIO ANUAL POR ESTADO	6
3	ANÁLISES QUÍMICAS DAS MADEIRAS DE VÁRIAS ESPÉCIES DE EUCALIPTOS	10
4	VALORES MÉDIOS DE RETRATIBILIDADE (%) E FATOR ANISOTRÓPICO PARA A MADEIRA DE SETE ESPÉCIES DE <i>EUCALYPTUS</i>	15
5	VALORES MÉDIOS DE MADEIRAS DICOTILEDÔNIAS NATIVAS E FLORESTAMENTO	21
6	NÚMERO, DIÂMETRO MÉDIO DAS ÁRVORES E TORAS DE <i>EUCALYPTUS DUNNII</i> EMPREGADOS NO ESTUDO	65
7	PLANEJAMENTO DE UTILIZAÇÃO DAS ÁRVORES SELECIONADAS POR PROCEDÊNCIA	66
8	PROGRAMA DE SECAGEM 1.	80
9	PROGRAMA DE SECAGEM 2.	81
10	PROGRAMA DE SECAGEM 3.	81
11	DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA E CONDIÇÕES DE ENSAIO.	90
12	EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NO ALÍVIO DAS TENSÕES DE CRESCIMENTO	94
13	TEOR DE UMIDADE INICIAL EM CORPOS DE PROVAS VAPORIZADOS E NÃO VAPORIZADOS	99
14	VOLUME INICIAL DE CORPOS DE PROVA VAPORIZADOS E NÃO VAPORIZADOS.	102
15	CONTRAÇÃO VOLUMÉTRICA TOTAL ANTES E APÓS O RECONDICIONAMENTO E COLAPSO RECUPERÁVEL EM MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS CONTROLE.	106

16	CONTRAÇÃO VOLUMÉTRICA TOTAL ANTES E APÓS O RECONDICIONAMENTO E COLAPSO RECUPERÁVEL EM MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS VAPORIZADAS	107
17	MASSA ESPECÍFICA BÁSICA EM CORPOS DE PROVAS VAPORIZADOS E NÃO VAPORIZADOS	113
18	TAXA DE SECAGEM PARA MADEIRA VAPORIZADA E NÃO VAPORIZADA PROVENIENTE DE TORAS CONTROLE.	117
19	TAXA DE SECAGEM PARA MADEIRA VAPORIZADA E NÃO VAPORIZADA PROVENIENTE DE TORAS VAPORIZADAS	118
20	GRADIENTE DE UMIDADE ENTRE AS CAMADAS EXTERNAS E CENTRO, E ENTRE AS CAMADAS INTERMEDIÁRIAS E O CENTRO DA PEÇA PARA MADEIRA VAPORIZADA. E NÃO VAPORIZADA PROVENIENTE DE TORAS CONTROLE.	122
21	GRADIENTE DE UMIDADE ENTRE AS CAMADAS EXTERNAS E CENTRO, E ENTRE AS CAMADAS INTERMEDIÁRIAS E O CENTRO DA PEÇA PARA MADEIRA VAPORIZADA. E NÃO VAPORIZADA PROVENIENTE DE TORAS VAPORIZADA	123
22	CLASSIFICAÇÃO DOS DEFEITOS PARA MADEIRA SUBMETIDA A SECAGEM NOS PROGRAMAS 1, 2, E 3.	127
23	TEMPOS E DE TAXAS DE SECAGEM OBTIDAS PARA OS PROGRAMAS DE SECAGEM UTILIZADOS NO ESTUDO.	135
24	TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO PARA OS CORPOS DE PROVA APÓS O ACONDICIONAMENTO EM CAMARA CLIMATIZADA	139
25	MÓDULO DE ELASTICIDADE , MÓDULO DE RUPTURA E TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL EM FLEXÃO ESTÁTICA.	142
26	ESFORÇO NO LIMITE PROPORCIONAL EM COMPRESSÃO PERPENDICULAR E RESISTÊNCIA MÁXIMA EM COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS.	146
27	RESISTENCIA MÁXIMA AO CISALHAMENTO NO SENTIDO TANGENCIAL E RADIAL	149

RESUMO

O objetivo do presente estudo foi desenvolver tecnologia apropriada para disponibilidade e utilização da madeira de *Eucalyptus dunnii* como alternativa para a indústria de madeira sólida. Para isso, inicialmente foi realizado um tratamento de anelamento com motosserra e posteriormente uma vaporização de 20 horas nas toras (100°C/100% umidade relativa) visando o alívio das tensões de crescimento. A avaliação destes tratamentos foi realizada através de análise da forma como estas tensões se manifestam na madeira, ou seja, rachaduras e aberturas das tábuas em relação a tora durante o desdobro. Posteriormente realizou-se um estudo, em estufa elétrica de laboratório, sobre o efeito da vaporização inicial na secagem da madeira nas diversas variáveis deste processo. Avaliou-se ainda, o comportamento de secagem desta espécie em estufa convencional piloto utilizando-se três programas de secagem. Cada programa de secagem teve uma vaporização inicial de 3 horas e uma vaporização de 5 horas para recuperação do colapso quando a madeira encontrava-se a 17% de umidade. Como parte do estudo, avaliou-se ainda o efeito do tratamento de vaporização sobre as propriedades mecânicas da madeira desta espécie. Os resultados mostram que o anelamento e vaporização das toras proporcionaram a liberação de grande parte das tensões de crescimento, sem contudo eliminá-las por completo e que este tratamento é efetivo e recomendável para liberação das tensões de crescimento. 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. Contudo, este tratamento proporcionou um aumento na contração volumétrica e colapso da madeira. Entre os programas de secagem utilizados, somente o programa considerado mais suave, apresentou um bom resultado em termos de qualidade de madeira seca, além de apresentar um tempo considerado muito reduzido, cerca de 180 horas (7,5 dias) para secar tábuas de 2,4 mm de espessura desde 80,2% até 12% de umidade final. Entre as propriedades mecânicas da madeira, com exceção do módulo de elasticidade (MOE) em flexão estática, que apresentou aumento com a pré-vaporização (madeira vaporizada em tora por 20 horas e novamente vaporizada por 3 horas) na condição saturada e o esforço no limite proporcional (ELP) em compressão perpendicular às fibras que não se alteraram-se com a pré-vaporização, as demais propriedades, ou seja, tensão no limite proporcional (TLP) e módulo de ruptura (MOR) em flexão estática, resistência máxima (R_{máx.}) em compressão paralela às fibras e resistência máxima (R_{máx.}) ao cisalhamento no sentido radial e tangencial, foram reduzidos com a pré-vaporização na condição climatizada. Já a TLP e o MOR em flexão estática mostraram reduzir com a pré-vaporização também na condição saturada.

ABSTRACT

The aim of the present study was the development of appropriate technology for the availability and usage of *Eucalyptus dunnii* wood as an alternative for the solid wood industry. In order to do it so, a ringment treatment was performed with a chain-saw and later on, a 20 hour vaporization on the logs (100°C/100% relative humidity) towards the growing strains relief. The assessment of these treatments was performed by means of analysis on how these strains manifestate on the wood, what means, cracks and gaps on boards in relation to the log during the sawing process. A study was carried out subsequently, in an electric laboratory oven, about the effects of the initial vaporization on the wood drying on the several variables of this process. It was also assessed the behaviour of this kind by drying in a laboratory conventional kiln type using three drying schedules. Each drying schedule had an initial vaporization of three hours and a 5 hour vaporization to recover from the collapse when the wood was at 17% of humidity. As a part of the study, it was also assessed the vaporization treatment effect on the mechanical properties of this kind of wood. The results show that the ringment process and the vaporization of the logs provided the release of a great part of the growing strains, without, however, eliminate them completely, showing, nevertheless, that this treatment is effective and advisable for the growing strains relief. The wood initial vaporization showed to be effective on the reduction of the initial humidity content, humidity grading and on the increase of the drying rate of this kind of wood. However, this treatment provided an increase on the voluminous concentration and on the wood collapse. Among the drying schedules used, only schedule one, regarded as the lightest one, displayed a good result concerning dry wood quality, besides from showing a period of time considered as very reduced, about 180 hours (7,5 days) for drying 2,4 mm thick boards from 80,2% to 12% final humidity. Among the wood mechanical properties, except for the modulus of elasticity in static bending, which displayed an increase with the pre-vaporization (20 hour vaporized wood in log and then vaporized again for 3 hours) on the saturated condition and the crushing strength at limit of proportionality on perpendicular compression, the other properties, what means, fiber stress at limit of proportional and modulus of rupture in static bending, crushing strength in parallel compression to the fibers and shear strength (radial and tangential direction), reduced with the pre-vaporization on the climatized condition. On the other hand, stress at limit of proportionality and the modulus of rupture in static bending showed to reduce with the pre-vaporization also on the saturated condition.

1. INTRODUÇÃO

A redução da disponibilidade de madeira proveniente de florestas naturais, bem como o aumento da oferta de madeira de eucaliptos proveniente de reflorestamentos da região sul, vem despertando cada vez mais o interesse pelo uso de espécies deste gênero. Por suas características físico-mecânicas a madeira de *Eucalyptus* spp. apresenta-se como possibilidade viável de substituir as espécies consagradas vindas de florestas nativas. Entretanto até o momento, a sua utilização é basicamente restrita a produção de celulose e papel, carvão vegetal, lenha e chapas de composição.

O seu emprego mais nobre tem causado frustrações durante o processamento da madeira devido ao aparecimento de defeitos que conduzem a consideráveis perdas de matéria-prima e conseqüente perdas econômicas. As principais frustrações quanto a utilização deste gênero, em particular como madeira serrada, prendem-se primeiramente as suas características desfavoráveis intrínsecas concernentes a tensões de crescimento e, posteriormente, a sua elevada retratibilidade e colapso durante a secagem.

As tensões de crescimento são assim denominadas por se constituírem em tensões associadas ao crescimento normal de uma árvore, tendo sua origem na camada cambial. Tais tensões possuem magnitude variada, podendo ser de tração ou de compressão em função da localização dentro do xilema e da sua direção de atuação: longitudinal, tangencial e radial.

A secagem é hoje reconhecida como um elemento vital que deve ser agregada ao processamento da madeira sólida, existindo atualmente uma forte ênfase em melhorar a qualidade de secagem bem como reduzir seus custos. A principal razão para secagem da madeira é assegurar de que a madeira seja dimensionalmente tão estável quanto antes do uso em uma estrutura ou item manufaturado. Quando a madeira na condição verde é submetida a secagem ela contrai, com maior intensidade na direção perpendicular a grã. Pela secagem da madeira até o teor de umidade de equilíbrio com o meio ambiente nos efetivamente a “pré contraímos”, com o objetivo de assegurar que qualquer subsequente movimento da madeira em trabalho no seu uso final seja pequena ou negligenciável e acomodada dentro da forma do produto final. Uma meta comum nas pesquisas sobre secagem da madeira de eucaliptos é

reduzir os longos tempos de secagem e conseqüentemente custos envolvidos neste processamento. (CAMPBELL & HARTLY, 1978).

Um grande número de pré-tratamentos tem sido empregado para reduzir o tempo e aumentar a taxa de secagem da madeira, por exemplo, pré-vaporização, pré-congelamento, pré-compressão e vários tratamentos químicos. No entanto, a pré-vaporização é especialmente atrativa por ser uma técnica que pode ser adotada como método comercial, devido a pouca ou nenhuma mudança necessária em termos de equipamentos ou na operação básica em uma indústria.

O presente estudo encontra-se inserido dentro de uma linha de pesquisa, conduzida pelo Centro Nacional de Pesquisa de Florestas – EMBRAPA, que visa o desenvolvimento tecnológico da madeira de *Eucalyptus dunnii*. Entre os estudos que estão sendo desenvolvidos com esta espécie encontram-se trabalhos de caracterização tais como: composição química, distribuição da massa específica ao longo do tronco e diâmetro das árvores, laminação, madeira serrada (secagem da madeira, propriedades físicas e mecânicas da madeira, usinagem e acabamento), chapas de aglomerado e energia (lenha)

1.1 OBJETIVOS

O presente estudo visa contribuir para o desenvolvimento de tecnologia apropriada para disponibilização e utilização de madeira de *Eucalyptus dunnii* como alternativa para indústria de madeira sólida.

Neste estudo os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Avaliar o efeito da vaporização das toras no alívio das tensões de crescimento em duas procedências de *Eucalyptus dunnii*.
- Avaliar o efeito da vaporização no comportamento de secagem e propriedades mecânicas da madeira.
- Avaliar o comportamento de secagem da madeira *Eucalyptus dunnii* em estufa piloto.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 EUCALYPTUS E SUA UTILIZAÇÃO

O eucalipto é em geral considerado como sendo originário da Austrália, embora algumas espécies deste gênero também sejam nativas de outros países do mundo, como a Nova Guiné, Filipinas e Indonésia (FAO, 1981).

Segundo PRYOR & JOHNSON (1971), existem no mundo cerca de 500 espécies e subespécies dentro do gênero eucaliptos. Porém, se levarmos em consideração o incremento médio anual da madeira, somente 10 espécies destacam-se entre estas: *E. grandis*, *E. camaldulensis*, *E. saligna*, *E. urophylla*, *E. deglupta*, *E. exserta*, *E. citriodora*, *E. paniculata* e *E. robusta* (ELDRIGGE & CROMER, 1987).

Pelo seu elevado ritmo de crescimento, adaptabilidade à variadas condições climáticas e troncos limpos e esteticamente atraivos, o eucaliptos passou a ser considerado há várias décadas como um dos mais importantes gêneros utilizados em reflorestamento de rápido crescimento em todo o mundo.

Os primeiros ensaios de reflorestamento com esta espécie datam de 1854, principalmente com *E. globulus*, na época a espécie mais conhecida. Nesta oportunidade já existiam plantações de eucalipto bem sucedidas na Espanha e Portugal (PRYOR, 1976). Posteriormente na Índia, por volta de 1856, surgiam povoamentos bem desenvolvidos de eucaliptos na região referida como colinas de Nilgiris (FAO 1981, MATHUR, 1983, ELDRIDGES, 1986).

No Brasil, os eucaliptos mais antigos são duas árvores de *E. saligna* e de *E. tereticornes*, trazidas para o Brasil por D. Pedro I e plantados no Jardim Botânico do Rio de Janeiro. As placas fixadas nestas árvores trazem impressas o ano de 1825, posteriormente em 1968 ocorreram alguns plantios no Rio Grande do Sul.

Porém, a efetiva implantação do gênero foi realizada por Edmundo Navarro de Andrade entre 1905 e 1919 na então Companhia Paulista de Estrada de Ferro (JACOBS, 1973, FAO, 1981). No ano de 1904, o principal objetivo de Navarro de Andrade era indicar para o reflorestamento ao longo das linhas das estradas de ferro da Companhia, as espécies mais

interessantes economicamente. Para isso, testou no Horto Florestal de Jundiaí noventa e cinco espécies, dentre elas: eucaliptos, peroba, pinheiro do Paraná, jequetibá, cabriúva, carvalho português, casuarina e grevilha. Já em 1906, os eucaliptos despontavam como a espécie mais promissora e a partir de 1909, passaram a participar dos programas de reflorestamento como espécies definitivas (ANDRADE, 1961).

A FAO (1981), com base em dados obtidos entre 1973 e 1975, reportava a existência de uma superfície plantada a nível mundial na ordem de 4.000.000 ha, os quais produziam cerca de 60.000 metros cúbicos de madeira anualmente. Desta área, o Brasil destacava-se como o possuidor da maior área reflorestada com eucalipto no mundo, com mais de 1.000.000 ha. Esta área, segundo a FAO (1981), estava assim distribuída entre os estados brasileiros: São Paulo 532.000 ha; Minas Gerais 325.000 ha, Espírito Santo 72.000 ha; Paraná 35.000 ha; Rio Grande do Sul 26.000 ha; Mato Grosso 23.000 ha, Goiás 15.000 ha, Santa Catarina 12.000 ha; Rio de Janeiro 7.000 ha e Bahia 5.000 ha.

A Índia, o segundo maior país em área plantada, possuía somente cerca da metade da área plantada pelo Brasil, com cerca de 550.000 ha (MATHUR, 1983, ELDRIDGE, 1986). A Espanha, África do Sul e Angola também possuíam grandes áreas plantadas com aproximadamente 400.000 ha cada e China com 300.000 ha (ELDRIDGE, 1986).

Entretanto, a lei dos incentivos fiscais de 1966 fez surgir no Brasil maciços reflorestamentos. O propósito desta lei tinha como objetivo aumentar a produção nacional de celulose e papel, e o carvão vegetal para abastecer as indústrias siderúrgicas e, ao mesmo tempo, criar empregos em regiões menos desenvolvidas do país.

Porém, com o término da lei dos incentivos fiscais em 1987, houve uma certa estabilização da área plantada. Dados recentes fornecidos pela STCP/INDUFOR (1998), indicam uma área de 2.900.000 ha distribuída entre os estados brasileiros conforme mostra a tabela 1.

TABELA 1 - ÁREA PLANTADA E ESTIMATIVA DE VOLUME DE EUCALIPTOS POR ESTADO NO BRASIL.

Estados	Área plantada (1000 ha)	Volume (1000m ³)
Amapá	12.500	21.620
Pará	45.700	12.990
Rio Grande do Sul	115.900	61.390
Santa Catarina	41.550	90.710
Paraná	67.000	173.210
São Paulo	574.150	138.310
Mato Grosso do Sul	80.000	24.140
Minas Gerais	1.523.750	335.820
Bahia	213.400	109.970
Espirito Santo	152.300	25.000
Outros	128.500	29.350
Total	2954.780	1.022.510

Fonte: STCP/INDUFOR (1998).

Segundo a STCP/INDUFOR (1998), desta área, aproximadamente 1.625.000 ha (55% do total) está plantada com *E. grandis*, 502.300 ha (17%) com *E. saligna*, 265.900 ha (9%) com *E. urophylla*, 325.000 ha (11%) híbridos, 60.000 ha (2%) com *E. viminalis* e cerca de 177.280 ha (6%) de outras espécies. Entre estas, encontram-se cerca de 30.000 ha de *Eucalyptus dunnii* distribuídos principalmente entre os estados de São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

A introdução desta espécie no Brasil é recente, datada de 1964 (GOLFARI, 1978), sendo que os primeiros plantios foram realizados em caráter experimental por algumas empresas ligadas ao setor de celulose e papel das regiões Sul e Sudeste do país. A importância está relacionada com a grande adaptabilidade à climas frios e geadas, pois já demonstrou suportar temperaturas de até 5 ° negativos durante as fortes geadas que ocorreram na região Sul em 1975 (GOLFARI & PINHEIRO, 1976; FAO, 1981).

Para se ter uma idéia do potencial de crescimento deste gênero eucaliptos no Brasil, a FAO (1981), tomando como base dados de 1972, registrava um incremento médio da ordem

de 18 m³/ha/ano, o que correspondia a um incremento de 4 a 5 vezes maior que a média mundial. Todavia, com a adoção de técnicas silviculturais mais intensivas tipo: preparo do solo, fertilidade mineral, proteção florestal etc., a produção saltou para 21 m³/ha/ano.

Segundo FERREIRA (1983), com a introdução de novos materiais e posteriormente da escolha criteriosa de procedências mais adequadas, chegou-se ao patamar de 40 m³/ha/ano.

Estudos recentes desenvolvidos por TOMASELLI (1998), indicam que o incremento médio anual desta espécie no Brasil é da ordem de 31m³/ha/ano, distribuído entre os estados brasileiros conforme mostra a tabela 2.

TABELA 2 - INCREMENTO MÉDIO ANUAL POR ESTADO.

Estados	Incremento médio anual (m ³ /ha/ano)
Amapá	35,0
Bahia	33,6
Minas Gerais	25,6
Pará	27,3
Paraná	32,9
Rio Grande do Sul	34,3
Santa Catarina	27,7
São Paulo	36,8
Espirito Santo	29,7
Média	31,4

Fonte : TOMASELLI (1998).

Entretanto, salienta o autor que o incremento médio anual de plantações deste gênero ligado à empresas de celulose e papel estão bem acima desta média. A exemplo, plantações deste setor presente no Espírito Santo e Bahia apresentam incremento médio anual da ordem de 40-50 m³/ha/ano. Enquanto que os melhores clones podem produzir de 70-80 m³/ha/ano, destaca o autor contudo, que estes valores não podem ser generalizados. Alguns clones experimentais de *Eucalyptus dunnii* chegaram a apresentar níveis de produtividade de até 109,6 m³/há/ano (MONTEIRO et al., 1984).

Embora a eucaliptocultura brasileira tenha demonstrado ser uma das mais produtivas, avançadas e competitivas do mundo, até o momento estas vantagens tem sido aproveitadas somente pela indústria de papel e celulose, painéis e pela indústria de siderurgia. Esta última por meio do carvão, onde a madeira de plantações de eucaliptos é freqüentemente utilizada em idade tenra, em geral com menos de 10 anos. A indústria de celulose e papel utiliza rotações de 7 anos com no máximo 3 rotações por sítio, sendo que a partir da segunda rotação ocorre uma redução considerável na produção.

Entretanto, algumas empresas já estão mudando o sistema de manejo do Eucalipto no Brasil. Um novo conceito é baseado na necessidade de produzir toras de maior diâmetro para suprir as serrarias e indústrias de laminados, o que implica em rotações maiores.

Semelhante ao que ocorreu em outros países, como a Espanha e Portugal, as plantações de eucalipto no Brasil tornaram-se a base de um setor industrial em franca expansão que é o setor de celulose. Pode-se afirmar, mesmo, que a indústria de celulose foi a principal responsável pela expansão da eucaliptocultura no mundo (PRYOR, 1976; FAO, 1981).

No Brasil, a utilização da madeira de eucalipto como matéria-prima para a produção de celulose e papel é um processo irreversível e inquestionável, e o setor ocupa, presentemente, uma posição de destaque no cenário mundial de celulose (BARRICHELO & BRITO, 1976).

Seguindo-se a produção de celulose e papel, destaca-se a utilização desta espécie na produção do carvão vegetal, destinado a indústria de aço e ferro e finalmente segue-se a sua utilização na produção de chapas de fibras e de partículas (BRITO & BARRICHELO, 1979; FAO, 1981;).

Praticamente toda a produção de chapas de fibra está baseada na utilização da madeira de plantações de eucalipto. Em 1980, essa produção era da ordem de 1.000.000 m³, equivalente a um corte anual de 22.000 ha de plantações de eucalipto (PAULA LIMA, 1990).

Segundo a STCP/INDUFOR (1998), tomando como base dados de 1996, a produção de chapas de fibras encontra-se estabilizada em torno de 666.000 m³.

Em termos mundiais, apenas uma porção ínfima das plantações de eucalipto é normalmente manejada, para a produção de madeira serrada a qual requer rotações mais longas, geralmente ao redor de 25 anos mas preferencialmente devendo chegar a mais de 50 anos (ELDRIDGE, 1986; FERREIRA 1979).

Com exceção a esta regra, alguns países da África aumentaram consideravelmente o valor agregado de suas produções, utilizando-as para fins diversificados. Em alguns países deste continente, cerca de até 60% de suas produções se destinam à serrarias. A utilização do *E. grandis* a exemplo, inclui entre outras, madeira estrutural (estruturas leves e pesadas); assoalhos (pesados, leves, parquet, etc...); escoras para minas; construção naval; fabricação de veículos; móveis; artigos de marcenaria e carpintaria em geral; escadas; artigos esportivos; utensílios agrícolas; placas compensadas, aglomerados e fibras; madeira para celulose; lenha e carvão vegetal; caixas de embalagens; dormentes; postes e pilares; brinquedos, artigos de ornamentação e torneados em geral.

Segundo MALAN (1995), na África do Sul, cerca de 15% do volume de *Eucalyptus grandis* é consumido para a produção de madeira serrada e postes.

No Brasil, a produção anual de madeira serrada de eucalipto deve situar-se em torno de 50.000 m³, ou seja, cerca de 0,25% da produção nacional de madeira serrada (PONCE, 1995).

Apesar do avanço das pesquisas florestais no decorrer do século, favorecido pelas características ecológicas do Brasil, muito pouco tem sido feito no que se refere a utilização dos eucaliptos nas indústrias de processamento mecânico da madeira. A madeira de eucaliptos apresenta características que limitam o seu uso na fabricação de diversos produtos, entre estes destacam-se as tensões de crescimento, elevada retratibilidade, colapso durante a secagem e as fibras reversas (FAO, 1981). Contudo, esses inconvenientes podem ser minimizados através da utilização de técnicas adequadas.

Atualmente, apesar dos problemas inerentes ao gênero, a madeira desta espécie pode ser perfeitamente utilizada como madeira serrada, desde que se leve em consideração as suas limitações, representando assim um grande potencial de matéria-prima para o setor industrial florestal, uma vez que os plantios estão localizados perto de grandes centros consumidores.

Pelas suas características físico-mecânicas, a madeira de eucalipto se apresenta como uma exequível possibilidade de substituição de espécies nativas consagradas em seus múltiplos usos, podendo contribuir significativamente para o suprimento da demanda interna e externa, vindo a reduzir assim a pressão sobre as plantações nativas.

2.2 PROPRIEDADES DA MADEIRA

2.2.1. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A madeira é composta principalmente de celulose, hemiceluloses e lignina além de uma menor quantidade de extrativos e cinzas. Estes compostos são considerados os verdadeiros responsáveis pela morfologia e estrutura da madeira. A holocelulose (celulose e hemiceluloses) é formada durante o período de desenvolvimento da parede celular, enquanto que a lignina aparece após algum grau de formação da madeira. A tabela 3 apresenta a composição química de treze espécies de eucaliptos determinado de acordo com o métodos da *Pulp and Paper Industry Technical* (GONZAGA et al., 1983)

As árvores de clima temperado geralmente possuem altas proporções de celulose, hemiceluloses e lignina podendo somar de 97-99% da composição química total. Para madeira de espécies tropicais este valor pode decrescer para um valor médio de 90% (FENGEL & WEGENER, 1984; SEABRIGHT, 1995). Enquanto que a composição elementar da madeira é praticamente a mesma para todas as espécies e composta por: 50% de carbono, 44% de oxigênio, 6% de hidrogênio, 0,1% de nitrogênio e 0,3% de cinzas. Estes elementos após combinarem-se formam então a celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos (FOELKEL, 1977).

A celulose, segundo FENGEL & WEGENER (1984), é o principal componente da madeira sendo definida como um polímero linear de alta massa molecular constituído de β - D - anidrogucose. Na madeira, o número de unidades de glucose por molécula de celulose, ou seja, o grau de polimerização varia de 8.000-10.000 (TSOUMIS, 1991; EATON & HALE, 1993).

As microfibrilas de celulose estão localizadas principalmente na camada S₂ da parede celular e estão orientadas de forma aproximadamente paralela à direção das fibras, sendo esta a

TABELA 3 - ANÁLISES QUÍMICAS DAS MADEIRAS DE VÁRIAS ESPÉCIES DE EUCALIPTOS.

Espécies	SOLUBILIDADE DAS MADEIRAS EM:				TEOR DE:		
	H ₂ O fria	H ₂ O quente	Álcool	NaOH 1%	Lignina	Pentosanas	Holocelulose
	(%)	(%)	benzeno (%)	(%)	(%)	(%)	(%)
<i>E. saligna</i>	1,52	3,34	2,31	16,45	26,80	18,81	72,58
<i>E. urophylla</i>	2,70	3,00	2,18	16,73	26,81	18,37	74,10
<i>E. grandis</i>	2,42	3,00	2,04	15,57	23,38	18,39	74,72
<i>E. microcorys</i>	2,88	3,40	2,19	15,30	26,50	18,29	74,83
<i>E. camaldulensis</i>	1,64	3,65	2,40	13,92	29,21	18,14	70,95
<i>E. tereticornis</i>	2,72	3,90	2,73	14,02	28,14	19,06	72,39
<i>E. pilulares</i>	1,66	3,41	1,47	14,87	26,54	18,46	70,97
<i>E. cloeziana</i>	5,03	5,97	2,47	19,43	28,38	17,19	72,73
<i>E. propinqua</i>	3,59	4,82	2,28	15,77	28,03	17,24	72,27
<i>E. pellita</i>	0,75	1,66	1,29	11,88	27,63	15,27	72,78
<i>E. deanei</i>	2,57	2,96	2,74	16,41	27,22	19,03	71,76
<i>E. quadrangulata</i>	1,64	2,84	1,16	16,62	22,41	21,90	75,21
<i>E. andrewsii</i>	0,56	2,21	1,15	11,52	26,00	18,26	74,43

principal causa do comportamento anisotrópico da madeira, isto é, a madeira e fibras são resistentes no sentido da fibra e fracas na direção transversal (WALKER et al. (1993).

Segundo MARK (1967), a massa específica da celulose na região cristalina é calculada entre 1,59-1,63 g/cm³, enquanto que na região amorfa apresenta um valor de 1,48 g/cm³.

As hemiceluloses, terceiro maior componente da madeira, são polímeros de baixo peso molecular que estão associados com a celulose e a lignina nos tecidos da madeira.

Segundo FENGEL & WEGENER (1984), os principais constituintes das hemiceluloses são as hexoses (glucose, manose e galactose); e as pentoses (xiloses e arabioses) sendo que algumas hemiceluloses possuem adicionalmente ainda ácidos urônicos.

As hemiceluloses diferem da celulose principalmente por possuírem cadeias moleculares mais curtas, podendo existir grupos laterais e ramificados em alguns casos em sua configuração (FOELKEL, 1977).

As hemiceluloses além de atuar como uma matriz na parede celular da madeira, onde estão imersas as cadeias de celulose, tais polissacarídeos possuem características hidrófilas, sendo considerados os componentes mais higroscópicos presentes na parede celular. Portanto, se considerar-mos que as folhosas possuem maior teor de hemiceluloses que as coníferas conforme proposto por STAMM (1964), esta pode ser a razão, para em condições ambientais semelhantes, as folhosas possuírem maior teor de umidade que as coníferas (MOREY, 1980).

As hemiceluloses das folhosas são ricas em xilanas, cujo teor, dependendo da espécie considerada, varia de 15-30% de sua massa seca. O esqueleto é formado por unidades β -D-xilopiranoses com ligações 1,4 que possuem como ramificações radicais acetilas e ácido 4-O-metil- α -D-glicurônico, estes últimos na proporção de 1:10. Segundo LEPAGE (1986), as ligações entre as unidades xilosídicas são facilmente hidrolisadas por ácido, enquanto que as ligações dessas unidades com grupos do ácido urônico são muito resistentes.

A lignina é a terceira substância macromolecular da madeira. Segundo FENGEL & WEGENER (1984), as moléculas de lignina são completamente diferentes dos polissacarídeos, pois são formados por um sistema aromático composto de unidades de fenil-propano. Segundo estes autores, do ponto de vista morfológico, a lignina é uma substância amorfa localizada na lamela média, bem como na parede secundária. Durante o desenvolvimento das células, a lignina é incorporada na parede celular, interpenetrando as fibrilas e assim fortalecendo e enrijecendo as paredes celulares.

Pelo fato da lignina estar presente tanto nas paredes celulares quanto na região intercelular ou lamela média, esta confere à madeira uma boa dureza, tornando-a um material rígido, capaz de resistir à tensões mecânicas consideráveis.

A massa específica da lignina varia de 1,25-1,62 g/cm³, sendo aceita como verdadeiro um valor médio de 1,40 g/cm³ (MARK, 1967).

Segundo WALKER et al. (1993), quanto a função de cada um destes elementos na madeira, a celulose proporciona uma maior resistência à tração enquanto que a lignina proporciona uma boa resistência à compressão. Quanto as hemiceluloses, estes componentes parecem que quando muito, forma uma conexão entre celulose e lignina, permitindo efetiva transferência de resistência ao cisalhamento.

2.2.2. PROPRIEDADES FÍSICAS

2.2.2.1. Massa Específica

A massa específica aparente da madeira caracteriza-se por apresentar grande variabilidade entre espécies, dentro de uma mesma espécie e dentro de uma mesma árvore além de variação com a idade.

FERREIRA & KAGEYAMA (1978), estudaram a massa específica básica da madeira de *Eucalyptus*, com idade entre 60 a 84 meses. Neste estudo, os autores classificaram as espécies em grupos, onde o *E. grandis*, *E. saligna*, *E. dunnii*, e *E. botryoides* situaram-se com massa específica abaixo de 0,500 g/cm³, o *E. pilulares*, *E. resinifera*, *E. urophylla* e *E. propinqua* em torno de 0,500 g/cm³, enquanto que o *E. microcorys* e *E. cloeziana* apresentaram valores maiores que 0,500 g/cm³.

STURION et al. (1987), em estudo semelhante, verificaram que o *E. citriodora*, *E. cloeziana*, *E. camaldulensis* e *E. maculata* produziram madeira mais densa, enquanto que o *E. grandis*, *E. saligna* e *E. urophylla* apresentaram as menores massas específicas básicas.

SPURR & HSING (1954), verificaram que a massa específica geralmente decresce com a altura das árvores em coníferas. Já nas folhosas, esta variação irá depender da estrutura da espécie em questão (BROWN et al., 1952).

Para as folhosas do gênero *Quercus*, *Fraxinus* e *Fagus*, a massa específica decresce com a altura (BURGUER, 1940; BIELCZYK, 1956 e GOHRE & GOTZE (1956) citados por MUÑIZ (1993).

Para as folhosas do gênero *Eucalyptus*, é observado um efeito muito variado da massa específica entre as espécies. DADSWELL (1957) em estudo com *E. sideroxylon* e SUSMEL (1953, 1954) com *E. camaldulensis*, VITAL et al., (1981), citados por SOUZA et al. (1986), com *E. grandis* e ROZAS (1993) trabalhando com *E. grandis* concluíram que a massa específica decresce com a altura da árvore.

CURRO (1957a, 1957b) em *E. camaldulensis* Dehen, FERREIRINHA (1961) com base nos trabalhos de CURRO (1958) e de CARVALHO (1960) em *E. globulus* e FERREIRA (1968, 1969) com *E. alba*, *E. grandis* e *E. saligna* citados por MUÑIZ (1993), BRASIL et al. (1977), BRITO et al. (1977) e BARRICHELO et al. (1983) evidenciaram que a massa específica aumenta linearmente com a altura das árvores.

Por outro lado, BRASIL (1972) estudando *E. propinqua*, concluiu que a massa específica aumenta até um ponto máximo próximo ao meio da altura da árvore, quando começa a decrescer em direção à copa.

TAYLOR (1973), citado por FERREIRA & KAGEYAMA (1978), estudando *E. grandis* observou a massa específica decrescer até 4,5 m de altura a partir da onde torna a crescer novamente, enquanto SOUZA et al. (1986), observou que a massa específica decresce até cerca de 7m de altura a partir de onde volta a crescer novamente até a copa das árvores de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*.

Estudos conduzidos por PEREIRA et al. (1986), mostram que a massa específica da madeira de *Eucalyptus dunnii* apresenta comportamento semelhante. Neste caso, a massa específica da procedência Dorrigo mostrou decrescer da base até a posição relativa de 25% da altura comercial e posteriormente cresceu até o topo. Já a procedência Urbenville mostrou decrescer da base até a posição relativa de 50% da altura comercial, atingiu o máximo a 75% e voltou a decrescer.

FERREIRA & KAGEYAMA (1978), observaram ainda um aumento na massa específica com a idade da árvore de *E. urophylla*, *E. grandis*, *E. saligna* e *E. propinqua*, entre as idades de 5 à 11 anos. Porém segundo BARRICHELO & BRITO (1979), a massa específica básica aumenta somente até uma certa idade quando praticamente se estabiliza.

2.2.2.2. Retratibilidade

A contração é definida como a redução das dimensões de uma peça de madeira, causada pela redução do teor de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF). Esta contração, que corresponde a uma propriedade inerente à madeira como material celulósico, se deve a diminuição do tamanho das paredes celulares (KOLLMAN & CÔTÉ, 1968).

A madeira por ser um material anisotrópico, é mais importante ter o conhecimento das variáveis lineares das dimensões na direção transversal e longitudinal do que a variação volumétrica total da madeira.

Esta variação é sempre maior no sentido tangencial que radial da madeira, enquanto que o sentido longitudinal é, em muitos casos, inexpressível. Segundo TOMASELLI (1977), as causas da anisotropia são muito discutidas, existindo várias teorias que tentam explicar este comportamento, entre estas pode ser citado:

- a) O impedimento da contração e inchamento pelos raios que são o único tecido horizontalmente orientado.
- b) Presença de pontuações em maior quantidade na face tangencial da célula, causando uma desorientação acentuada nas microfibrilas localizadas nos arredores, impedindo a contração e inchamento radial.
- c) Maior espessura da lamela média e parede primária na face radial, aumentando a contração e inchamento neste sentido, devido a presença de substâncias altamente higroscópicas.
- d) Presença do lenho outonal, mais denso, transferido com maior facilidade e o movimento tangencial enquanto que o movimento radial é absorvido pelo lenho primaveril (mais poroso).

Para TOMAZELLO (1994), deve-se somar ainda a estes fatores a maior espessura das paredes celulares e menor ângulo de inclinação das microfibrilas das paredes celulares no sentido tangencial da madeira. Segundo este autor, os valores da contração tangencial, radial,

longitudinal e volumétrica variam de 4-20%, 2-9%, 0,1-0,3% e 8-26% respectivamente na madeira de eucaliptos conforme mostra a tabela 4.

Portanto, como pode ser observado nesta tabela, a madeira de eucaliptos possui valores de retratibilidade bem acima dos obtidos para maioria das espécies, as quais normalmente variam de 4,4-7,8% no sentido tangencial e 2,2-5,6% sentido radial (WINANDY, 1984).

TABELA 4-VALORES MÉDIOS DE RETRATIBILIDADE (%) E FATOR ANISOTRÓPICO PARA A MADEIRA DE SETE ESPÉCIES DE *EUCALYPTUS*.

Espécie	N	RETRATIBILIDADE (%)				Fator Anisotrópico
		Radial	Tangencial	Axial	Volumétrica	
<i>E.paniculata</i>	80	9,4	15,5	0,3	27,2	1,7
<i>E.urophylla</i>	80	7,9	15,3	0,3	25,6	2,0
<i>E.tereticornis</i>	80	7,3	13,2	0,3	22,3	1,8
<i>E.pilulares</i>	80	6,4	12,9	0,4	21,5	2,2
<i>E.citriodora</i>	80	7,1	10,0	0,2	18,3	1,4
<i>E.cloeziانا</i>	80	5,7	9,3	0,4	16,5	1,7
<i>E.grandis</i>	80	5,0	10,1	0,4	15,9	2,1

N – número de repetições
Fonte: OLIVEIRA (1997)

2.2.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS

A conveniência da avaliação das propriedades mecânicas da madeira está condicionada a sua eficiente utilização final, a interesses científicos e a aspectos econômicos, tanto no que se refere à economicidade da utilização final quanto à economicidade pertinente aos estudos preliminares e complementares. Assim, a seleção de quais ensaios avaliativos devem ser realizados, difere ligeiramente de uma para outra instituição de pesquisa, estando normalmente incluídos entre os abaixo relacionados (LISBÔA et al., 1993):

- flexão estática;
- compressão paralela as fibras;
- compressão perpendicular as fibras;
- cisalhamento paralelo às fibras;
- dureza paralela as fibras;
- dureza perpendicular as fibras;
- tração perpendicular às fibras;
- tração paralela às fibras;

Os sete primeiros destes ensaios são normalmente incluídos em todos os programas de pesquisas, entretanto, somente os quatro primeiros são considerados de primeira importância na obtenção de informações sobre os possíveis usos finais da madeira (BENDTSEN et al., 1970; BODIG & JAYNE, 1982; U.S. FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1955, 1987).

2.2.3.1 Propriedades Elásticas

Elasticidade significa que a deformação produzida em um corpo sólido, devido a aplicação de uma carga relativamente baixa, é completamente retornada após o relaxamento desta carga. Além do limite de elasticidade, as deformações plásticas sofridas pelo material são irreversíveis (KOLLMANN & CÔTÉ, 1968; PARKER, 1979).

Através de um processo de carga e descarga, pode-se determinar no diagrama tensão-deformação, a região a partir da qual ocorrem deformações permanentes (figura 1). A tensão máxima obtida sem ocorrência de deformação permanente é denominada tensão limite de elasticidade ou limite proporcional.

Na maior parte dos materiais estruturais há uma região inicial no diagrama tensão-deformação no qual o material se comporta tanto elástica como linearmente (KOLLMANN & CÔTÉ 1968). Esta região, onde as deformações são proporcionais às tensões, é expressa pela lei de Hooke através da equação (1):

$$\varepsilon = \alpha \sigma^n \quad (1)$$

onde:

ε = deformação relativa, sendo $\varepsilon = l - l_0 / l_0$

σ = tensão, kg/cm²;

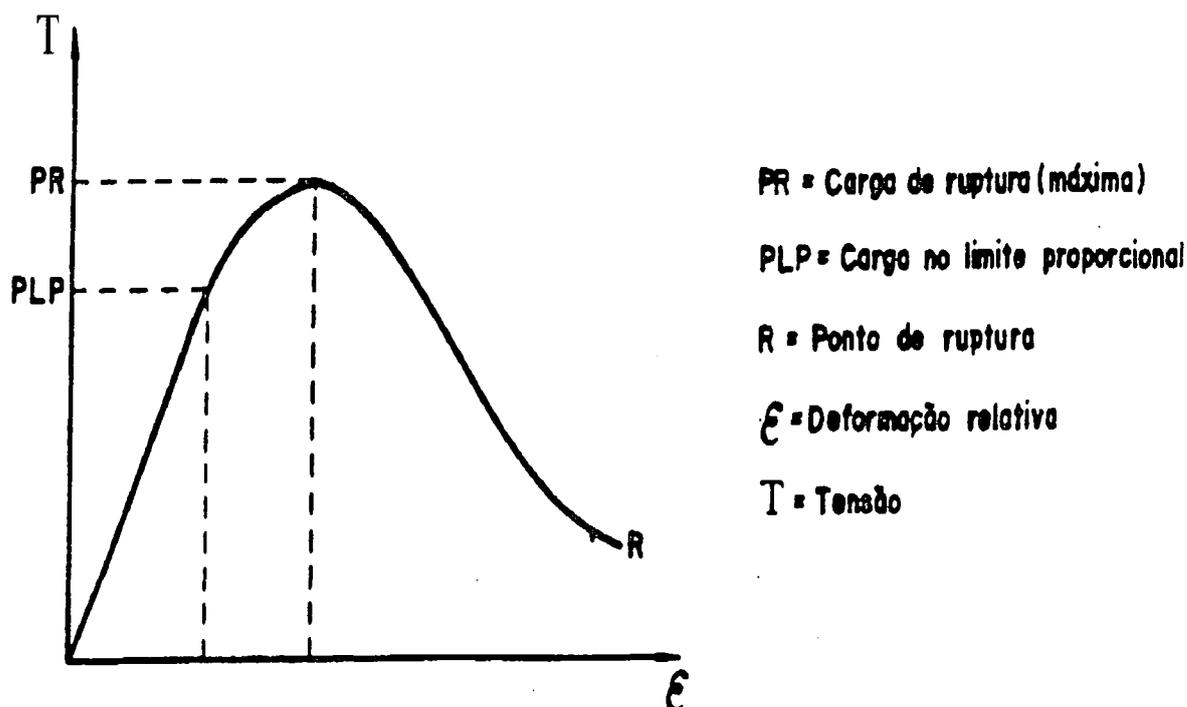
α = constante de proporcionalidade ou coeficiente de deformação;

l = comprimento deformado ou final;

l_0 = comprimento não tensionado ou inicial;

n = Constante específica para cada material, sendo que no caso da madeira é considerado valor igual a 1.

FIGURA 1 - DIAGRAMA TENSÃO DEFORMAÇÃO DA MADEIRA EM FLEXÃO ESTÁTICA. MODELO TEÓRICO.



Fonte: WANGAARD (1950).

Em condições limites, as tensões e deformações extremamente pequenas são aplicáveis a quase todos os materiais. Mas, crescidos os valores das deformações, muitos materiais deixam de seguir a lei de Hooke. As diferenças devem ou não ser consideradas em função da aplicação prática desejada. Em casos comuns, os materiais para usos em estruturas, por hipótese, seguem a lei de Hooke (ROCCO LAHS, 1983). Para aplicação desta lei à madeira ou compostos a base de madeira, as deformações devem ser pequenas, o material homogêneo e de massa específica constante e uniforme, e não ocorra interferência entre os componentes de tensões (LARA PALMA, 1994). A homogeneidade refere-se à independência das propriedades físicas do meio, com respeito a posição ou ponto considerado. Assim, por exemplo, a variação das propriedades físicas entre o lenho inicial e o lenho tardio é ignorada. A continuidade implica ignorar a presença do lume celular e espaços intercelulares na estrutura da madeira (JAYNE, 1966).

Segundo a teoria da elasticidade, em elementos sujeitos a flexão estática, pode-se afirmar que a seção transversal normal ao eixo central longitudinal da viga, permanecerá plano após a aplicação da carga, ou seja, as tensões de tração e compressão localizadas nos extremos opostos desta seção possuem valores idênticos para qualquer momento fletor dado, e ainda, para qualquer momento fletor dado, as fibras localizadas a um certo nível da seção permanecem sem sofrer esforços, e por definição, este ponto é denominado linha neutra da seção (HOWARD, 1949 citado por IWAKIRI, 1982).

Para KOLLMANN & CÔTÉ (1968), normalmente é usado o valor recíproco $1/\alpha = E$, onde E é chamado módulo de elasticidade ou MOE ou módulo de Young, e expressa o esforço hipotético pelo qual um corpo de 1cm^2 de área transversal pode ser estendido ao dobro do seu comprimento original. Neste caso a lei de Hooke poderia ser escrita conforme a equação (2):

$$\varepsilon = E \sigma \quad (2)$$

Na realidade, o valor real do módulo de elasticidade (MOE) é impossível de ser atingido, pois antes disso ocorre a ruptura do material. Em ensaios de flexão estática, a determinação do módulo de elasticidade pode ser feita na parte reta da linha descrita pelas

avaliações tensões-deformações, onde o primeiro ponto de inflexão daria a tensão e deformação no limite proporcional ou limite elástico (KOLLMANN & CÔTÉ, 1968).

Para LAVERS (1969), o módulo de elasticidade determinado em ensaios de flexão estática (com apoio simples), são um pouco menores que os obtidos em tração, isso porque parte da flexão deriva da deformação por cisalhamento. Enquanto que para KOLLMANN & CÔTÉ (1968), os valores do módulo de elasticidade obtidos em ensaios compressão e tração são relativamente próximos.

O módulo de elasticidade pode ser determinado também em ensaios de flexão dinâmica, porém neste caso, os valores obtidos são um pouco maiores (cerca de 10 - 15%) que os obtidos em flexão estática, razão pela qual normalmente emprega-se o valor obtido em flexão estática (BODIG & JAYNE, 1982).

Do ponto de vista da elasticidade, a madeira encontra-se em posição intermediária em relação a outros materiais. Os valores do módulo de elasticidade variam de uma forma geral entre 25.500 kg/cm² à 173.500 Kg/cm². Estes valores mostram que a madeira possui um módulo de elasticidade mais baixo que outros materiais, entretanto, se o peso (massa específica) for considerada, a madeira é comparável ao ferro.

Já o módulo de elasticidade na direção transversal (radial e tangencial) da madeira variam de 3.060 kg/cm² à 6.118 kg/cm², sendo que não existe diferença importante entre a direção radial e tangencial (TSOUMIS, 1991).

2.2.3.2 Propriedades de Resistência

DAVIS & THOMPSON. (1964) definem resistência, num sentido amplo, como sendo a capacidade de uma peça de se opor a ruptura ou deformação excessiva. Enquanto que a resistência máxima de um material é definida como o esforço máximo que ocorre no momento da ruptura (PARKER, 1979).

Alguns materiais possuem reservas consideráveis de resistência entre o limite elástico e a resistência máxima, no entanto essa faixa de resistência chamada “inelástica” não é considerada na aplicação da teoria de resistência para vigas estruturais de madeira, por ser essa faixa muito variável com relação a outros materiais de construção como estruturas de aço.

Testes em corpos de prova de mesma espécie e dimensões, e nas mesmas condições, podem resultar numa considerável variação em valores de resistência. Esta variabilidade nos resultados dos testes é levada em consideração quando o esforço admissível para diferentes espécies e classes de madeira para fins estruturais são estabelecidas (PARKER, 1979).

A resistência de uma viga de madeira à ruptura é expressa em termos de esforços por unidade de área, através do módulo de ruptura ou MOR, o qual expressa o esforço máximo na fibra verificado nos extremos superior e inferior da seção transversal da viga. Os valores dos módulos de ruptura são utilizados para a obtenção das tensões admissíveis para diversas formas de utilização da madeira (WANGAARD, 1950).

WILSON (1932) salienta que as propriedades mecânicas da madeira devem ser especificadas, uma vez que os valores característicos são diferentes entre si, e entre as diversas espécies, não se podendo afirmar simplesmente que certa espécie é mais resistente que outra sem detalhar o tipo de resistência em questão. Este comportamento das propriedades mecânicas pode ser observado na tabela 5, onde são mostrados os valores médios das principais propriedades mecânicas da madeira (12% de umidade), para várias espécies de eucaliptos provenientes de reflorestamento e espécies nativas (CALIL JÚNIOR et al., 1996).

NOACK (1976), comenta ainda que a regularidade destas propriedades são consideradas para análise e estimação de seu valor de concorrência no mercado

TABELA 5 - VALORES MÉDIOS DE MADEIRAS DICOTILEDÔNEAS NATIVAS E DE FLORESTAMENTO.

Nome comum (dicotiledôneas)	Nome Científico	$\rho_{ap}(12\%)$ (Kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	f_0 (MPa)	f_{90} (MPa)	f_v (MPa)	E_{c0} (MPa)	n
Angelim Araroba	Vataireopsis araroba	668	50.5	69.2	3.1	7.1	12876	15
Angelim Ferro	Hymenolobium spp	1170	79.5	117.8	3.7	11.8	20827	20
Angelim Pedra	Hymenolobium petraeum	694	59.8	75.5	3.5	8.8	12912	39
Angelim Pedra Verdadeiro	Dinizia xcelsa	1170	76.7	104.9	4.8	11.3	16694	12
Branquilha	Termilalia spp	803	48.1	87.9	3.2	9.8	13481	10
Cafearana	Andira spp	677	59.1	79.7	3.0	5.9	14098	11
Canafistula	Cassia ferruginea	871	52.0	84.9	6.2	11.1	14613	12
Casca Grossa	Vochysia spp	801	56.0	120.2	4.1	8.2	16224	31
Castelo	Gossypiospermum praecox	759	54.8	99.5	7.5	12.8	11105	12
Cedro Amargo	Cedrella odorta	504	39.0	58.1	3.0	6.1	9839	21
Cedro Doce	Cedrella spp	500	31.5	71.4	3.0	5.6	8058	10
Champagne	Dipterys odorata	1090	93.2	133.5	2.9	10.7	23002	12
Cupiúba	Goupia glabra	838	54.4	62.1	3.3	10.4	13627	33
Catiúba	Qualea paraensis	1221	83.8	86.2	3.3	11.1	19426	13
E. Alba	Eucalyptus alba	705	47.3	69.4	4.6	9.5	13409	24
E. Camaldulensis	Eucalyptus camaldulensis	899	48.0	78.1	4.6	9.0	13286	18
E. Citriodora	Eucalyptus citriodora	999	62.0	123.6	3.9	10.7	18421	68
E. Cloeziana	Eucalyptus cloeziana	822	51.8	90.8	4.0	10.5	13963	21
E. Dunnii	Eucalyptus dunnii	690	48.9	139.2	6.9	9.8	18029	15
E. Grandis	Eucalyptus grandis	640	40.3	70.2	2.6	7.0	12813	103
E. Maculata	Eucalyptus maculata	931	63.5	115.6	4.1	10.6	18099	53
E. Maidene	Eucalyptus maidene	924	48.3	83.7	4.8	10.3	14431	10
E. Microcorys	Eucalyptus microcorys	929	54.9	118.6	4.5	10.3	16782	31
E. Paniculata	Eucalyptus paniculata	1087	72.7	147.4	4.7	12.4	19881	29
E. Propinqua	Eucalyptus prpinqua	952	51.6	89.1	4.7	9.7	15561	63
E. Punctata	Eucalyptus punctata	948	78.5	125.6	6.0	12.9	19360	70

FONTE: CALIL JUNIOR et al. (1996)

$\rho_{ap}(12\%)$ - massa específica aparente a 12% de umidade; f_{c0} - resistência à compressão paralela às fibras; f_0 - resistência à tração paralela às fibras; f_{90} - resistência à tração normal às fibras; f_v - resistência ao cisalhamento; E_{c0} - módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras; n - número de corpos de provas ensaiados.

2.2.3.3 Efeito da Temperatura nas Propriedades Mecânicas da Madeira.

Em geral, as propriedades mecânicas da madeira reduzem quando aquecidas e aumentam quando resfriadas (COMBEN, 1955; 1964; BODIG & JAYNE, 1982; U.S. FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1987), sendo que para um mesmo teor de umidade e abaixo de 150°C, as propriedades mecânicas são aproximadamente lineares em relação a temperatura, conforme mostram as figuras 2 e 3 para o módulo de elasticidade em compressão paralela às fibras e módulo de ruptura em flexão estática.

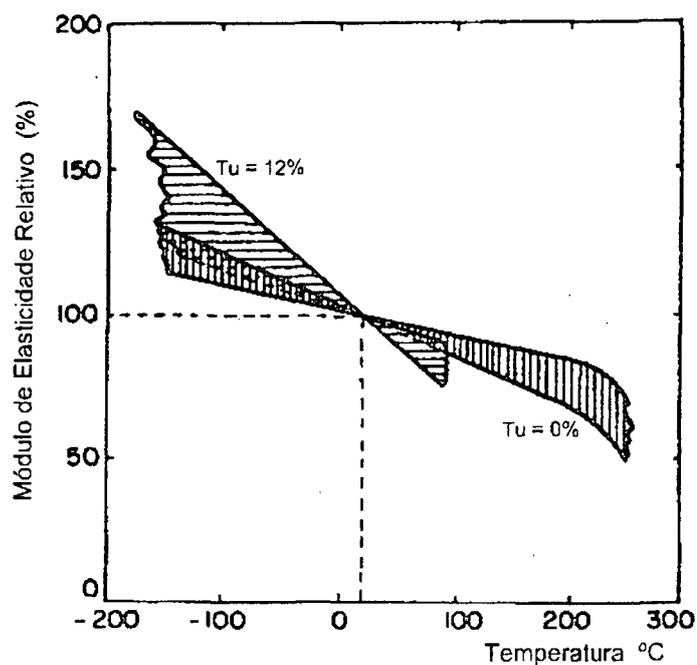
Para BODIG & JAYNE (1982), um aumento da temperatura da madeira é refletida de duas formas:

- a) mudanças transitórias no nível interno de energia,
- b) reorganização estrutural permanente.

A primeira alteração resulta em mudanças transitórias nas propriedades mecânicas, enquanto a segunda causa efeito permanente. Segundo os autores, devido a variabilidade nas propriedades dos compostos, é difícil distinguir entre os dois efeitos até que a temperatura esteja bem acima das condições normais de uso.

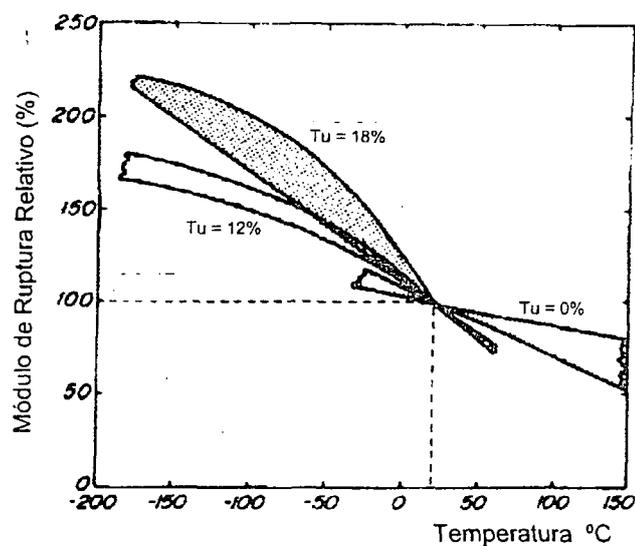
Segundo o U.S. FOREST PRODUCTS LABORATORY (1987), em temperaturas abaixo de 100°C, o efeito imediato é essencialmente reversível, isto é, a propriedade irá retornar ao valor na temperatura original se a mudança de temperatura for rápida. O efeito imediato da temperatura no módulo de elasticidade em compressão paralela às fibras e módulo de ruptura em flexão estática relativo à temperatura de 20°C para diferentes teores de umidade, podem ser observados nas figura 2 e 3 respectivamente.

FIGURA 2 - EFEITO IMEDIATO DA TEMPERATURA SOBRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA OS TEORES DE UMIDADE DE 0% E 12%, RELATIVO À TEMPERATURA DE 20°C.



Fonte: U.S. FOREST PRODUCTS LABORATORY (1987).

FIGURA 3 - EFEITO IMEDIATO DA TEMPERATURA SOBRE O MÓDULO DE RUPTURA PARA OS TEORES DE UMIDADE DE 0%, 12% E 18%, RELATIVO À TEMPERATURA DE 20°C.



Fonte: U.S. FOREST PRODUCTS LABORATORY (1987).

Em adição ao efeito reversível, ocorre um efeito irreversível em temperaturas elevadas que é devido a degradação da substância madeira, a qual resulta em perda de peso e resistência (STAMM, 1956,1964; SALAMON, 1969; KASS et al., 1970; SKAAR, 1976; ILLSTON et al., 1979; BODIG & JAYNE, 1982; FENGEL & WEGENER, 1984; U.S FOREST PRODUCTS LABORATORY 1987; SUCHSLAND & WOODSON, 1991).

Entre os componentes da madeira, as hemiceluloses tem mostrado ser o componente termicamente menos estável, por isso pode ser facilmente degradada.

KASS et al. (1970) estudaram o comportamento das hemiceluloses, especialmente as pentosanas. Neste estudo, os autores perceberam que o primeiro estágio da degradação é atribuído principalmente à degradação das hemiceluloses a qual resulta em direta perda de resistência.

Para FENGEL & WEGENER (1984), a fragilidade das hemiceluloses deve-se à ausência de cristalinidade, baixa massa molecular e sua configuração irregular e ramificada, o que facilita a absorção de água e conseqüente degradação.

A celulose também mostrou redução significativa do grau de polimerização nos primeiros estágios da degradação, mas em menor grau que as hemiceluloses. THOMPSON (1969) salienta entretanto que em alguns casos, como na madeira de *Oak*, a celulose pode ser tão facilmente degradada quanto as hemiceluloses, enquanto que em outros, como o *Pinus*, a celulose demonstrou ser mais estável.

A lignina entretanto demonstrou ser mais estável que as hemiceluloses e a celulose, sendo que suas cadeias somente são quebradas em temperatura variando de 150°C - 300°C (FENGEL & WEGENER, 1984).

Segundo MILLETT & GERHARDS (1972) e ADANS et al. (1979), já o primeiro estágio da degradação da madeira causa perda na resistência. A resistência ao impacto e trabalho na carga máxima parecem ser mais sensíveis à degradação, e a seguir, o módulo de ruptura, enquanto que módulo de elasticidade não demonstrou nenhuma perda de resistência.

De acordo com MACLEAN (1953,1955), a perda de resistência por degradação é maior em madeira de folhosas que em madeira de coníferas. Esta degradação parece estar diretamente relacionada a maior quantidade de hemiceluloses e menor quantidade de lignina presente nas folhosas (STAMM, 1956).

A taxa de degradação e perda de resistência da madeira parece não depender somente da espécie, mas também do tempo de exposição, temperatura e meio de aquecimento.

MILLET & GERHARDS (1972), concluíram que existe uma relação linear entre o tempo e a recíproca temperatura de tratamento para determinada perda de resistência. A exemplo, MACLEAN (1955) mostrou que à uma temperatura de 175°C, a madeira requer cerca de 10 horas para perder 10% de resistência à flexão, enquanto que a 115°C a madeira requer cerca de 35 dias para perder os mesmos 10% de resistência.

Parece existir também uma relação entre a perda de peso e a perda de resistência quando a madeira é exposta à alta temperatura. Contudo, esta relação requer cuidadosa consideração, uma vez que esta relação pode não ser aplicável no primeiro estágio da degradação da madeira. A razão é que a madeira não necessariamente degrada somente por reação de desidratação, a qual resulta em perda de peso, mas também à reação de hidrólise. Neste caso, a degradação não causa perda de peso desde que as moléculas de açúcar não sejam lixiviadas da madeira.

De acordo com SKAAR (1976), em alta umidade relativa, a madeira degrada predominantemente por hidrólise ácida e a taxa de degradação neste caso é maior que a degradação térmica ou pirolítica. Na hidrólise ácida, a água faz com seja quebrado os grupos acetilas e com isso ocorra a formação de ácido acético responsável pela degradação da madeira (SUCHSLAND & WOODSON, 1991).

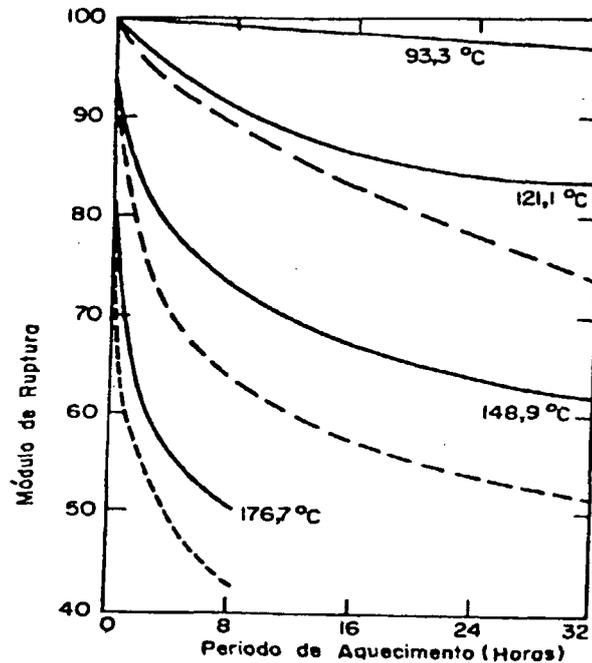
Segundo FENGEL & WEGENER (1984), a hidrólise ácida é bastante dependente do pH e, se a concentração de ácido for alta, sua velocidade torna-se apreciável, mesmo em temperaturas inferiores a 100°C.

Para WANGAARD (1950) e STAMM (1964), a degradação da madeira apresenta comportamento diferenciado conforme o meio de aquecimento utilizado. Na presença de vapor, a madeira pode ser mais rapidamente degradada que na presença de água líquida, que por sua vez é maior que a degradação em função apenas da temperatura. O U.S. FOREST PRODUCTS LABORATORY (1987), mostra através da figura 4 o comportamento do módulo de ruptura em madeira submetida à aquecimento em água (linha cheia) e vapor saturado (linha tracejada) a diversas temperaturas.

Estudos conduzidos por MACLEAN (1953, 1954, 1955), mostram que a resistência à flexão estática da madeira não foi afetada quando exposta a uma temperatura de 149°C durante

um período de 10 horas de exposição. Porém na mesma temperatura e período de tempo a madeira perdeu cerca 30% de sua resistência à flexão estática na presença de água e cerca de 40% na presença de vapor.

FIGURA 4 - MÓDULO DE RUPTURA EM MADEIRA SUBMETIDA AQUECIDA EM ÁGUA (LINHA CHEIA) E EM VAPOR SATURADO (LINHA TRACEJADA).



Fonte: U.S. FOREST PRODUCTS LABORATORY (1987).

Segundo THOMPSON (1969), as hemiceluloses e celulose são despolimerizadas via hidrólise na presença da água, sendo esta a principal causa da perda de resistência. Contudo, muita água pode retardar a reação de hidrólise pois os componentes da madeira requerem somente uma certa quantia de água para serem hidrolizadas. Excesso de água causa diluição da concentração de ácido e reduz a disponibilidade de oxigênio no ar o que resulta em retardamento da reação.

Segundo ILLSTON et al. (1979), independentemente ainda do meio de aquecimento, a aplicação do calor à madeira é mais acentuada em peças de pequenas dimensões do que em grandes peças enquanto que aplicações repetidas de temperatura proporcionam um efeito aditivo.

Embora os estudos a respeito do efeito da vaporização nas propriedades mecânicas da madeira sejam escassos até o momento, existe na literatura muitos estudos a respeito do efeito da temperatura de secagem nestas propriedades da madeira (MACLEAN, 1954; ELLWOOD, 1954; CALVERT, 1965; CECH, 1973; HANN, 1965; HARTLEY, 1975; SALAMON, 1969; TOMASELLI, 1977, 1981; ROSEN & LAURIE, 1983; GERHARDS, 1982; HILLIS, 1975; KOLLMAN & CÔTÉ, 1968; STAMM, 1964; JARMUTOWSKA & MATEJAK, 1978; BODIG & JAYNE 1982; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1955,1987). Porém os resultados obtidos até o momento mostram-se contraditórios em alguns aspectos, principalmente no que diz respeito aos benefícios ou prejuízos causados pela temperatura, podendo serem divididos em dois grupos distintos.

a) Ganho ou Permanência das Propriedades Mecânicas.

KEYWERTH (1952) observou que a madeira de *Europen beech* seca a uma temperatura de 115°C, apresentou um aumento no módulo de ruptura, módulo de elasticidade e resistência máxima em compressão quando comparada a madeira controle seca a 60°C e 79°C.

LADELL (1953), citado por TOMASELLI (1977), reporta que a madeira de *western hemlock* submetida a ensaios de flexão estática, não demonstrou ser afetada pela alta temperatura. Porém nenhum detalhe sobre este trabalho foi publicado. Entretanto LADELL (1956) obteve aumento em flexão estática para madeira de *Yellow Birch* quando comparou madeira seca em estufa convencional com madeira seca a 105°C. O autor reporta ainda que não obteve reduções significativas na resistência ao impacto para madeira desta espécie seca a temperatura entre 102°C e 105°C.

SULZBERGER (1953) empregou temperaturas variando de 21°C - 82°C para secar madeira de *Sitka spruce*, *Balsa*, *Kurrajong*, *Hoop pine*, *Hollywood Coachwood*, *Silver Quandong* e *Mountain ash*. Neste estudo o autor observou que a resistência ao impacto aumentou com o aumento a temperatura. Porém salienta o autor que as condições de ensaio não são usuais pois a madeira foi testada logo após o tratamento.

COMBEN (1955) reporta que ao ensaiar madeira de *Obeche*, *Abura* e *Scots pine*, secas em vapor super aquecido a 115°C, não observou qualquer mudança significativa no módulo de ruptura, módulo de elasticidade, trabalho na carga máxima e resistência ao impacto.

Entretanto, o autor apresentou dados de testes de resistência na madeira de *African mahogany* secos por PRATT (1955). Neste estudo, de um total de três cargas de madeira seca à temperatura constante e acima do ponto de ebulição da água, foi observado um leve aumento nos valores de elasticidade sendo que em uma das cargas foi observado que o módulo de ruptura também aumentou.

PETRI & ANANYIN (1966), citado por SALAMON (1969), observaram que a madeira de *Scots pine* seca em vapor superaquecido a temperatura constante de 121°C, mostrou valores de resistência similar aos obtidos em madeira seca ao ar. Já PETRI (1963), trabalhando com *Birch*, *Aspen* e *Linden* em condições semelhantes a PETRI & ANANYIN (1966), não observaram diferenças significativas para compressão paralela, flexão estática e resistência ao impacto em relação ao controle.

SCHNEIDER (1973), obteve aumento em flexão estática e resistência à compressão paralela em madeira de *Beechwood* quando submeteu esta espécie a temperaturas de secagem variando de 110 - 180°C. Por outro lado KOCH (1971; 1972a; 1973) citado por TOMASELLI (1977), demonstrou que a secagem à alta temperatura não reduz significativamente a resistência ao impacto, módulo de ruptura e módulo de elasticidade na madeira de *Southern pines*, apesar de mencionar que algumas reduções nos valores estarem presentes. O experimento foi conduzido com diferentes programas de secagem empregando dois níveis de velocidade do ar, três depressões no bulbo úmido e três níveis de espessura na madeira, sendo contudo mantida a temperatura do bulbo seco constante a 115°C.

MILLETT & GERHARDS (1972) submeteram seis espécies à secagem em estufa nas temperaturas de 115°C, 135°C, 155°C e 175°C. Os resultados deste estudo mostram que o módulo de elasticidade foi a única propriedade que não reduziu de forma significativas com a temperatura.

TOMASELLI (1977), em estudo conduzido em *Pimis radiata*, comparando as propriedades da madeira seca a 70°C com a madeira seca a 140°C e 180°C, mostrou que em geral as propriedades mecânicas da madeira não são afetadas pela temperatura de secagem dentro dos níveis estudados, desde que uma velocidade do ar apropriada seja utilizada, e que a

madeira não seja seca a teores de umidade extremamente baixos. Estas conclusões foram tiradas em função de resultados experimentais e análises de distribuição de temperatura interna da madeira.

b) Redução da Resistência da madeira.

KEYWERTH (1952) observou que madeira de Red beech - *Fagus spp* seco a temperatura de 115°C mostrou em alguns casos reduções na resistência ao impacto e tração perpendicular às fibras comparado ao controle seco a temperatura de 60°C - 79°C. De forma semelhante COMBEN (1955), observou que a madeira de *African mahogany* aquecido acima do ponto de ebulição da água apresentou uma redução apreciável na resistência máxima. SULZBERGER (1953) utilizou temperaturas variando de 21°C a 82°C para secar madeira de *Sitka Spruce, Balsa, Kurrajong, Hoop pine, Hollywood, Coachwood, Silver quandong e Mountain ash*. Neste estudo o autor observou reduções no módulo de elasticidade com o aumento da temperatura. Porém as condições dos ensaios não são usuais, pois a madeira foi testada logo após o tratamento.

GRAHAM (1957) reportou que a madeira de *Coastal - Type e Douglas -fir* aquecidas à 93,3°C reduziram sua resistência em cerca de 15% ou mais. Da mesma forma EDDY & GRAHAM (1955) observaram que madeira de *Douglas -fir*, seca à 107°C com vapor orgânico, reduziu em cerca de 18% seu módulo de ruptura. Neste experimento, o autor conclui que onde os tratamentos foram longos à temperaturas de 93°C ou mais, as propriedades de resistência mostraram valores acentuadamente menores.

PETRI (1963) observou que a madeira de *Birch, Aspen e Linden* submetida a secagem em vapor super aquecido a uma temperatura de 121°C reduz significativamente sua resistência ao cisalhamento quando comparado com a madeira controle seca ao ar. KOZLIK (1967) analisou o efeito da temperatura de secagem que variando desde 32°C até 110°C nas propriedades mecânicas da madeira de *Douglas-fir e Western hemlock*. Os resultados mostraram que o aumento da temperatura na secagem na madeira de *Douglas-fir* reduziu a resistência ao impacto radial e tangencial em 12% e 15% respectivamente, além de propiciar uma grande redução na resistência ao cisalhamento tangencial e módulo de ruptura.

De forma semelhante, para madeira de *Western hemlock* o emprego de temperatura de 102°C – 110°C proporcionaram uma redução na resistência ao impacto no sentido tangencial e radial. O autor observou ainda que o módulo de ruptura em madeira seca a 102°C foi cerca de 12% menor que em madeira seca nas temperaturas de 32°C, 66°C, 82°C, e 91°C.

Segundo WOOD et al. (1960), a norma AWWA (167, C3-67), permite que o tratamento de postes de *Sothern pine* por vaporização seja realizada a uma temperatura máxima de 118°C por 20 horas, uma vez que foi detectado uma redução de cerca de 40% na resistência destes quando utilizou-se temperaturas de aproximadamente 126°C durante um prolongado período. Testes recentes indicam que postes vaporizados a temperaturas de 115 - 118°C por 15 horas apresentam resistência similar a postes desta espécie não vaporizados.

HUFFMAN (1972) demonstrou que a secagem da madeira de *Aspen-populus spp* à alta temperatura resulta em reduções no módulo de ruptura quando comparado com a secagem convencional desta espécie. HUFFMAN (1977) obteve reduções no módulo de ruptura em madeira de *Eastern spruce*, *Jack pine* e *Balsan fir* quando comparou madeira seca a alta temperatura com secagem convencional. Entretanto, para o módulo de elasticidade o autor somente obteve reduções significativas com o emprego da alta temperatura para madeira de *Jach pine*.

MILLETT & GERHARDS (1972) submeteram seis espécies de madeira por vários dias à secagem em estufa nas temperaturas de 115°C, 135°C, 155°C e 175°C. Após esta exposição, a perda de peso variou de 2-15%, enquanto que o módulo de ruptura variou de 17-56%. Segundo os autores, a perda de resistência ao impacto é tão sensível a temperatura que a madeira perdeu de 20-30% da resistência mesmo quando exposta a 175°C por apenas uma hora.

2.3 SECAGEM DA MADEIRA

2.3.1 Aspectos Físicos da Secagem

A quantidade de água contida na madeira verde varia grandemente. Em algumas madeiras pode ocorrer pequena percentagem de umidade como 30%, em outras pode ocorrer 200% ou mais. Grandes variações podem ocorrer não somente entre espécies mas também dentro da mesma espécie e até mesmo em uma árvore. O alburno normalmente contém mais água que o cerne, em alguns casos a base da árvore possui mais água que o topo (RASMUSSEN, 1961; PRATT, 1986; SIMPSON, 1991).

Contrariamente a crença popular, o total de água contida na madeira verde não varia grandemente com a estação climática do ano a qual as árvores são cortadas. Algumas espécies de madeira contêm zonas com altos teores de umidade, comumente chamadas de “bolsas de água”, sendo que esta água move-se para fora da madeira durante a secagem de forma lenta. (RASMUSSEN, 1961; CECH & PFAFF, 1977; SIMPSON, 1991).

Segundo KOLLMANN & CÔTÉ (1968); CECH & PFAFF (1977); PRATT (1986) e SIMPSON (1991), a água que ocorre na madeira pode ser classificada da seguinte forma:

- Água livre ou capilar: refere-se a água presente nos lumens celulares, espaços intercelulares e aberturas de pontuações, aderidas à madeira por forças capilares.
- Água higroscópica ou impregnação: refere-se a água que encontra-se impregnando os espaços submicroscópicos da parede celular, em camadas polimoleculares ligadas por forças elétricas polares.

Na secagem, a água capilar é a primeira a ser removida da madeira, pois as forças que mantêm esta água presa nos lumens celulares são consideravelmente menores que as forças que mantêm a água aderida às paredes celulares (SKAAR, 1972; CECH & PFAFF, 1977; BROWN, 1988; WALKER et al., 1993).

Segundo SIMPSON (1991), a retirada da água livre proporciona uma melhora nas propriedades térmicas e elétricas da madeira, além de proporcionar uma considerável redução

do peso da madeira. O ponto em que os lumes celulares não mais contém água capilar e as paredes celulares encontram-se saturadas de água é conhecido como ponto de saturação das fibras (PSF). Este ponto, situa-se segundo KOLLMANN & CÔTÉ (1968); BROWN, 1988, entre 25-35% de umidade em relação ao peso seco do material, variando principalmente com as espécies, teor de extrativos e temperatura. Em termos práticos, considera-se como sendo de 30% para todas as espécies (BRAMHALL & WELLWOOD, 1976; RASMUSSEN, 1961; WALKER et al., 1993).

Segundo SIMPSON (1991), o PSF é importante para a secagem da madeira por várias razões:

- a) A energia necessária para evaporar a água das paredes celulares é maior do que a energia necessária para evaporar a água dos lumes celulares da madeira (aproximadamente 5% mais a 15% de umidade e 15% mais a 6% de umidade);
- b) A parede celular não irá contrair até alcançar o PSF e;
- c) Grandes mudanças nas propriedades físicas e mecânicas da madeira começam a manifestar-se no PSF.

Estas alterações nas propriedades são decorrentes da retirada da água presente nos espaços submicroscópicos da parede celular fazendo com que as micelas se aproximem uma das outras, conferindo maior rigidez à madeira (KOLLMANN & CÔTÉ, 1968; CECH & PFAFF, 1977).

a) Movimento de Água Capilar

Acima do PSF, o movimento de umidade do interior para superfície da madeira é causada por forças capilares, e segue a lei de Hagen e Poiseuille (SIAU, 1971; HART, 1975). Em um capilar cheio, o movimento da água capilar é produzido por diferença existente em tensão devido às forças existentes na superfície do menisco dentro do capilar. A força de tensão "T" em um menisco balanceado de raio capilar "r", pode ser calculado utilizando-se a

equação (3), sem levar em consideração as diferenças de pressão do ar existente dentro do tubo capilar (KOLLMANN & CÔTÉ, 1968).

$$T = \frac{2 \cdot S}{r} \quad (3)$$

onde:

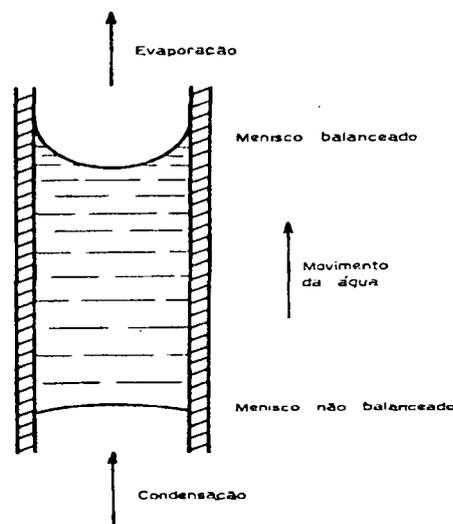
T = tensão capilar, kgf/cm²;

S = tensão superficial do líquido, kgf/cm;

r = raio do capilar, cm.

Na figura 5, pode-se observar um capilar com um menisco balanceado e outro não balanceado. Nesta situação existe um movimento de água na direção do menisco balanceado (mais côncavo), uma vez que a pressão de vapor nesta situação é menor que a pressão de vapor sob a superfície plana. Assim, quando a pressão de vapor diminui com a redução do raio do menisco da interface ar-água do capilar, a tensão capilar do sistema aumenta. A tensão capilar é máxima quando o raio do menisco da interface ar-água do capilar atinge o raio do capilar, ou seja, a forma esférica.

FIGURA 5 - ESQUEMA SIMPLIFICADO DO MOVIMENTO DE ÁGUA EM UM CAPILAR



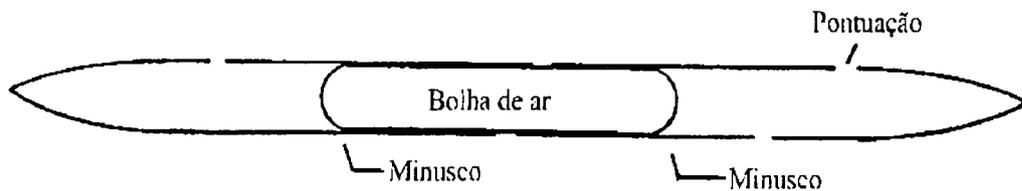
Fonte: KOLLMANN & CÔTÉ (1968).

O movimento capilar é afetado pela permeabilidade da madeira, temperatura e pela existência de bolhas de ar no interior das células (STAMM, 1964).

Segundo SKAAR (1972), as bolhas de ar são favoráveis ao movimento capilar desde que sejam maiores que o diâmetro do maior capilar. Caso contrário, ao passar por um capilar de menor diâmetro irá retardar o fluxo de água capilar.

HART (1975) descreve o fenômeno da seguinte forma: como a madeira recém abatida apresenta uma substancial quantidade de bolhas de ar no interior das células e como comprimento típico do lume celular, cerca de 100 vezes seu diâmetro, as bolhas de ar que ocorrem são aproximadamente de forma cilíndrica, embora os lumes afilam-se em direção as extremidades das células (figura 6). A pressão exercida por uma dada bolha de ar é igual a pressão do ar mais a pressão de vapor d'água do interior da bolha (100% UR) menos a pressão capilar no menisco.

FIGURA 6 - ESQUEMA DE UMA BOLHA DE AR NO INTERIOR DA CÉLULA.



Fonte: HART (1975).

Por isso, a pressão total da bolha pode ser negativa ou positiva, exercendo força de tração ou compressão, dependendo sobretudo qual é a maior, se a pressão capilar ou a pressão do ar mais a pressão de vapor. Se a madeira é aquecida, a soma da pressão do ar mais a pressão de vapor aumenta rapidamente, enquanto a pressão capilar decresce alguma coisa, a bolha de ar irá tender a expandir e exercer uma pressão positiva na água. Se a abertura das pontuações na parede celular são permeáveis e a pressão do outro lado for menor, a água da cavidade celular será empurrada para fora da célula através das pontuações. Entre células adjacentes a uma mesma temperatura, a água irá fluir do lume de alta pressão para o de baixa pressão. Observe contudo, que tanto a permeabilidade das paredes (pontuações) como as bolhas de ar são necessárias para o fluxo de água capilar.

SIAU (1971) comenta que a condução de líquidos nas coníferas é realizada pelos traqueóides axiais e radiais com suas pontuações aureoladas, pelos parênquimas radiais e axiais com suas pontuações simples e semi-aureoladas, pelos canais resiníferos longitudinais e transversais e pelas células epiteliais. Entretanto, uma vez que os traqueóides constituem a maior porcentagem do volume das coníferas (cerca de 93%), o escoamento de líquidos nestas madeiras ocorre essencialmente através destes elementos. Segundo o mesmo autor, a permeabilidade é maior na direção longitudinal, em parte devido à presença dos canais resiníferos que possuem diâmetros maiores que os demais elementos e, portanto, oferecem menor resistência ao escoamento quando não obstruída por resinas. STAMM (1964) acrescenta que a permeabilidade na direção das fibras é de 50 a 100 vezes maior que no sentido transversal (radial e tangencial). No entanto, o autor ressalta que os canais resiníferos tem eficiência prejudicada na condução de líquidos, em virtude de se encontrarem, em geral, obstruídos por resina.

SIAU (1971) após tratar madeira de várias folhosas, entre elas *Eucalyptus regnans*, com sais dissolvidos em água e com preservativos oleosos, concluiu que a permeabilidade das folhosas é realizado através das células radiais, parênquima longitudinal, fibras, traqueóides vasicêntricos, traqueóides vasculares e principalmente através dos vasos. Embora WARDROH e DAVIS (1961), que trataram *Eucalyptus regnans* com sais solúveis em água e BEHR et al. (1969) citados por SIAU (1971), os quais trataram diferentes espécies de folhosas com preservativos oleosos, não observaram penetrações nas células parenquimáticas longitudinais. SIAU (1971) e WAKER et al. (1993) comentam ainda que as placas de perfuração dos vasos oferecem pouca resistência ao escoamento, devido a suas grandes aberturas e pequena espessura. Assim, os vasos funcionam como tubos capilares longos e abertos. A presença de tiloses nos vasos prejudica o movimento capilar (BROWN, 1988; WALKER et al., 1993).

b) Movimento de Água por Difusão

Abaixo do PSF o movimento de umidade através da madeira é considerado um fenômeno de difusão. Este fenômeno de forma geral é um processo que envolve o movimento

espontâneo de um material para outro, desde uma zona de maior concentração para uma zona de menor concentração, procurando alcançar o equilíbrio.

Segundo BRAMHALL & WELLWOOD (1976) e SIMPSON (1991), são três os possíveis caminhos da difusão da água através da madeira:

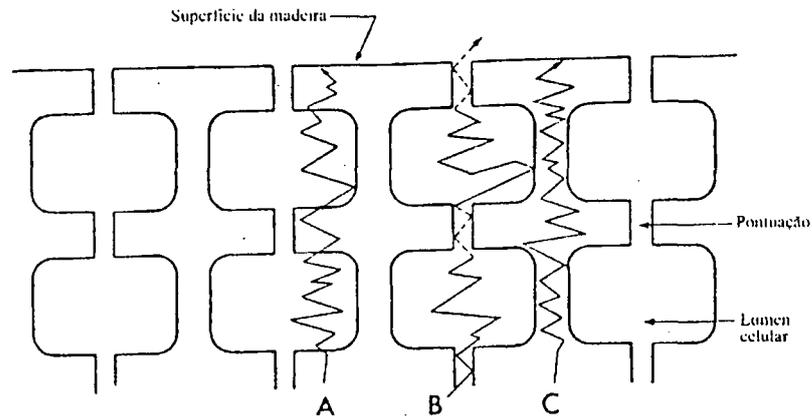
- a) difusão combinada de água higroscópica e vapor d'água (lume e parede celular),
- b) difusão de vapor (lume),
- c) difusão da água higroscópica (parede celular).

No entanto, comentam os autores que a maior parte da difusão de água ocorre através da combinação de água higroscópica e vapor d'água, isto é, a umidade escoada através do lume celular na forma de vapor d'água, condensa e movimenta-se através da parede celular até atingir a superfície da madeira (figura 7).

Segundo STAMM (1964), a passagem da água de impregnação através das paredes celulares deve-se ao "pulo molecular ao acaso" onde as moléculas pulam de um local de adsorção para outro apenas quando a força atraente e o trabalho de abrir a estrutura da madeira foram maiores que as forças atraentes do local de origem. Logicamente as moléculas absorvidas na segunda camada ou em camadas moleculares subsequentes terão mais facilidade de se mudar do que as moléculas da primeira camada.

O pulo molecular torna-se positivo e direcional somente com o estabelecimento de um gradiente de umidade dentro do material. Já o movimento do vapor d'água através das cavidades celulares, câmaras de pontuações, aberturas da membrana de pontuação e espaços intercelulares é estabelecido quando grande parte das forças capilares cessam, ficando nas cavidades celulares apenas ar e vapor d'água, estabelecendo-se assim um gradiente de pressão de vapor resultante das diferenças de umidade relativa do ar confinado nestes espaços e do ar que envolve a madeira. Logo, se uma área de alta concentração de vapor d'água (interior da madeira) e outra de baixa concentração mais superficial entrarem em contato, a área de maior concentração cederá vapor d'água para a de menor concentração.

FIGURA 7 - ESQUEMA DOS POSSÍVEIS CAMINHOS DA ÁGUA DURANTE O PROCESSO DE DIFUSÃO.



Fonte: BRAMHALL & WELLWOOD (1976).

Caso o fluxo e gradiente de umidade sejam constantes no espaço e no tempo, a quantidade de umidade removida da madeira pode ser determinada pela primeira lei de Fick, que é expressa pela equação (4).

$$Kd = \frac{m \cdot L}{t \cdot A \cdot M} \quad (4)$$

onde:

Kd - coeficiente de condutividade por difusão de vapor d'água na madeira, $\text{g/cm}^2 \text{ S } \%$,

m - massa de vapor d'água transportada através do corpo de prova, g;

L - comprimento do corpo de prova na direção do fluxo, cm;

A - área transversal do corpo de prova perpendicular à direção do fluxo, cm^2 ;

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

t - tempo.

Como o fluxo e o gradiente são variáveis no tempo e no espaço, quando seca-se a madeira, a equação anterior não pode ser aplicada e a segunda lei de Fick expressa melhor o fluxo por difusão equação (5).

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

onde:

$\frac{dM}{dt}$ = quantidade de umidade removida (M) na unidade de tempo (t),

Dg = coeficiente de difusão médio, cm²/s,

$\frac{d^2 M}{dx^2}$ = variação de umidade na distância (x).

2.3.2. Efeito da Vaporização na Secagem

2.3.2.1. Considerações Gerais

Segundo MOLL (1948), citado por CAMPBELL (1961), a vaporização tem sido praticada na Europa desde a metade do século 18 como uma etapa preliminar à secagem.

Várias razões tem sido apresentadas para justificar a vaporização da madeira. Inicialmente foi utilizado para esterilizar a madeira, escurecer algumas espécies, liberar tensões de secagem e recuperação do colapso, posteriormente observou-se efeitos sobre a taxa de secagem, gradiente de umidade, contração e colapso, degradação da madeira e estabilidade dimensional (SIMPSON, 1975; 1976).

2.3.2.2. Vaporização Preliminar à Secagem

A vaporização à pressão atmosférica antes da secagem tem demonstrado melhorar a permeabilidade da madeira. Muitos pesquisadores direta ou indiretamente observaram que a vaporização aumenta a permeabilidade da madeira, enquanto que os primeiros trabalhos mostram reduções no tempo de secagem após a vaporização da madeira verde (TIEMANN,

1920; KOEHLER & THELEN, 1926), isto foi explicado como sendo devido somente ao aquecimento extra adicionado à madeira no processo de vaporização

ELLWOOD & ERICKSON (1962) constataram que a vaporização da madeira verde causa uma imediata perda de umidade durante o período de aquecimento pela elevação da temperatura, posteriormente quando atinge a temperatura, ocorre uma expansão das bolhas de água dentro da madeira e, durante o período de resfriamento, mais umidade é perdida por evaporação.

Entretanto trabalhos mais recentes tem mostrado existem efeitos da vaporização que são relevantes para a secagem da madeira.

ELLWOOD & ECKLUND (1961) obtiveram um aumento na permeabilidade longitudinal de um fator 20 na secagem de *Black oak* após a vaporização a 100°C durante 4 horas.

BENVENUTI (1963) citado por SIMPSON (1976), obteve um aumento na permeabilidade longitudinal em madeira de *Lobolly pine* para nitrogênio após 4 horas de vaporização a 100°C. COMSTOCK (1965) reportou ter duplicado a permeabilidade longitudinal à água no cerne de madeira de *Eastern hemlock* após ter vaporizado a madeira durante 4 horas a 100°C. CHEN (1975) reportou que a vaporização em cerne de madeira de *Black walnut* a 100°C durante 4 horas aumentou a permeabilidade longitudinal em cerca de 138%, enquanto que a vaporização do alburno desta espécie não melhorou a permeabilidade longitudinal.

NICHOLAS & THOMAS (1968) reportaram que a vaporização de *Lobolly pine* resultou em hidrolização parcial da membrana de pontuação, desaspiração da pontuação e melhora na permeabilidade. O mesmo fenômeno foi observado por KININMONTH (1971) com o cerne de *Nothofagus fusca* (Hook. f.) após 3 horas de vaporização a 100°C.

Além da permeabilidade, a difusão de vapor d'água é também um importante fator na taxa de secagem.

MACKAY (1971) reportou o efeito da vaporização na madeira de *Eucalyptus regnaus* e *Ceratopetalum apetalum*. Os resultados mostram um aumento no coeficiente de difusão tanto no estado constante como não constante, além de favorecer a recuperação do colapso após a secagem.

SHARMA et al. (1988) citados por AVRAMIDIS & OLIVEIRA (1993) reportaram o mesmo comportamento na secagem de *Gmelina arborea*, *schina wallchii*, *Dipterocarpus* spp., e *Eucalyptus tereticornis* com espessura de 3,2 cm. MISILO (1971), entretanto, não obteve diferenças significativas no coeficiente de difusão entre madeira vaporizada e controle de *Beech*.

Muitos estudos tem demonstrado um decréscimo no tempo de secagem devido à vaporização.

CAMPBELL (1961) reportou a redução no tempo de secagem em estufa em alguns *Eucalyptus* spp com 2,5 cm de espessura em cerca de 28% para secar de verde até 20% e reduções de 35% para secar de verde até 15% de umidade. ELLWOOD & ERICKSON (1962) reportam que a vaporização a 100°C por 4 horas proporcionou uma redução no tempo de secagem em estufa de 20% em *Redwood*. Além disso, proporcionou uma redução nas manchas, colapso e gradiente de umidade. Similares observações com adicional redução nos defeitos de secagem tais como; empenamentos, encanoamento e rachaduras foram observadas neste estudo conduzido em madeira de *Shorea agraboensis* (ORDINÁRIO, 1972); *Parashorea plicata Brandis* (ORDINÁRIO, 1968) e *Dipterocarpus grandiflorous* Blanco (CASIN, 1971). ORDINÁRIO (1968) obteve reduções no tempo de secagem tanto em estufa como ao ar livre para madeira verde de *Bagtikan*. Os resultados mostraram ainda uma redução no gradiente de umidade e no índice de fendas superficiais em material vaporizado. KOZLIK (1969), após a vaporização de cerne verde de *western hemlock* a 100°C durante 6 horas também observou reduções no tempo de secagem quando comparado com o controle. SIMPSON (1976) reportou que a vaporização a 100°C por 4 horas na madeira de Red oak (*Quercus rubra*) com uma espessura de 2,5 cm além de proporcionar uma redução de aproximadamente 23% no tempo de secagem apresentou ainda uma redução no gradiente de umidade. Resultados semelhantes para esta espécie foram obtidos por HARRIS et al. (1989) citado por AVRAMIDIS & OLIVEIRA (1993) após a vaporização a 100°C por 4 horas.

SHARMA & BALI (1969) foram dos primeiros pesquisadores a analisar não somente o tempo de secagem mas também o efeito da vaporização na taxa de secagem de duas espécies de folhosas da Índia. Neste estudo os resultados mostraram que o material vaporizado a 100°C aumentou a taxa de secagem comparado ao controle.

SIMPSON (1975) reportou que a vaporização a cerca de 100°C durante períodos de 1/2, 1, 2, 5 e 12 horas no cerne da madeira de Cherrybark (*Quercus falcata* var. *pagodaefolia*), alburno e cerne de Sweetgum (*Liquidambar styraciflua* L.) e alburno e cerne de White fir (*Abies concolor* Gord. e *glend.*), aumentaram a taxa de secagem em todas as espécies, salientando que a madeira de Red oak (*Quercus rubra* L.) foi que apresentou o maior aumento (50%) na taxa de secagem. Comenta o autor ainda que curtos períodos de vaporização como 1/2 hora são equivalentes aos períodos mais longos. KOZLIK (1970) mostrou que a vaporização em seções finas de cerne de *western hemlock* causou um leve aumento na taxa de secagem. KOZLIK & HAMLIN (1972) também reportou um leve aumento na taxa de secagem em madeira de *western hemlock* com 4,4 cm de espessura após a vaporização. Da mesma forma HASLET & KININMONTH (1986) mostram que a vaporização na madeira de *Nothofagus fusca* (Hook. f.) aumenta a taxa de secagem. ALEXIOU et al. (1990) reportam que o emprego de vaporização a 100°C durante 3 horas após 1 hora de aquecimento inicial na madeira de *Eucalyptus pilularis* Sm. proporcionou uma redução no gradiente de umidade entre o centro da peça e a superfície de 12,2 % durante os 8 primeiros dias e 5,2% durante toda a secagem, além de proporcionar uma redução na taxa de secagem que variou de 7-16%. Comenta o autor ainda que houve uma redução de cerca de 53% nas rachaduras superficiais. CHAFE (1990) comenta que a vaporização na madeira de *Eucalyptus regnans* F. Muell durante 30 minutos produz uma pequena mas significativa redução na variação dimensional da madeira, maior contração volumétrica e proporcionou uma melhor recuperação do colapso. AVRAMIDIS & OLIVEIRA (1993), após a vaporização da madeira de *Hem-fir* à 100°C por 5, 10 e 20 horas, não observou melhora na taxa de secagem comparado ao controle. Entretanto mostrou uma significativa redução no gradiente de umidade a medida que aumentava o tempo de vaporização, assim como observou também um aumento na contração com o aumento na duração da vaporização. Não sendo observado pelo autor alteração na qualidade da madeira.

2.3.2.3. Vaporização Final

A vaporização da madeira a 100°C e 100% de umidade relativa (vapor saturado) é utilizada também para recuperação do colapso ao término da secagem. Este tratamento pode durar de 4-8 horas, dependendo de sua intensidade, e desde que a madeira não tenha sofrido ruptura de suas paredes celulares (HILDEBRAND, 1970; PRATT, 1974, 1986).

O colapso é um defeito que ocorre na madeira em teores de umidade acima do PSF, normalmente quando é empregada alta temperatura na fase inicial da secagem, o que provoca uma diminuição da resistência da madeira à compressão, causando assim uma contração anormal das células que é acompanhada de distorções das paredes celulares (KOLLMANN & CÔTÉ, 1968; SIAU, 1971; WALKER et al., 1993; RASMUSSEM, 1961; BROWN, 1988).

Com relação ao teor de umidade mais indicado para aplicação da vaporização existe uma certa divergência entre os autores.

Segundo KOLLMANN & CÔTÉ (1968); SIMPSON (1991); WALKER et al. (1993) o teor de umidade mais recomendado para realização da vaporização é quando a madeira encontra-se com um teor de umidade de 15% em relação ao peso seco. Entretanto WALKER et al. (1993) comenta que no caso do emprego da secagem a alta temperatura, a vaporização deve ser aplicada quando a madeira encontra-se abaixo de 10%.

Segundo MACKAY (1972), que trabalhou com madeira de *Eucalyptus delegatensis* colapsado, secada a teores de umidade de 5, 12 e 18% com amônia, o teor de umidade de 12% foi o mais adequado para recuperação do colapso.

Para CECH & PFAFF (1977) o tratamento de vaporização é mais eficiente quando realizado em teor de umidade de 20%. Segundo BLUHM & KAUMAN (1965;1995), a recuperação do colapso dever ser realizada quando a madeira estiver com 17% de umidade.

Segundo SIMPSON (1991), a recuperação do colapso ocorre durante a vaporização, pois a madeira reabsorve cerca 1-4% de umidade, as paredes incham novamente e tornam-se superficialmente plásticas em função do calor e alta umidade, permitindo que as tensões residuais ou latentes dentro da parede celular, as quais opõem-se ao colapso, forcem as células alteradas e comprimidas a retornarem a sua forma original.

Segundo WRICHT (1961), este tratamento não é recomendado para liberar as tensões no final do processo de secagem, pois quando uma madeira foi submetida à esta condição, as

camadas superficiais absorveram umidade rapidamente e incharam, sendo este processo limitado, em parte, pelo centro da peça ainda não afetado. Se a retenção de umidade pelas camadas superficiais for grande, o inchamento será proporcional, provocando tensões de compressão. Durante a subsequente secagem (após a vaporização), as camadas superficiais tenderam a contrair-se excessivamente por causa da tensão de compressão, que será impedida pela parte central, colocando desta forma as camadas superficiais sob tração e o centro sob compressão produzindo-se, portanto, uma reversão das tensões, também denominado encruamento invertido. Para este autor, a aplicação de vaporização deve ser realizada quando a madeira encontra-se com um teor de umidade entre 18-20%.

De acordo com HILDEBRAND (1970), a vaporização somente é recomendada nos casos em que durante a secagem seja detectado um encruamento forte. Nesta situação a secagem deve ser imediatamente interrompida e desligado o aquecimento, fechado o sistema de ventilação e então injetado vapor saturado até que o encruamento seja totalmente eliminado.

2.4 LIMITAÇÕES DO USO DA MADEIRA DE EUCALYPTUS

2.4.1. Tensões de Crescimento

As tensões de crescimento são definidas como forças de tração e de compressão existentes no tronco da madeira verde de algumas espécies, não incluindo as tensões de compressão resultantes do peso da copa das árvores e nem aquelas resultantes de variações diárias e sazonais decorrentes das tensões exercidas pela seiva (KUBLER, 1987).

Para CHAFE (1979), as tensões que desenvolvem-se nos troncos das árvores em resposta à forças externas de gravidade, caso do peso dos galhos, denominadas de madeira de reação (madeira de compressão nas coníferas e madeira de tração nas folhosas), são consideradas como caso especial de tensões de crescimento ou mesmo como uma extensão do fenômeno.

2.4.1.1. Origem das Tensões de Crescimento

A primeira tentativa para explicar as tensões de crescimento surgiu com MARLEY (1928) citado por DINWOODIE (1966); BOYD (1972); CHAFE (1979); CONRADIE (1980) observando as curvaturas que surgiram nas tábuas de *Olmo (Ulmus sp)* após seu corte. O autor considerou que estas tensões poderiam ser causadas pelo próprio peso da árvore durante seu desenvolvimento. Entretanto, cálculos de distribuição de pressões associadas a dados de pesos reais de diferentes espécies convenceram-no de que as tensões devidas ao peso próprio da árvore não seriam suficientes para causar substancial influência nas dimensões longitudinais da madeira serrada. Segundo POST (1979), os valores obtidos por MARLEY variam de apenas 0,7 a 3,5 kg/cm², o que corresponde a aproximadamente 1% da magnitude máxima das tensões de crescimento longitudinais comumente observadas sendo portanto bastante razoável desconsiderar a influência do peso da árvore. JACOBS (1945) concorda que o peso da árvore representa apenas uma contribuição secundária às tensões de crescimento longitudinais acrescentando que os gradientes longitudinais de deformação encontrados nos troncos retilíneos de eucaliptos correspondem quantitativamente aos encontrados em galhos da mesma espécie.

KOEHLER (1933) considerou várias hipóteses para as tensões transversais da madeira verde tais como: crescimento circunferencial maior que o radial, redução da turgidez do tecido mais velho, ou mudança química da madeira mais antiga. No caso do crescimento do diâmetro(d) da árvore em relação ao crescimento de sua circunferência ($c = \pi d$), provoca o aparecimento de tensões de compressão circunferências, trações radiais e, conseqüentemente, fissuras internas. O inverso seria improvável, uma vez que as fissuras na periferia são menos comuns de serem observadas. Nas outras duas hipóteses, as alterações de dimensões de células em função da plasmólise ou de alterações químicas quando da morte da célula, estando estas presas a outras células, originam as referidas tensões. Entretanto o autor reconhece a falta de dados concretos para suportar suas hipóteses.

MUNCH (1938), citado por DINWOODIE (1966), estudando madeira de reação, sugeriu que a deposição de materiais nos espaços laterais intermicelares durante a lignificação seria a responsável pela contração longitudinal e pelo inchamento transversal das células da madeira, provocando assim o aparecimento de tensões longitudinais de tração e transversais de

compressão respectivamente. Embora esta hipótese tenha sido formulada para madeira de tração ela também tem sido utilizada para explicar as tensões de crescimento em troncos de árvores eretas e normais.

JACOBS (1938), citado por CONRADIE (1980), sugere que a origem das tensões de crescimento é o resultado do encurtamento da nova camada de crescimento da madeira quando do processo de solidificação a partir do câmbio. Esta tendência de contração sendo resistida pela adesão destes elementos e outros, situados mais no interior da madeira, provoca um estado de tração a cada nova fibra formada, acumulando com isso uma força muito grande ao longo de cada raio a medida que a árvore cresce em diâmetro. Entretanto JACOBS (1945) considerando novas possibilidades para origem das tensões de crescimento, concluiu que a tensão superficial juntamente com as forças de tração da seiva seriam as principais responsáveis pelas tensões de crescimento.

BOYD (1950c) analisa as hipóteses formuladas até então sobre a origem das tensões de crescimento e conclui que a hipótese da tração da seiva apresentada por JACOBS (1945) não é viável, porque se forças de sucção da ordem de $140-200 \text{ kg/cm}^2$ necessárias para originar as tensões de crescimento fossem geradas, então existiria a possibilidade de ocorrência do colapso dos vasos e fibras do lenho inicial, o que não ocorre na prática. Estudos conduzidos por THOMAS (1937) neste sentido, demonstraram que a sucção depende das dimensões dos canais condutores e da altura da árvore, e como a sucção da seiva é desenvolvida pelas folhas, espera-se maiores forças sendo desenvolvidas nas partes mais elevadas do que na base das árvores, causando neste caso tensões de crescimento maiores nas partes mais elevadas e menor na base do tronco, o que foi observado nos experimentos de JACOBS (1938; 1945).

Da mesma forma BOYD contesta a teoria do maior crescimento circunferencial do que radial, uma vez que qualquer ajuste de forma da célula pode ocorrer na diferenciação dos tecidos lenhosos anteriormente ao desenvolvimento da parede secundária. Esta parede é de maior importância nas considerações sobre tensão de crescimento devido a sua maior espessura e resistência comparada com a parede primária, não estando portanto, sujeita a pressão externa como pode ser comprovado pela uniformidade do tamanho das células.

Com relação a redução da turgidez das células proposta por KOEHLER (1933), BOYD argumenta que existe apenas uma pequena porção de células vivas na madeira adulta, na maioria das espécies, e portanto, com a referida redução já ocorrida. Como consequência de

mudanças químicas após a morte das células, da mesma forma é contestada por BOYD com base nos mesmos argumentos referidos no caso da perda de turgidez e, segundo o autor, não estar de acordo com efeitos observados nos resultados experimentais.

Entretanto BOYD (1950c) concorda com a teoria de MUNCH (1938) e JACOBS (1938) onde os autores sugerem que o material celulósico deva ser o primeiro responsável pelo surgimento das tensões de crescimento, embora possivelmente modificado pela quantidade e deposição de lignina e carboidratos integrantes.

JACOBS (1965) e BOYD (1950a), citado por KUBLER (1987), concluíram que a lignina das paredes celulares é a origem das tensões de crescimento já que as fibras podem alongar-se ou contrair-se como resultado da lignificação, em decorrência do próprio crescimento da árvore que tende a aumentar seu volume. Uma vez que a contração longitudinal da célula em crescimento é dificultada pelas células vizinhas mais velhas, as células em crescimento são submetidas a um esforço de tração, enquanto as mais velhas recebem um esforço de compressão. Assim, cada nova camada consecutiva de crescimento é depositada no tronco da árvore em estado de tração. Esta tensão é pequena quando se considera elementos individuais, mas sendo seu efeito de compressão cumulativo, coloca as células vizinhas em estado crescente de compressão longitudinal que podem atingir magnitude considerável. Já o crescimento lateral das células novas geradas no câmbio, sendo dificultado pelas células vizinhas mais velhas, provocam o aparecimento de tensões transversais de compressão na periferia do tronco (figura 8).

WATANABE (1965) apresenta uma detalhada descrição do processo de encurtamento da célula como causa das tensões de crescimento de forma similar aos estudos de BOYD (1972). A intercalação e polimerização da lignina nos espaços intermicrofibrilares das paredes celulares provoca inchamento destas aumentando o diâmetro das células como é comprovado por dados obtidos por GROZDITS & IFJU (1969) e BOYD (1972). Associado ao aumento diametral, ocorre um aumento ou diminuição do comprimento da célula em função do ângulo microfibrilar da sua camada (S_2) da parede secundária, sendo que para ângulos pequenos, ocorre encurtamento e para ângulos grandes, ocorre alongamento da célula. Segundo BOYD (1972), para ângulos microfibrilares entre 10 a 40°, a célula contrai longitudinalmente, enquanto que para ângulos acima de 40°, a célula se alonga. Portanto, considerando que os ângulos fibrilares da parede secundária tendem a ser relativamente pequenos é esperado um

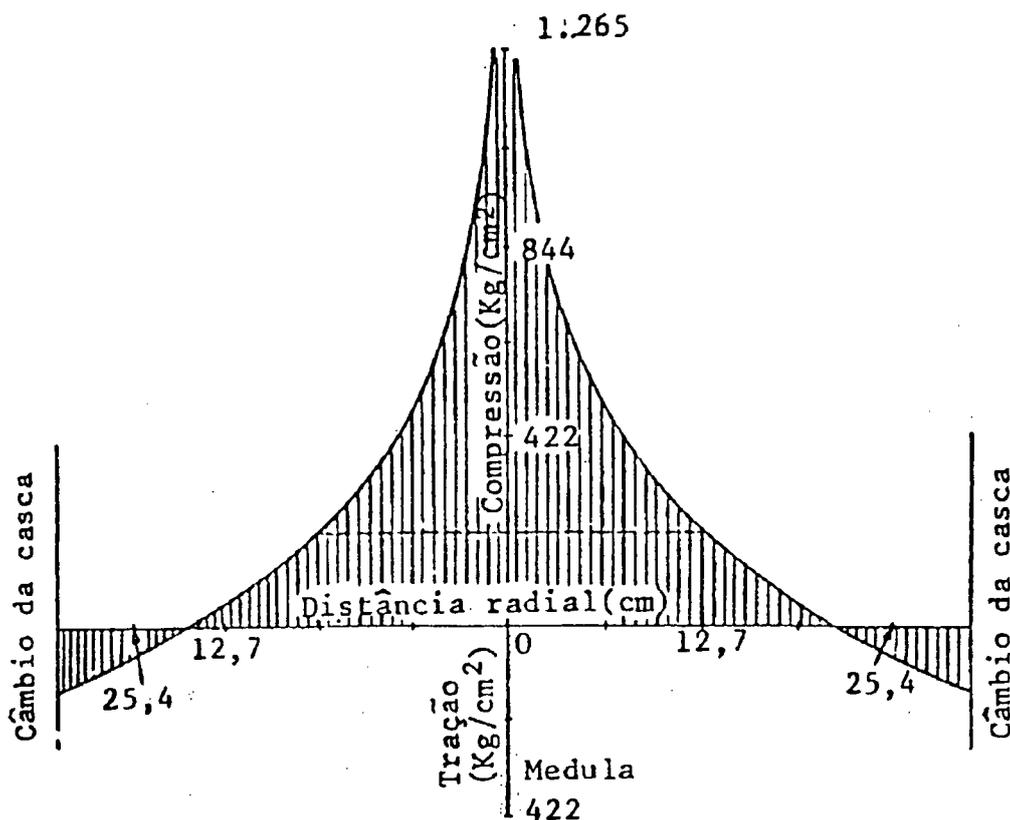
encurtamento das células (CHAFE 1979; BOYD, 1972). Desta forma para LISBÔA (1993) a geração das tensões de crescimento, levando-se em consideração a ocorrência do inchamento e do alongamento ou encurtamento de células devido ao processo de lignificação, é perfeitamente compreensível. Qualquer alteração nas dimensões de uma célula como resultado da lignificação de suas paredes em um estágio moderadamente avançado de sua diferenciação, força alterações similares em todo o tecido já diferenciado ao qual a célula está firmemente presa. Inevitavelmente, o tecido maduro resiste a tal alteração forçada de suas dimensões, impondo, por sua vez, uma restrição na alteração de dimensão da célula em diferenciação. Esta restrição de movimentos de elementos presos uns aos outros provoca o aparecimento de tensões. Na direção longitudinal, a restrição imposta à diminuição do comprimento das células em diferenciação na periferia do tronco, pelos tecidos maduros, origina tensão de tração longitudinal na periferia. Inversamente, a força exercida pelas células em diferenciação que tendem a diminuir de comprimento, sobre os tecidos maduros, origina tensões de compressão longitudinais incrementais através de qualquer seção transversal do tronco ou galho de uma árvore.

2.4.1.2. Distribuição das Tensões de Crescimento

As tensões de tração longitudinal geradas em cada nova camada de madeira comprime todas as outras camadas mais velhas, reduzindo as tensões de tração em cada uma das camadas de crescimento formada anteriormente conforme descrito por MUNCH (1938), JACOBS (1938; 1965), BOYD (1950a) citados por KUBLER (1987).

BOYD(1950c), citado por CHAFE (1979), descreve na figura 8 como as novas camadas de células se acumulam e progressivamente alteram as tensões de crescimento a cada distância (r) da medula, fazendo com que o centro do tronco seja submetido a uma tensão de compressão crescente.

FIGURA 8 - DISTRIBUIÇÃO TEÓRICA DAS TENSÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS.



Fonte: CHAFE (1979).

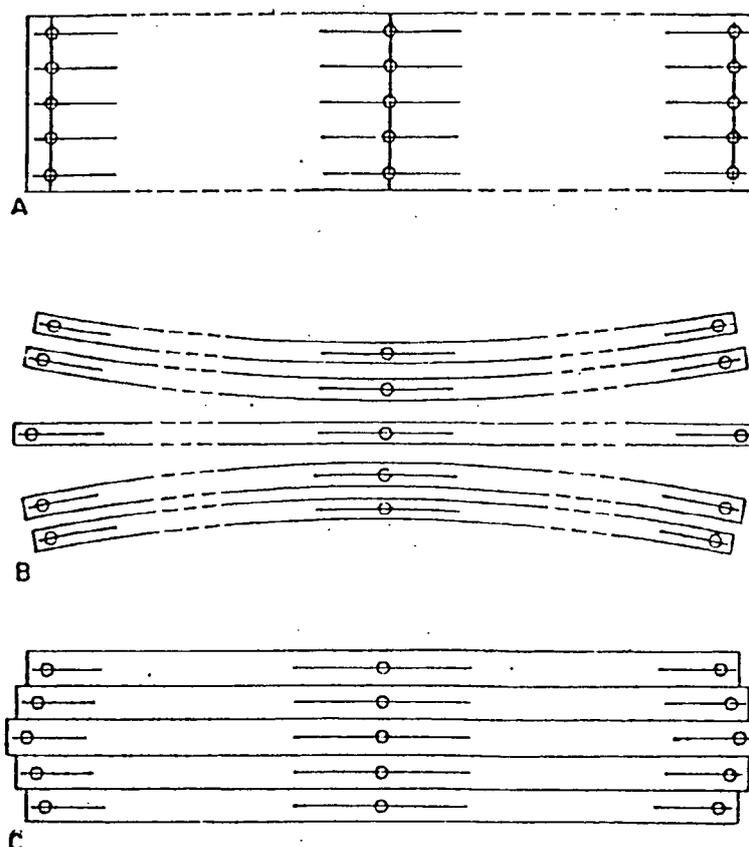
Para MALAN (1984) como o crescimento em diâmetro das árvores é formado por novas camadas de células em diferenciação, surge no xilema, logo imediatamente ao câmbio, a formação da tensão de tração longitudinal de crescimento. A magnitude dessa tensão é consideravelmente baixa, quando analisada à nível de camada individual, mas que se torna máxima na periferia das toras pelo acúmulo das camadas de crescimento no sentido radial. Em virtude do novo xilema se encontrar em contato com o xilema diferenciado mais antigo, inicia-se progressivamente uma tensão de compressão longitudinal de crescimento no centro da tora.

JACOBS (1938; 1945) mostra através da figura 9 como as tensões de crescimento longitudinais, que estão distribuídas no tronco de uma árvore, manifestam-se em amostras retiradas de uma prancha diamétrica (A). As peças externas curvam-se com a borda convexa voltada para o lado da medula (B). Se as peças serradas forem forçadas a endireitarem, as peças exteriores diminuem seus comprimentos e as internas aumentam de tamanho (C).

BOYD (1950) quantificou as tensões de crescimento longitudinais em toras de *Eucalyptus regnans*. O autor encontrou valores máximos de tensão de tração periférica variando de 71,4-142,8 kg/cm² e tensões de compressão longitudinal no centro da tora variando de 142,8-214,0 kg/cm². Valores semelhantes foram obtidos por JACOBS (1945), embora TURNBULL (1965) tenha obtido tensões de compressão longitudinal acima de 346,7 kg/cm². Em todas as toras, BOYD (1950a) obteve tensões zero a aproximadamente 1/3 do raio da periferia, enquanto KUBLER (1959) considerou a tensão zero quando ocorre a cerca de 2/5 do raio da periferia.

Da mesma forma NICHOLSON (1973b), citado por LISBÔA (1993), determinou as tensões de crescimento longitudinais periféricas em 41 árvores de *Eucalyptus regnans*, encontrando na oportunidade, uma variação das tensões de 50-167 kg/cm² entre as médias de 10 medições por árvore.

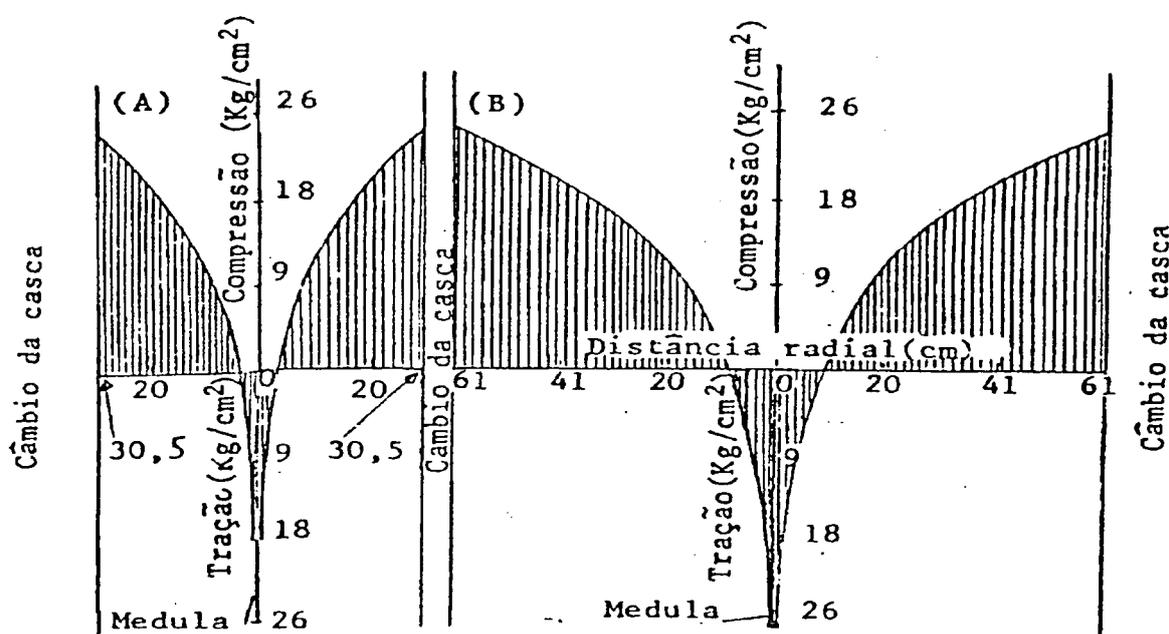
FIGURA 9 -EFEITO DAS TENSÕES DE CRESCIMENTO LONGITUDINAIS: A) PONTOS DE MEDIÇÃO FIXADOS NA PRANCHA (B) EMPENAMENTO DE PEÇAS SERRADAS (C) VARIAÇÃO DE SEUS COMPRIMENTOS.



Fonte: FAO (1981).

JACOBS (1945) estudando as tensões transversais de crescimento, concluiu que as camadas da madeira próxima a periferia do tronco encontram-se em estado de tensão de compressão, enquanto que a camada interna encontra-se em estado de tensão de tração, conforme mostra a figura 10. Este comportamento foi demonstrado quando o corte em espiral da periferia em direção a medula, em um disco retirado transversalmente de um tronco, produziu uma expansão das camadas externas. O mesmo ocorre quando o círculo externo de um disco é cortado enquanto o disco interno restante se contrai.

FIGURA 10 - DISTRIBUIÇÃO TEÓRICA DAS TENSÕES DE CRESCIMENTO TRANSVERSAIS: (A) ÁRVORE DE APROXIMADAMENTE 60 CM DE DIÂMETRO E (B) ÁRVORE DE APROXIMADAMENTE 120 CM DE DIÂMETRO.



Fonte: CHAFE (1979).

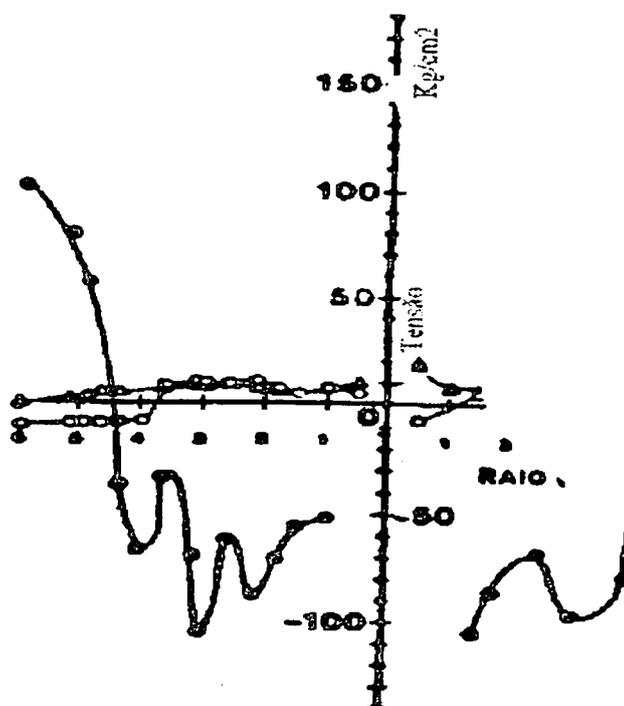
Estas tensões de crescimento transversais alcançam em média apenas um décimo da magnitude das longitudinais, entretanto por ocasião do corte transversal, as forças longitudinais são transferidas para o plano horizontal e, como consequência, ocorre um aumento maciço das tensões transversais que freqüentemente provocam rachaduras em troncos

e pranchões (JACOBS, 1945; BOYD, 1950a; KUBLER, 1959 citados por DINWOODIE, 1966).

JACOBS (1945) e BOYD (1950a) referindo-se a magnitude das tensões transversais, apresentam valores de compressão tangencial para madeira de coníferas e folhosas variando entre 2,2-25,5 kg/cm^2 .

OKUYAMA & KIKATA (1975c), citado por LISBÔA (1993), deixam concluir através do gráfico mostrado na figura 11, uma tensão compressiva periférica na ordem de 12 kg/cm^2 para *Eucalyptus sp* e uma tração máxima em direção a medula de aproximadamente 10 kg/cm^2 . As tensões radiais mostram um valor igual a zero na periferia alcançando uma máximo de aproximadamente 20 kg/cm^2 próximo a medula.

FIGURA 11-DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES LONGITUDINAIS DE CRESCIMENTO, TANGENCIAIS E RADIAIS NO TRONCO DE *EUCALYPTUS SP*.



Fonte: LISBÔA (1993)

2.4.1.3. Formas de Atenuação das Tensões de Crescimento

Conforme já mencionado anteriormente a madeira de *Eucalyptus* spp, de uma maneira geral, apresenta altos níveis de tensões de crescimento. Tensões estas distribuídas tanto longitudinalmente como transversalmente aos eixos anatômicos da madeira, as quais são liberadas na forma de rachadura tanto durante a derrubada da árvore como quando do desdobro das toras. Portanto, o ideal seria encontrar formas para aliviar estas tensões com a árvore ainda em pé. Segundo CHAFE (1979) inúmeras propostas tem sido apresentadas neste sentido, mas que por uma razão ou outra, nenhuma até o momento foi considerada inteiramente satisfatória.

JACOBS (1938), citado por KUBLER (1987), recomenda primeiramente que o problema seja visto como de ordem silvicultural, procurando assim, que todo esforço seja feito para conseguir troncos verticais com tensões periféricas de crescimento uniforme. Segundo o autor mesmo pequenas inclinações do tronco provocam tensões periféricas desiguais e, portanto, deve-se evitar toda forma de inclinação, devido a competição entre árvores, à inclinação do terreno, à ventos ou recebimento de luz solar em apenas um lado. Comenta o autor ainda que como as árvores de menor diâmetro são menos propícias a apresentarem rachaduras e as de grande diâmetro são menos propícias a apresentarem empenamentos na madeira serrada deve-se, portanto, estudar a melhor idade de rotação do povoamento.

CHAFE (1979), citado por AGUIAR (1986), tentou obter redução nas tensões de crescimento através de um processo de bloqueamento da lignina na árvore semelhante ao que ocorre em certas espécies de madeiras ocasionado por uma infecção virótica que resulta em uma deformação do tecido lenhoso conhecido por “madeira elástica”. Com isto o autor esperava que as tensões de crescimento nas árvores tratadas fossem extremamente baixas ou até mesmo inexistentes.

GIODARMO & GHISI (1965), DE VILLIERS (1973) e NICHOLSON (1973) observaram que a árvore morta antes da derrubada, seja ela morta por anelamento, descascamento ou desfolhação, apresentava tensões de crescimento muito menores que as árvores derrubadas quando vivas.

O emprego de fitas metálicas ou plásticas colocadas ao redor do tronco antes da derrubada, sugeridas por DE VILLIERS (1973) e KUBLER & CHEN (1975), mostra-se

efetivo porém de difícil manuseio nos trabalhos de campo. Da mesma forma TISSEVERASINGLE (1967), MAYER & WEGLIN (1955), citados por MALAN (1984), AGUIAR (1986) e ROZAS (1993), comentam que a utilização de peças metálicas fixadas nos topos das toras tais como, gang nail, prendedores em forma de S ou C, fixados após o corte transversal, não reduzem as tensões internas de crescimento porém restringem o desenvolvimento das rachaduras deixando o topo intacto até que o processo de secagem aumente a resistência à tração radial e contrabalance à tensão interna.

NICHOLSON (1973) observou que o armazenamento de toras, principalmente em locais úmidos por mais de 3 meses favorece o relaxamento das tensões de crescimento, entretanto este procedimento prolongado pode provocar rachaduras e empenamentos.

O anelamento com motosserra, em torno do tronco da árvore antes da derrubada e posteriormente na confecção das toras, demonstrou reduzir as rachaduras de topo (BARNACLE & GOTTSTEIN, 1968; GIODANO & CURRO, 1972; KUBLER & CHEN, 1975; HILLIS, 1978; VAN VYK, 1978; citados por MALAN, 1984 e ROZAS, 1993; CONRADIE, 1980 e KEINERT Jr. et al., 1992). Estudos conduzidos por KUBLER (1987) indicam que a eficiência do anelamento com motosserra aumenta com o aumento da profundidade do corte. Segundo este autor, para um anelamento com profundidade de $1/3$ do raio da árvore, a melhor distância para o corte de derrubada seria $1/4$ do diâmetro da tora, distância esta entre o corte de anelamento e o corte de derrubada. Comenta o autor ainda, que cada anelamento propicia uma nova e parcial rachadura de topo, por essa razão é inútil fazer um anelamento maior que $1/3$ de profundidade.

Existe ainda a possibilidade do alívio das tensões de crescimento utilizando técnicas adequadas de desdobro. Segundo a FAO (1981), os fundamentos das técnicas de serragem de eucaliptos, baseiam-se na separação da medula e nos cortes equilibrados. Neste sistema de corte são realizados simultaneamente duas ou mais serragens longitudinais de forma simétrica em relação ao centro da tora, de maneira a não desequilibrar o estado interno das tensões, girando a tora para o próximo corte, os quais porém muitas vezes são de difícil manuseio ou requerem equipamentos especiais.

CHAFE (1979) e KUBLER (1987) comentam sobre a possibilidade da liberação das tensões de crescimento através do relaxamento das deformações por meio da umidade e calor

promovendo assim uma nova acomodação das células ou de componentes das paredes celulares.

Segundo KUBLER (1987), a madeira com relaxamento de tensões continua com a deformação já admitida, mas esta deformação é transformada de elástica em plástica e, portanto, tal material não tem tendência a contrair, expandir, empenar ou rachar. Para SKOLMEN (1967); KUBLER (1973); KUBLER (1987) e AGUIAR (1986) a aplicação de calor e umidade simultaneamente na madeira prova a plasticização da lignina e com isto o alívio das tensões de crescimento, porém salientam os autores que em alguns casos podem propiciar o desenvolvimento de rachaduras de topo ou mesmo aumentar as existentes. Segundo o U.S. FOREST PRODUCTS LABORATORY (1987), a madeira submetida ao aquecimento em temperatura de 82°C pode em alguns casos reduzir cerca de 90% ou mais das tensões de crescimento. Caso as toras sejam aquecidas com comprimentos longos e então seccionadas, o novo topo desenvolverá menos rachaduras. SKOLMEN (1967) obteve reduções de cerca de 50% das tensões de crescimento em toras de *Eucalyptus saligna* com diâmetro de 15,2-20,3cm após um tratamento de 24 horas em água quente. Um segundo tratamento realizado pelo autor, porém com aplicação de vapor saturado à pressão atmosférica durante 48 horas, não demonstrou aparente melhora na liberação das tensões de crescimento. LUTZ & PANZER (1969) obtiveram completo relaxamento das tensões de crescimento após 48 horas de aquecimento em água quente a 93°C, sendo que a 65°C o tratamento aliviou cerca de 2/3 destas tensões. WEIK et al. (1984) observaram que a vaporização de toras de *yellow poplar* por mais de 10 horas reduziram significativamente as tensões de crescimento nesta espécie. OKUYAMA et al. (1987), citado por ROZAS (1993), obteve resultados favoráveis na liberação das tensões de crescimento em toras de *Zelkova serrata* Maquino, quando aquecidas por meio de vapores (fumaça quente à temperatura de 150-200°C por mais de 40 horas. KIKATA (1995), demonstrou que a aplicação de vapor saturado nas temperaturas de 90°C, 110°C e 140°C durante 3 horas em toras verdes de *Eucalyptus rubida* reduziu as tensões de crescimento de forma crescente com a temperatura empregada. ROZAS (1993) obteve reduções significativas nas tensões de crescimento em tora de *Eucalyptus grandis* quando utilizou tratamentos conjuntos de anelamento e vaporização a 96°C durante 18 horas.

2.4.2. Processo de Secagem

Considerando as dificuldades para secagem da madeira de eucaliptos, tais como colapso, rachaduras superficiais, alta contração, gradiente de umidade acentuado e pronunciadas tensões de secagem, esta espécie deve ser seca de forma lenta.

Segundo BRENNAN et al. (1966), a secagem de eucaliptos, em sua fase inicial deve ser realizada utilizando-se baixa temperatura, alta umidade relativa e baixa velocidade do ar, enquanto que na segunda fase da secagem, temperaturas mais elevadas são aceitas sem maiores problemas (CHRISTENSEN, 1985).

Segundo VERMAAS (1995), é prática tradicional em países como Austrália e África do Sul a secagem ao ar livre da madeira de eucaliptos de verde até o ponto de saturação das fibras (PSF), sendo posteriormente então seca em estufa convencional até o teor de umidade final. Embora, salienta o autor, no passado era comum a secagem natural desta espécie desde o princípio até o teor de umidade de equilíbrio.

Porém, tendo em vista o aumento do custo da madeira, longos períodos para a secagem e a falta de controle de qualidade, este método não é mais empregado no presente, sendo substituído por pré-secadores (SIMPSON, 1983; 1984).

Segundo SIMPSON (1991), os pré-secadores são muitas vezes utilizados para secar madeira, desde verde até aproximadamente 25% de umidade, antes da secagem em estufa até o teor de umidade final mais baixo, enquanto que, em outros casos são utilizados para secagem desde o início até o final. Segundo o autor, estes equipamentos são construídos com capacidade desde 100 até mais de 2000 m³. A temperatura e umidade relativa do ar são controladas com pontos de ajustes e de temperatura tipicamente variando de 25°C-40°C e umidade relativa mantida entre 60-90%.

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 (KAUMAN, 1964; BLUHN & KAUMAN, 1965; CAMPBELL & HARTLEY, 1978; 1984; HARLEY & 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*, com espessura de 25-50mm, pode ser completada com temperaturas de até 110°C sem maiores problemas para qualidade da madeira.

Estudos conduzidos por TOMASELLI (1992) e citado por ROZAS (1993), mostram que a utilização de um sistema combinado de pré-secagem ao ar livre e secagem convencional, para madeira de eucalipto de 25 mm de espessura destinado a caixotaria, leva cerca de 2 meses para atingir o ponto de saturação das fibras e, posteriormente, varia de 5 a 10 dias em estufa para alcançar o teor de umidade final desejado.

Segundo ROZAS & TOMASELLI (1993), a madeira de *Eucalyptus viminalis* apresenta um tempo de secagem de aproximadamente 21 dias para secar desde 50% até 9%, o que corresponde a uma velocidade de secagem de aproximadamente 2%/dia.

Da mesma forma, estudos conduzidos por ROZAS (1993) com madeira de *Eucalyptus grandis* com 30 mm de espessura, mostram que para secar esta espécie desde 97,6% até 7,6% de umidade final leva aproximadamente 26 dias. O que corresponde a uma velocidade de secagem de aproximadamente 3,5 %/dia. STORH (1977) comenta ainda da possibilidade de secar madeira de *Eucalyptus grandis* com uma temperatura inicial de 60°C. Segundo o autor, neste caso o tempo de secagem seria de 18 a 25 dias.

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% e 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.

2.4.3. Colapso na Madeira

O colapso é definido como uma contração excessiva “anormal “ das células quando a madeira é submetida a secagem acima do ponto de saturação das fibras. Este defeito resulta

freqüentemente em superfície grosseira, rugosa e desigual podendo ainda causar empenamentos na madeira serrada (BARISKA et al., 1987).

Segundo KAUMAM (1964), cerca de 50% do colapso que ocorre na madeira é causado pela tensão hidrostática, 33% é devido a contração da madeira e os 17% restantes são atribuídos a outros fatores.

2.4.3.1. Tensão Capilar - Tensão Hidrostática

A tensão superficial é a responsável pela resistência que um líquido oferece à penetração superficial, a aproximada forma esférica de uma gota d'água, a forma esférica de partículas de mercúrio em superfícies planas e ascensão de líquidos em tubos capilares. Seu desenvolvimento na superfície do líquido-gás pode ser explicado em função do comportamento molecular. No interior de um líquido, cada molécula é influenciada pela atração molecular a qual é distribuída mais ou menos simetricamente em toda a superfície da molécula. As moléculas da superfície do líquido, entretanto, encontram-se apenas parcialmente envolvidas por outras moléculas, e como consequência, elas são atraídas somente para seu interior, fazendo com que as mesmas se comportem como se estivessem envolvidas por uma membrana superficial invisível. No equilíbrio líquido-gás, à esta membrana corresponde uma força igual e de sentido contrário à força de atração molecular. Este comportamento característico da interfase líquido-gás é chamado de tensão superficial.

A partir do ponto de vista puramente termodinâmico, a tensão superficial pode ser vista como uma tendência do líquido de reduzir sua superfície de contato até o ponto de mínima energia. Assim, uma quantidade de líquido, na ausência de outras forças, procurará ocupar a menor área superficial possível como por exemplo, a aproximada forma esférica ocupada por uma gota d'água ou por uma bolha de ar no interior de um líquido. Este é o estado de mínima energia. Para aumentar a área superficial é necessário realizar trabalho, o qual poderá novamente ser recuperado se a área for novamente reduzida. Desta forma, a energia armazenada na superfície de um líquido é energia potencial, semelhante a de um corpo elástico comprimido, podendo ser definida como energia superficial por unidade de área, ou energia superficial específica.

Para se determinar a tensão superficial a partir do conceito de energia, isto é, da propriedade de um sistema que permite realizar trabalho, SIAU (1984) considera a figura 12 Presumindo a existência de uma bolha esférica de gás dentro de um líquido, o aumento da bolha pelo movimento do pistão exige um trabalho. A quantidade necessária de trabalho pode ser calculado como um produto de diferença entre as pressões P_0 e P_1 com o aumento do volume da bolha.

De acordo com a definição de tensão superficial:

$$\Gamma = \frac{dw}{dA} \quad (5)$$

e:

$$\frac{dw}{dA} = \frac{(P_0 - P_1)dv}{dA} \quad (6)$$

onde:

Γ : Tensão superficial do líquido (Dinas/cm²)

dw : Quantidade de trabalho requerido para a mudança de área dA .

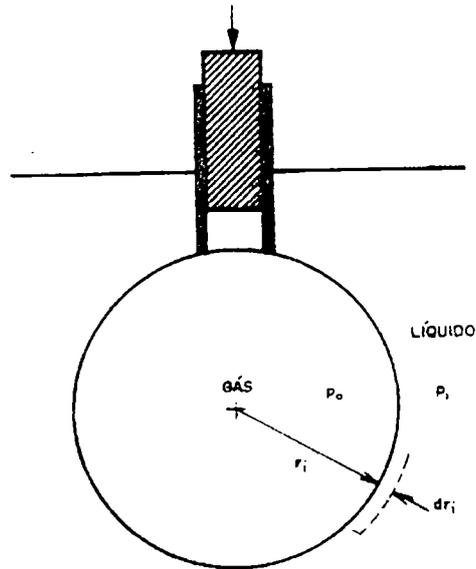
dA : Aumento da área (cm²)

P_0 : Pressão dentro da fase gasosa (Dinas/cm²)

P_1 : Pressão dentro da fase líquida (Dinas/cm²)

dv : Aumento de volume (cm³).

FIGURA 12 - AUMENTO DA BOLHA NO LIQUIDO



Fonte: SIAU (1971).

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

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_i^3 \quad (7)$$

$$A = 4 \cdot \pi \cdot r_i^2 \quad (8)$$

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

$$dV = 4 \cdot \pi \cdot r_i^2 \cdot dr_i \quad (9)$$

$$dA = 8 \cdot \pi \cdot r_i \cdot dr_i \quad (10)$$

então por substituição, teremos:

$$\Gamma = \frac{(P_o - P_i) \cdot r_i}{2} \quad \text{ou} \quad (P_o - P_i) = \frac{2 \cdot \Gamma}{r_i} \quad (11)$$

onde:

r_i = raio da interface ar-líquido (cm)

Uma das teorias mais aceitas para explicar o colapso na madeira são as tensões hidrostáticas nos lumens celulares. Por ocasião da secagem da madeira com umidade acima do ponto de saturação das fibras (PSF), a água capilar presente nos lumens celulares é removida através das pontuações das paredes celulares. O menisco formado na interface ar-líquido em uma destas aberturas provoca a tensão hidrostática na água. Se essa tensão for superior a resistência à compressão da parede celular, ocorre o colapso dessa célula.

Segundo KAUMAN (1964), para que a tensão hidrostática possa atuar na parede celular e causar o colapso é necessário que três condições sejam preenchidas:

- a) Alguns lumens celulares estejam cheios de água enquanto outros lumens vizinhos estejam vazios.
- b) A água destas células estejam no estado desgaseificado, caso contrário irá ocorrer cavitação, reduzindo a tensão hidrostática.
- c) Que a força de atração entre a madeira e água sejam mais altas que entre as moléculas de água. Segundo o autor, as forças de atração na madeira normalmente são o dobro das forças entre moléculas de água.

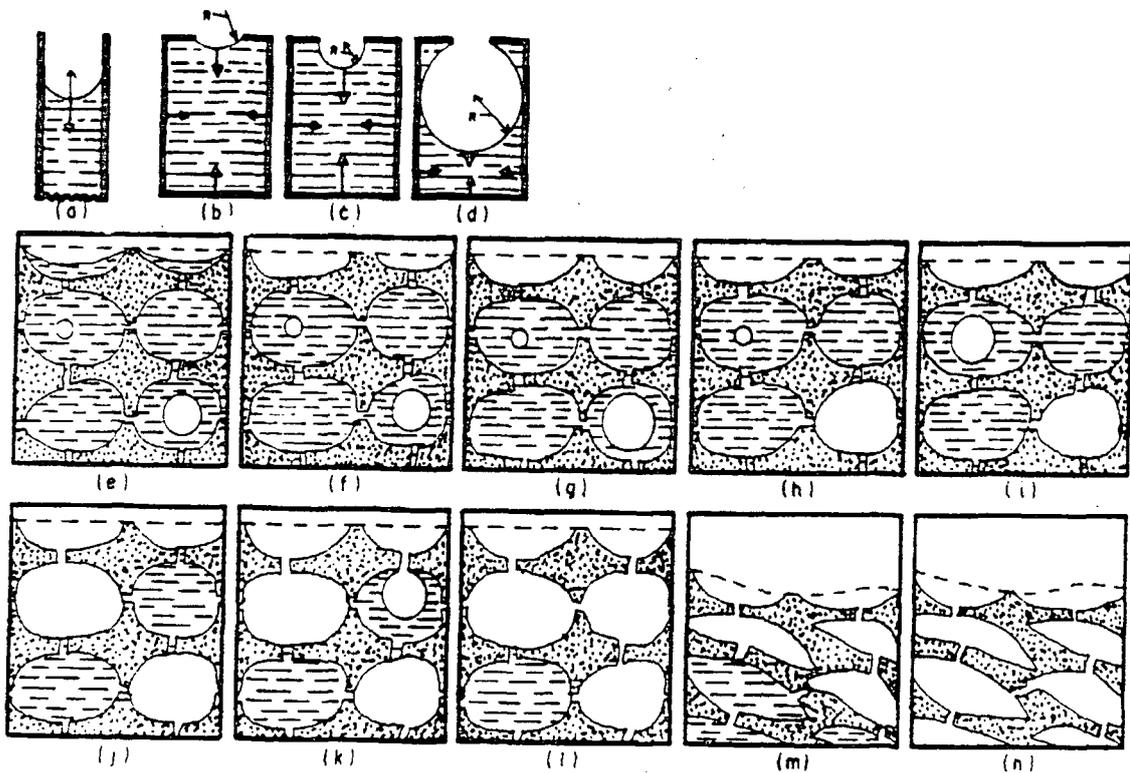
2.4.3.2. Mecanismo do Colapso

SKAAR em trabalho não publicado, conforme citado por SIAU (1984), descreve o mecanismo do colapso na madeira, figura 13. Segundo este autor, as forças capilares controladas pela equação da tensão capilar são as que causam a ascensão de líquidos em tubos pequenos. Estas são mostradas na figura 13a. A tensão superficial da interface ar-água provoca uma força de tração (representada pela seta apontada para cima) na água imediatamente abaixo desta mesma interface. No equilíbrio, a água exerce uma força igual e oposta na superfície, como indicado pela seta em negrito. Esta tração da água puxa as paredes do tubo, como também a superfície, em direção ao interior do líquido (figura 13b).

A figura 13b apresenta uma superfície capilar a partir da qual a água líquida está evaporando para o ar. O raio de curvatura r desta superfície é grande neste estágio e por esta

razão a tensão capilar é pequena. Esta tensão de tração ocorre em todo o capilar incluindo as paredes do tubo e o menisco ar-água. Com a continuação da evaporação, o raio de curvatura diminui até igualar o raio de orifício de evaporação (figura 13c). A tensão capilar aumenta como indicado pelo aumento do comprimento das seta em negrito. Nesta situação, quando o raio de curvatura do menisco se iguala ao raio do orifício, ocorre a maior tensão capilar sobre o sistema, em função de ser este o menor raio possível de ocorrer durante o processo de evaporação através deste orifício. A continuidade da evaporação resulta em um aumento do raio capilar e por esta razão uma diminuição da tensão capilar (figura 13d).

FIGURA 13 - MECANISMO DO COLAPSO



Fonte: SIAU (1971).

As figuras 13e a 13l apresentam, como supostamente ocorre, a remoção de água capilar na madeira verde. As células ilustradas na figura 13e estão, inicialmente, completamente cheias de água exceto pela presença de duas bolhas de ar de diferentes tamanhos. A evaporação ocorre somente a partir da superfície superior da madeira, a qual está

exposta ao ar. As células da madeira circundam os outros três lados da figura. A medida que a água capilar evapora a partir das células expostas há a formação de meniscos curvos na interface ar-água. A tensão capilar é pequena neste estágio de secagem devido ao tamanho relativamente grande do raio da superfície de secagem (figura 13e). Estas superfícies são progressivamente reduzidas com a continuação da evaporação e seus raios aproximam-se do tamanho do raio da maior bolha de ar.

Quando as células superficiais estão vazias, as superfícies de evaporação posicionam-se nas aberturas das pontuações (figuras 13f). À medida que o raio se torna menor, a tensão capilar no sistema celular aumenta, succionando cada vez mais as paredes celulares e os meniscos ar-água existentes de todo o sistema. O aumento da tensão causa a expansão das bolhas de ar. Uma vez que a maior bolha de ar é menos resistente, ela expande primeiro. A expansão desta bolha é acompanhada pelo esvaziamento da célula (figura 13h). A água desta célula desloca-se principalmente através da célula adjacente em direção a superfície evaporante. Desta forma, é possível que uma célula situada mais para o interior da madeira perca sua água capilar primeiro do que outra situada mais próximo da superfície. Isto pode explicar a presença de bolsas de água na madeira parcialmente seca.

Após a expansão da bolha maior até o preenchimento da célula, as curvaturas superficiais do menisco são novamente reduzidas como consequência do deslocamento do menisco para as aberturas das pontuações. Uma vez mais, a tração no sistema aumenta até que seja suficientemente grande para forçar a expansão da bolha menor. Com a expansão desta bolha (figura 13i), a água que ela desloca movimentam-se através das paredes e das pontuações das células adjacentes e evapora-se na superfície.

Com a continuação da evaporação (figura 13j), a tração na água capilar se torna cada vez maior, uma vez que não existe mais nenhuma bolha nas proximidades para aliviar a tensão em função da expansão. Esta tração em direção ao interior da célula é exercida nas paredes das mesmas. A tensão capilar máxima é determinada pelo tamanho da maior abertura existente no sistema ligado em paralelo. Geralmente a madeira é capaz de resistir a tensão capilar máxima.

A partir da figura 13j, o menisco se desloca da célula vazia para a célula cheia através da abertura da pontuação. Quando a superfície de evaporação atinge a célula cheia, o menisco expande dentro desta célula (figura 13k). Isto resulta em um aumento gradual do raio de curvatura, acompanhado por uma redução na tensão capilar. A água evapora para o espaço

ocupado pelo ar e movimenta-se para fora da superfície da madeira em forma de vapor e, desta maneira, esvaziando a célula (figura 13l). Outras células mais profundas da madeira perdem a sua água capilar de forma semelhante.

Sob certas condições, as forças podem causar colapso na madeira devido a tensão capilar. O colapso pode ocorrer nas células cheias de água (células que não possuam bolhas de ar nos seus lumens para aliviar as tensões capilares) que possuam aberturas de pontuações suficientemente pequenas (de tal forma que possibilitem o aparecimento de tensões capilares elevadas) e que possuam paredes celulares com resistência mecânica (resistência à compressão perpendicular as fibras) insuficiente para suportar as forças capilares desenvolvidas durante a secagem. Este fenômeno é mais pronunciado à altas temperaturas, uma vez que a parede da célula é bastante enfraquecida como o aumento da temperatura. Uma única célula ou um grupo de células podem sofrer colapso (figuras 13m e 13n).

A madeira que sofreu colapso pode, freqüentemente, recuperar sua forma original através da utilização de altas temperaturas e umidade, durante um determinado período de tempo, depois que ela tenha secado. Neste caso, o ar e o vapor da água exercem uma pressão no interior das células a qual reverte as forças de tração que originalmente causaram colapso.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. ESPÉCIE UTILIZADA

Foram estudadas árvores de *Eucalyptus dunnii* Maiden das procedências Urbenville e Dorrigo com 16 anos de idade. Esta espécie é originária da Austrália, sendo a procedência Urbenville -NSW encontrada a cerca de 350 metros acima do nível do mar, latitude 28°28' S e longitude 152°32' W, enquanto que a procedência Dorrigo-NSW é encontrada em região a cerca de 700 metros de altitude, latitude 30°20' S e longitude 152°42' W.

Esta espécie foi plantada na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) em Colombo-PR, em fevereiro de 1979. As coordenadas geográficas do local do experimento são 25°20' S e 49°14' W. A altitude é de 920 m e o clima, sempre úmido. A temperatura média do mês mais quente é inferior a 22°C e a do mês mais frio, superior a 10°C, ocorrendo mais de cinco geadas anuais. O solo, de baixa fertilidade, caracteriza-se como Cambissolo A proeminente. Sob o espaçamento de 3,3 m x 2,0 m, as parcelas constituíram-se de 25 plantas com bordadura simples.

Sua importância está intimamente relacionada a sua resistência à climas frios e geadas. E, portanto, uma espécie recomendada para as regiões sul e sudeste onde o clima frio manifesta-se mais pronunciadamente durante o inverno, além das características intrínsecas do gênero *Eucalyptus*.

As árvores de ambas as procedências caracterizam-se por apresentarem fustes de boa conformação, retilíneos, copas distribuídas de forma centrada, desganhamento normal e perfeita sanidade. A tabela 6 nos mostra as características gerais das árvores bem como os diâmetros maior e menor das toras empregados no presente estudo.

3.2. COLETA DO MATERIAL

A coleta do material foi realizada no Centro Nacional de Pesquisa de Florestas-EMBRAPA, localizado no município de Colombo-PR. A amostragem foi realizada de forma aleatória retirando-se doze árvores de *Eucalyptus dunnii*, sendo seis da procedência Urbenville

TABELA 6. DIMENSÕES DAS ÁRVORES E TORAS DE *EUCALYPTUS DUNNII* EMPREGADOS NO ESTUDO

PROCEDÊNCIAS	Nº DA ÁRVORE	ALTURA DAS ÁRVORES (m)				DIÂMETRO MÉDIO DAS ÁRVORES (cm)		TORETES EMPREGADOS NO ESTUDO	
		Altura total	Altura à 20 cm de Ø	Altura à 6 cm de Ø	Altura à 3 cm de Ø	DAP	BASE	MAIOR Ø	MENOR Ø
URBENVILLE	1	39.0	27.6	36.9	38.0	44.0	55.5	37.0	27.5
	2	34.4	21.5	31.0	32.3	40.0	48.5	33.0	21.8
	3	39.3	28.0	36.6	38.0	47.0	68.0	41.0	27.6
	4	36.2	23.9	33.3	34.6	44.5	61.0	37.5	25.0
	5	37.0	23.6	32.8	34.9	38.0	45.5	34.0	24.0
	6	36.9	21.6	33.3	35.2	37.0	44.0	31.5	21.5
DORRIGO	1	34.2	20.0	30.6	31.0	32.5	40.5	28.0	21.0
	2	36.0	22.0	32.5	34.0	38.0	47.0	32.5	23.0
	3	37.0	24.7	34.6	35.1	43.0	54.0	39.0	25.0
	4	32.9	26.4	30.3	31.0	41.0	50.5	35.0	26.0
	5	34.5	21.8	30.3	32.0	40.5	46.2	35.0	23.0
	6	39.6	26.8	35.3	37.8	45.3	51.5	40.0	26.0

Ø = diâmetro; DAP = Diâmetro à altura do peito

e seis da procedência Dorrigo.

O planejamento para utilização das árvores obedeceu o princípio do sortimento ou uso múltiplo onde as toras de maior diâmetro são destinadas a laminação, as toras de diâmetro entre 20-30 cm são utilizadas como madeira sólida e o restante do material com diâmetro inferior a 20 cm é utilizado para chapas de composição, papel e celulose, energia, etc. Entretanto, apesar do planejamento para utilização destas árvores ser integral, o presente estudo deteve-se somente nas toras destinadas a utilização como madeira sólida sendo as demais encaminhadas para seu uso específico. Uma síntese do planejamento de utilização das árvores é mostrada na tabela 7.

TABELA 7 - PLANEJAMENTO DE UTILIZAÇÃO DAS ÁRVORES SELECIONADAS POR PROCEDÊNCIA.

Utilização	Diâmetro das toras (cm)	Comprimento dos toras (m)	Quantidade de toras
laminação	> 30	2.1	2
madeira serrada	entre 20 e 30	2.7	3
chapas de composição, celulose e energia	< 20	variado	Restante

3.3 TRATAMENTOS PARA ALÍVIO DAS TENSÕES DE CRESCIMENTO

Estes tratamentos constituíram-se em anelamento em todas as árvores e toras e, posteriormente, em vaporização de parte das toras envolvidas no estudo.

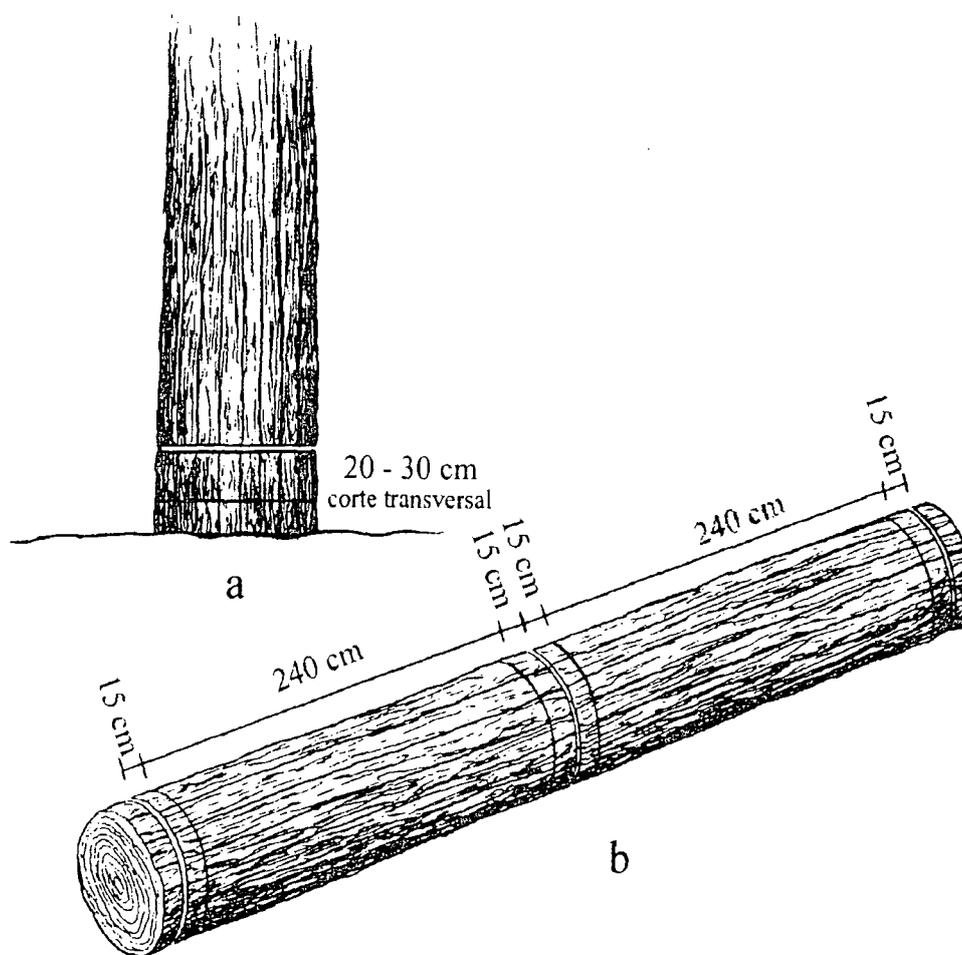
3.3.1. Anelamento

Com intuito de aliviar as tensões de crescimento realizaram-se dois níveis de anelamento seguindo as recomendações de vários autores (BARNACLE & GOTTSTEIN, 1968; GIORDANO & CURRO, 1972; KUBLER & CHEN, 1975; CONRADIE, 1980; KUBLER, 1987; ROZAS, 1992,1993). O primeiro anelamento foi realizado quando a árvore ainda encontrava-se em pé, sendo este realizado com motosserra a uma profundidade de 1/3 do

raio da árvore, deixando-se uma distância de 20 - 30 cm entre o anelamento e o corte transversal da árvore, conforme mostra a figura 14a.

O segundo foi realizado durante o dimensionamento das toras, novamente realizado com motosserra na mesma profundidade, porém neste caso deixando-se uma distância de 15 cm de cada extremo da tora, conforme mostrada na figura 14b.

FIGURA 14 - ANELAMENTO DAS ÁRVORES E TORAS COM MOTOSERRA; A) ANELAMENTO NA ÁRVORE; B) ANELAMENTO NAS TORAS.



3.3.2. Vaporização das Toras

A vaporização das toras visou, da mesma forma que o anelamento, a minimização ou mesmo a eliminação das tensões de crescimento remanescentes nas toras (WEIK et al. 1984; ROZAS, 1993).

Com base no planejamento, conforme mostrado na tabela 7, selecionaram-se duas toras por árvore e por procedência de *Eucalyptus dunnii* para serem submetidas a tratamento de vaporização, enquanto que a terceira tora foi mantida como controle. Estas toras foram então submetidas a vaporização durante um período de 20 horas nas condições de 100°C e 100% de umidade relativa. Segundo ROZAS (1993), um período de 18 horas de vaporização nestas condições é suficiente para aliviar as tensões de crescimento da madeira de *Eucalyptus grandis*.

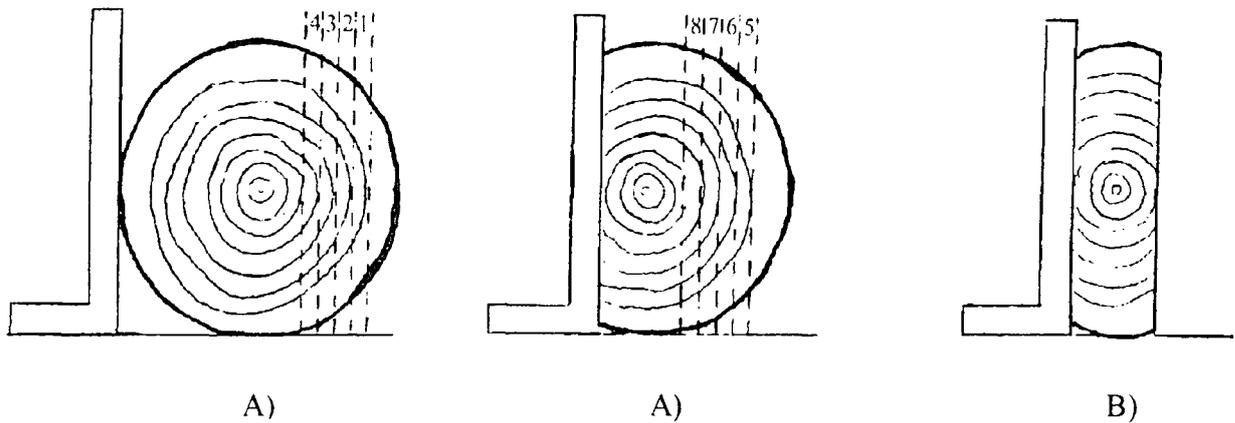
3.4. DESDOBRO DAS TORAS

Após o transporte das toras, controle advindas do campo e as toras vaporizadas da indústria Faquibras S/A, para uma serraria localizada no município de Bocaiúva do Sul-PR, estas foram destopadas com uma motosserra na linha do anelamento. Procedeu-se então o desdobro das toras em uma serra fita vertical com volante de 1,2 metros conforme mostra o diagrama da figura 15 .

Este diagrama de corte, apesar de não ser o mais indicado para o desdobro de *Eucalyptus*, permitiu a obtenção de tábuas com 2,4 m de comprimento, 26 mm de espessura e largura variável orientadas tangencial, além de uma prancha central de aproximadamente 80 mm de espessura orientada radialmente para determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira.

Após o desdobro das toras, as tábuas destinadas a secagem em estufa piloto foram envoltas em lona plástica e armazenadas até sua utilização. Enquanto que uma parte dos pranchões foi transformada em corpos de prova para os ensaios das propriedades mecânicas na condição saturada e a outra parte transformados em corpos de prova para determinação destas propriedades na condição climatizada.

FIGURA 15 - ESQUEMA UTILIZADO NO DESDOBRO DAS TORAS, A) TÁBUAS, B) PRANCHA PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA.



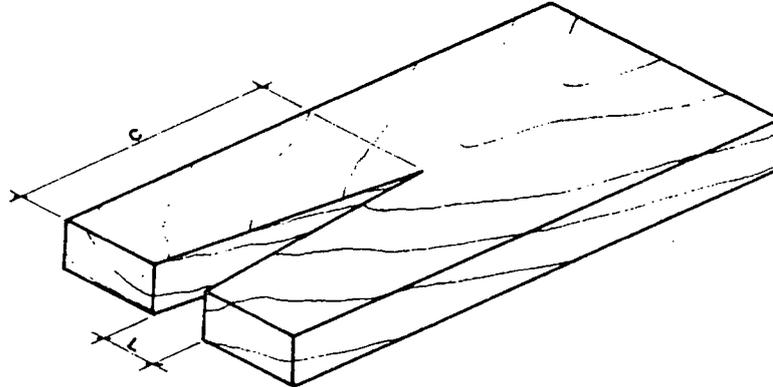
3.5. AVALIAÇÃO DAS TENSÕES DE CRESCIMENTO

Para avaliação das tensões de crescimento adotou-se a metodologia utilizada por ROZAS (1993), onde leva-se em consideração principalmente a forma como as tensões de crescimento manifestam-se durante o desdobro das toras, seja como rachaduras, variação em espessura provocada pela abertura das tábuas em relação a tora no momento do desdobro e empenamentos.

Para avaliação das rachaduras mediram-se o comprimento e a largura das rachaduras tanto na entrada como na saída da serra (dois extremos das tábuas) conforme mostra a figura 16.

A abertura da tábua em relação a tora foi tomada quando a serra fita encontrava-se a cerca de 2 metros do comprimento final da tábua, enquanto que para a avaliação da variação em espessura determinou-se a espessura das tábuas nas duas extremidades das tábuas e no centro destas. Todas as medidas foram realizadas com paquímetros de precisão.

FIGURA 16 - FORMA DE MEDIÇÃO DAS RACHADURAS APÓS O DESDOBRO E SECAGEM DAS TÁBUAS.



Fonte: ROZAS (1993).

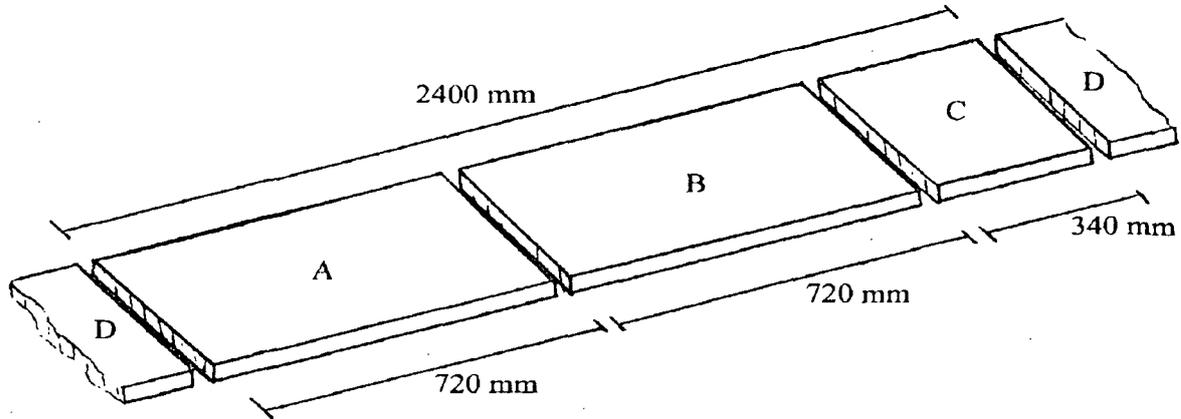
3.6. SECAGEM EM ESTUFA DE LABORATÓRIO

3.6.1. Preparo do Material

Entre as tábuas de *Eucalyptus dumii*, procedências Urbenville e Dorrigo obtidas no desdobro retiraram-se ao acaso 4 tábuas de diferentes árvores por procedência advindas de toras controle e toras vaporizadas para determinação do efeito da vaporização inicial sobre o teor de umidade inicial, volume inicial, massa específica, contração e colapso, taxa de secagem e gradiente de umidade. Estas tábuas foram então destopadas, aplainadas em ambas as faces e bitoladas nas dimensões de 25 mm x 75 mm x 2400 mm, espessura, largura e comprimento respectivamente.

Na seqüência estas tábuas foram divididas em dois grupos, sendo o primeiro composto por 8 tábuas (4 por procedência) provenientes de toras controle e o segundo composto por 8 tábuas provenientes de toras vaporizadas. Estas tábuas, dentro de cada grupo, foram então seccionadas em duas amostras testes pareadas "A" e "B" de 720 mm de comprimento e uma amostra teste "C" de 340 mm, conforme mostra a figura 17.

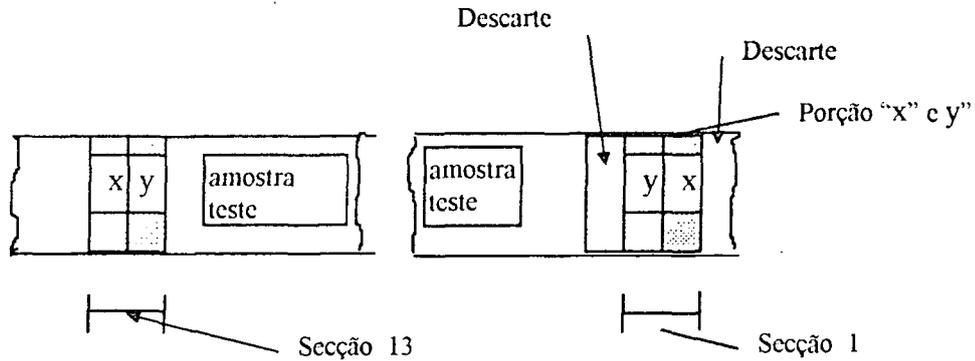
FIGURA 17 - FORMA DE OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS TESTES PARA AVALIAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE SECAGEM.



As amostras testes pareadas “A” e “B” de ambos os grupos, destinadas a determinação da taxa de secagem e gradiente de umidade, foram então marcadas com linhas em 13 seções iguais contendo cada uma as porções “x” e “y” e mais uma porção denominada descarte conforme mostra a figura 18. Esta porção “x” com largura no sentido longitudinal da amostra teste de 10 mm foi também marcada no sentido de sua espessura ou seja, tangencial aos anéis de crescimento onde foram posteriormente fatiadas em finas lâminas de 2,6 mm de espessura para avaliação do gradiente de umidade conforme mostra a figura 24, enquanto que a porção “y” das seções foram marcadas com 15 mm de largura no mesmo sentido para determinação da taxa de secagem.

As amostras “A” de ambos os grupos foram mantidas como controle e após terem seus extremos vedados, com uma resina sintética, foram embaladas em plástico até sua utilização, enquanto que as amostra “B”, após sofrerem o mesmo tratamento, foram submetidas a vaporização.

FIGURA 18 -ESQUEMA PARA OBTENÇÃO DAS SEÇÕES E SUAS RESPECTIVAS PORÇÕES "X", "Y" E "D" DAS AMOSTRA TESTES PAREADAS.



x = destinada a determinação do gradiente de umidade;
y = destinada a determinação da taxa de secagem

3.6.2. Vaporização da Madeira

Para vaporização inicial (pré-vaporização) das amostras testes "B" utilizou-se um tanque de aquecimento com cobertura no qual fixou-se um estrado gradeado a cerca de 20 cm acima da linha d'água onde empilhou-se de forma gradeada as amostras testes. O sistema de aquecimento do tanque através de serpentinas elétricas permitiu que a temperatura da água atingisse o ponto de ebulição e liberasse vapores d'água que circularam entre a madeira.

A madeira permaneceu nestas condições durante 3 horas após uma hora de aquecimento inicial conforme recomendado por CAMPBELL (1961), SIMPSON (1976), ALEXIOU et al.(1990), sendo a seguir retiradas e embaladas em plástico até sua utilização.

3.6.3. Secagem da Madeira

As amostras testes “A” e “B” provenientes das toras controle e pertencentes ao grupo I foram submetidas a secagem em estufa elétrica sem ventilação, e regulada, a uma temperatura de 50°C. Em intervalos regulares de 24 horas a estufa foi descarregada para retirada das porções “x” e “y”, começando pela seção 1 até a seção 13. Para retirada e separação destas seções empregou-se uma serra circular de 3 mm de linha de corte, sendo que logo após a retirada destas seções, as amostras tiveram seus extremos novamente vedados antes de retornarem a estufa.

O mesmo procedimento foi utilizado para secagem das amostras provenientes das toras vaporizadas pertencentes ao grupo 2.

3.6.4 Determinação da Taxa de Secagem

As porções “y” pareadas (não vaporizadas e vaporizadas) de ambos os grupos, ou seja, corpos de prova provenientes de toras controle e vaporizados (grupo I) e corpos de prova proveniente de toras vaporizadas e vaporizados (grupo II), foram pesados imediatamente após a retirada da estufa de secagem à 50°C (intervalos regulares de 24 horas) e submetidos a secagem em estufa à 103±2°C para determinação do peso seco.

Posteriormente, os teores de umidade inicial das treze porções “y” das amostras pareadas A e B dos grupos I e II foram calculados então pela equação (12):

$$U = \frac{P_i - P_o}{p_o} \times 100 \quad (12)$$

onde:

U - teor de umidade atual da madeira, %;

P_i - peso inicial da madeira, g;

Po - peso seco da madeira em estufa à $103 \pm 2^\circ\text{C}$.

Desta forma, com os teores de umidade das 13 porções “y” e com seus respectivos tempos de secagem foi possível, pela equação (13), estimar as taxas de secagem tanto das amostras não vaporizadas A como amostras vaporizadas (pré-vaporizadas) B do grupo I e amostras não vaporizadas A (vaporizadas em tora) e amostras vaporizadas (pré-vaporizadas) B do grupo II, no período correspondente à secagem.

A taxa de secagem que refere-se a porcentagem de água evaporada em um determinado intervalo de tempo, para cada amostra teste é representada pelo valor de “A” na equação (16).

$$u = b \cdot e^{-A \cdot t}$$

$$\ln \cdot u = b - A \cdot t \tag{13}$$

onde:

u – teor de umidade da madeira, %;

$\ln u$ - logaritmo neperiano do teor de umidade, %;

b - coeficiente de inclinação da reta;

A - Coeficiente angular da regressão, que representa a taxa de secagem para a abrangência dos dados;

t - tempo de secagem, horas.

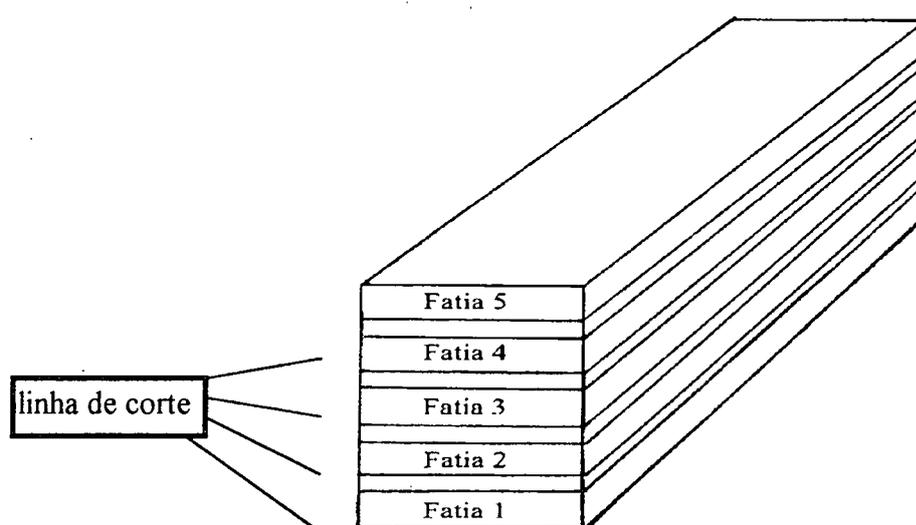
Deve-se ressaltar, contudo, que a equação (13) não é necessariamente a que melhor representa o comportamento de secagem da madeira em questão, contudo atende as necessidades do estudo, ou seja, comparar as taxas de secagem de madeira não vaporizada e vaporizada (ROSEN, 1980; SEVERO, 1989; MUÑIZ, 1993).

As taxas de secagem das porções “y” das amostras testes não vaporizadas e vaporizadas (grupo 1) e as amostras não vaporizadas e vaporizadas (grupo 2) foram comparadas através de um teste “t” pareado de médias à um nível de 95% de probabilidade utilizando-se para isso o programa estatístico denominado “STATISTICA” versão 4.2..

3.6.5. Determinação do Gradiente de Umidade

As porções “x” de todas as seções provenientes de ambos os grupos foram então desenvoltas do plástico onde estavam acondicionadas, pesadas e fatiadas em cinco partes iguais nas marcas previamente realizadas com auxílio de uma serra circular de 3 mm de linha de corte conforme mostra a figura 19.

FIGURA 19 - ESQUEMA PARA OBTENÇÃO DO GRADIENTE DE UMIDADE



Estas fatias foram pesadas e submetidas a secagem em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até peso constante. O teor de umidade de cada fatia foi calculado então pela equação (12), e a média do teor de umidade foi calculada entre fatias equidistantes do centro de cada porção “x”. Desta forma, referência 1 significa a média das fatias 1 e 5, referências 2 a média das fatias 2 e 4 e referência 3 a fatia 3. O gradiente de umidade foi calculado então entre as referências 3 e 1 e 2 e 1.

Como as porções “x” da madeira que sofreu vaporização (pré-vaporização) secou mais rapidamente que a não vaporizada, e considerando ainda que comparações entre gradientes de umidade somente podem ser feitos em um mesmo teor de umidade, foi necessário identificar porções com teores de umidade médio igual ou dentro de 1,5% de variação entre as amostras testes pareadas “A” e “B”.

O gradiente de umidade entre porções não vaporizadas e vaporizadas proveniente de toras controle e porções não vaporizadas e vaporizadas proveniente de toras vaporizadas foram comparadas através de um teste "t" de média pareado à um nível de 95% de probabilidade utilizando-se para isso o programa estatístico denominado "STATISTICA" versão 4.2.

3.6.6. Determinação do Teor de Umidade e Volume Inicial, Massa Específica, Contração Volumétrica.

Para determinação destas variáveis utilizou-se uma metodologia desenvolvida por CHAFE (1990). Para isto, as amostras "C" advindas das toras controle (grupo 1) e as amostras "C" advindas de toras vaporizadas (grupo 2), foram transformadas em corpos de provas pareados nas dimensões de 10 mm x 10 mm x 20 mm, recebendo as letras $a_1, a_2 \dots a_n$, os corpos de prova mantidos como controle em cada grupo, e as letras $b_1, b_2 \dots b_n$, os corpos de prova submetidos a vaporização inicial (pré-vaporização) em cada grupo (figura 20).

Para determinação das variáveis consideradas no estudo determinou-se inicialmente peso e o volume de todos os corpos de prova, a seguir submeteram-se os corpos de prova $b_1, b_2 \dots b_n$ dos dois grupos a vaporização durante 30 minutos, conforme descrito no item 3.6.2, sendo a seguir pesados e medidos novamente

Posteriormente estes corpos de prova foram secos em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até peso constante, pesados, medidos e recondicionados em vapor saturado por 2½ horas, pesados, medidos e submetidos à secagem em estufa novamente pesados e medidos.

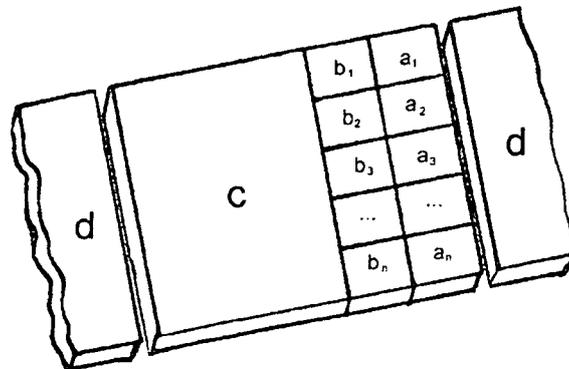
Todos volumes foram determinados através de deslocamento em mercúrio e todas as contrações foram calculadas e expressas como porcentagem do volume verde inicial.

Considerando que a contração volumétrica total antes do recondicionamento (βV_{ar}), represente a contração desde a condição verde até o volume inicial seco em estufa e que a contração volumétrica após o recondicionamento (βV_{pr}), represente a contração desde a condição verde até o volume seco em estufa após o recondicionamento, o colapso pode ser calculado então pela diferença entre βV_{ar} e βV_{pr} (CHAFE, 1990).

A massa específica básica foi calculada utilizando-se a relação massa seca em estufa ($103\pm 2^\circ\text{C}$ até peso constante) sobre volume verde, e o teor de umidade determinado pela equação (12).

As variáveis teor de umidade inicial, volume inicial, massa específica e contração volumétrica foram comparadas dentro do grupo 1, ou seja, corpos de prova não vaporizados e vaporizados e dentro do grupo 2, corpos de prova controle e pré-vaporizados através de um teste "t" pareado de médias a um nível de 95% de probabilidade utilizando-se o programa estatístico denominado "STATISTIC" version 4.2.

FIGURA 20-FORMA DE OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA UTILIZADOS NO ESTUDO DO EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NAS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE SECAGEM.



D=descarte; $a_1...a_n$ = não vaporizados; $b_1...b_n$ = vaporizados

3.7. SECAGEM EM ESTUFA PILOTO

3.7.1. Preparo das Tábuas

As tábuas destinadas a secagem em estufa piloto foram inicialmente aplainadas em ambas as faces, destopadas e bitoladas na espessura de 24 mm. Este procedimento teve como objetivo eliminar qualquer imperfeição das tábuas que pudesse dificultar a análise dos defeitos proveniente exclusivamente do processo de secagem. Posteriormente, estas tábuas

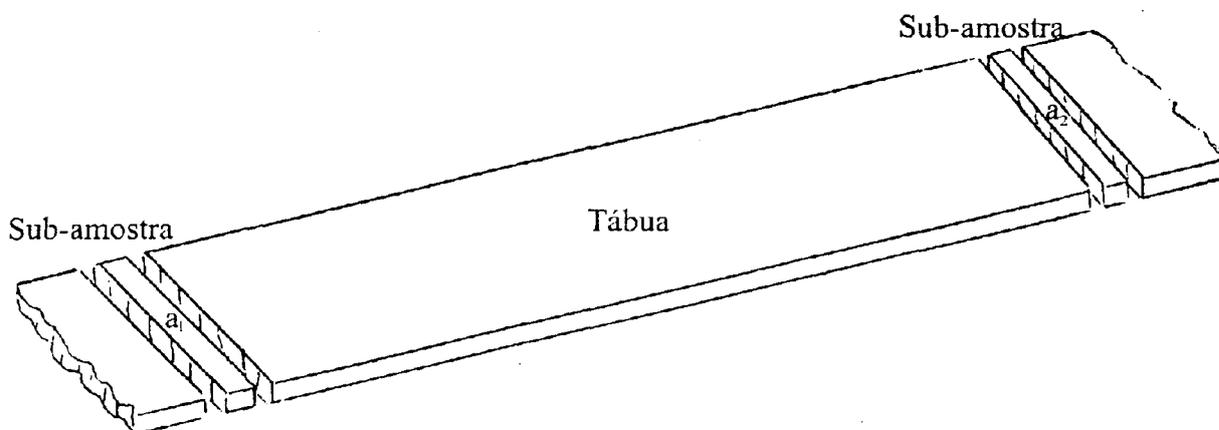
independente se da procedência Urbenville ou Dorrigo, foram agrupadas em lotes de aproximadamente 50 tábuas e embaladas até sua utilização.

3.7.2. Determinação do Teor de Umidade Inicial

Antes da secagem da madeira, determinou-se o teor de umidade inicial (Tui) da carga de madeira. Para isso foram retiradas duas sub-amostras de 2,5 cm de largura das extremidades de cada tábua conforme mostra a figura 21. Estas sub-amostras foram então imediatamente pesadas em balança de precisão de 0,01g e submetidas à secagem em estufa elétrica a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até peso constante.

Pela equação (12), obteve-se o teor de umidade inicial (Tui) de cada sub-amostra, teor de umidade médio da tábua e teor de umidade da carga de madeira. O teor de umidade inicial da carga é necessário para o cálculo do teor de umidade corrente da carga de madeira durante o processo de secagem.

FIGURA 21 - FORMA DE OBTENÇÃO DAS SUB-AMOSTRAS PARA DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE INICIAL DA CARGA DE MADEIRA PARA SECAGEM EM ESTUFA PILOTO.



3.7.3. Empilhamento da Madeira

As tábuas foram empilhadas no sentido longitudinal ao fluxo de ar da estufa sobre o carrinho transportador e espaçadas por separadores especiais de 2,5 cm x 2,5 cm x 70 cm, largura, espessura e comprimento respectivamente, os quais permitiram a livre passagem do ar através da pilha.

Sobre a carga de madeira colocou-se uma pilha falsa de madeira compostas por tábuas secas denominadas “boneco”, com a finalidade de completar a carga de madeira até o teto da estufa e obter-se assim um fluxo de ar através da pilha uniforme de aproximadamente 2 m/s. A figura 23 nos mostra as condições de empilhamento.

3.7.4. Programas de Secagem

Elaboraram-se três programas de secagem levando-se em consideração as dificuldades naturais da secagem da madeira do gênero *Eucalyptus* tais como: predisposição ao colapso e rachaduras durante a fase de retirada da água livre presente na madeira. Para isso, o primeiro programa foi elaborado utilizando as informações fornecidas pela literatura, onde vários autores recomendam iniciar o processo de secagem com temperaturas nunca superior a 40°C, assim como não ultrapassar a temperatura de 45°C até que toda água livre tenha sido evaporada da madeira (KAUMAN, 1964; BLUHN & KAUMAN, 1965; CAMPBELL & HARTHEY, 1978; HARTHEY & GOUGH, 1990).

Já nos demais programas visou-se avaliar as reais potencialidades em termos de secagem desta espécie. Para isso, no segundo programa, optou-se por iniciar a secagem com uma temperatura de 45°C e então elevá-la de forma gradual para 50°C ainda um pouco antes do Ponto de Saturação das Fibras. Da mesma forma, no terceiro programa elevou-se a temperatura inicial de secagem para 50°C.

Tendo em vista que utilizaram-se três programas de temperaturas com teor de umidade inicial crescente, optou-se também por aplicar potenciais de secagem da mesma forma crescente de 2,5; 3,5 e 4,5 respectivamente.

Nos três programas realizou-se uma vaporização inicial de 3 horas conforme recomendação de CAMPBELL (1961); KININMONTH (1971) e ALEXIOU et al. (1990) e uma vaporização intermediária de 5 horas quando a madeira encontrava-se com aproximadamente 17% de umidade (BLUHM & KAUMAN, 1965; ROZAS, 1993).

Essas vaporizações foram realizadas em vapor saturado próxima a 100°C e tiveram o objetivo de acelerar a secagem da madeira e a recuperação do colapso respectivamente (CHAFE, 1990; ALEXIOU et al., 1990; ROZAS & TOMASELLI, 1993; ROZAS, 1993). Os programas de secagem empregados encontram-se nas tabelas 8, 9 e 10.

TABELA 8- PROGRAMA DE SECAGEM 1.

Umidade da madeira (%)	Temperatura (°C)		Umidade relativa (%)	Umidade de equilíbrio (%)	Tempo (h)	Potencial de secagem
	Bulbo seco	Bulbo úmido				
vaporização inicial	100	100	100		3	
verde-50	40	37,5	85	17		2,9
50-40	43	40	84	16,2		2,8
40-30	45	41	79	14,2		2,5
30-22	50	45	74	12,6		2,1
22-17	55	44	51	7,7		2,5
recuperação do colapso	100	100	100		5	
início -15	55	44	51	7,7		2,1
15-12	60	47	47	6,9		1,7

TABELA 9 - PROGRAMA DE SECAGEM 2.

Teor de umidade (%)	Temperatura (°C)		Umidade relativa (%)	Umidade de equilíbrio (%)	Tempo (h)	Potencial de secagem
	Bulbo seco	Bulbo úmido				
vaporização inicial	100	100	100		3	
verde-50	45	41	79	14,2		3,5
50-40	45	40	73	12,8		3,5
40-30	50	42	51	8,8		3,6
30-22	55	42	44	7,0		3,7
22-17	60	43	36	5,5		3,5
recuperação do colapso	100	100	100		5	
Início -15	60	43	36	5,5		2,9
15-12	70	48	3,1	4,5		2,6

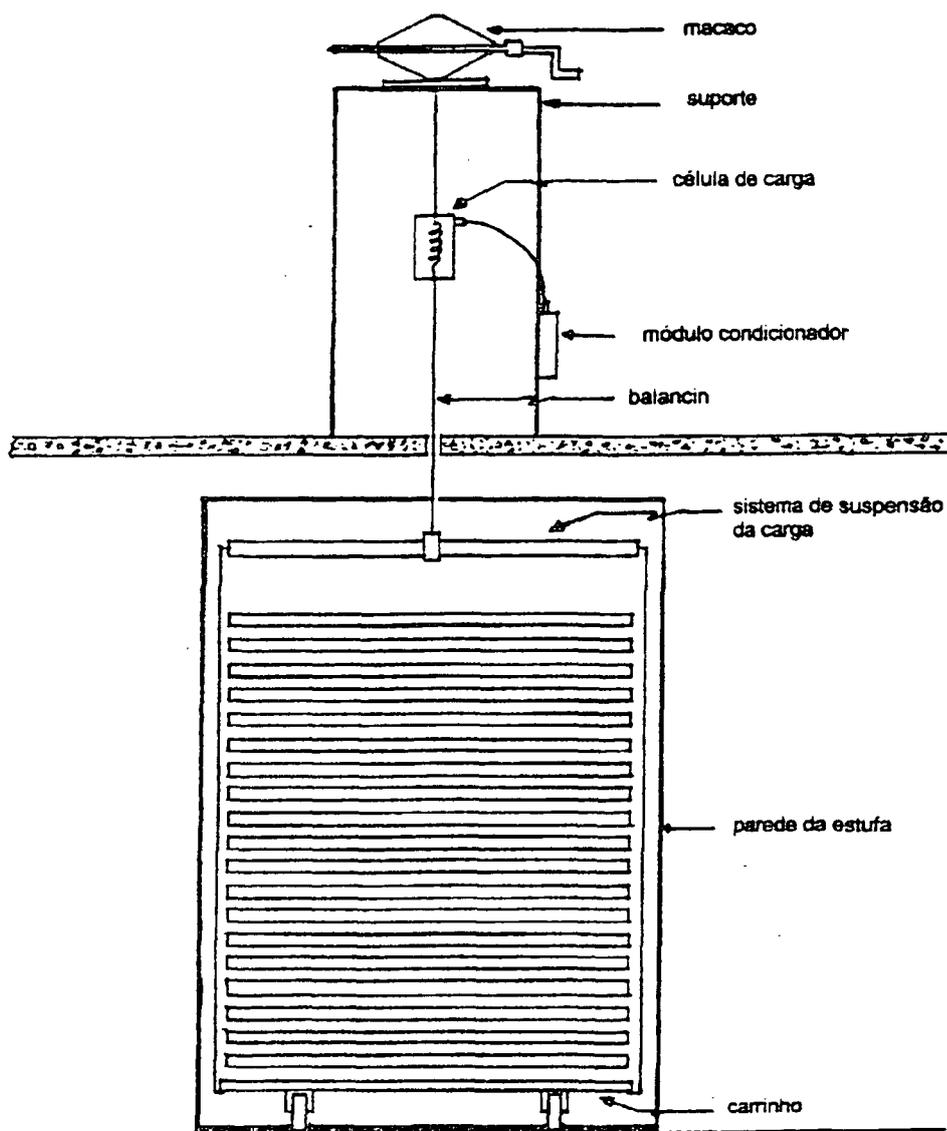
TABELA 10 - PROGRAMA DE SECAGEM 3.

Teor de umidade (%)	Temperatura (°C)		Umidade relativa (%)	Umidade de equilíbrio (%)	Tempo (h)	Potencial de secagem
	Bulbo Seco	Bulbo úmido				
vaporização inicial	100	100	100		3	
verde-50	50	44	70	11,5		4,3
50-40	55	47	62	9,6		4,7
40-30	60	48	50	7,3		4,8
30-22	65	47	37	5,3		4,9
22-17	70	46	27	4,1		4,8
recuperação do colapso	100	100	100		5	
início -15	70	46	27	4,1		4,8
15-12	80	52	25	3,4		3,5

3.7.5. Monitoramento de Teor de Umidade

O controle do teor de umidade da carga de madeira foi feito por intermédio de um sistema de balança (gravimétrico) dotado de uma célula de carga tipo tração com capacidade de 500 kgf colocado sobre a estrutura do secador de madeira, conforme mostra a figura 22.

FIGURA 22 - APARATO UTILIZADO PARA PESAGEM DA CARGA DE MADEIRA.



Fonte: SANTINI (1996).

Para perfeito funcionamento do sistema há necessidade da aferição inicial da célula de carga e posteriormente taragem da balança. Após esta operação e empilhamento da madeira no carrinho transportador, a célula de carga forneceu o peso inicial e peso corrente da carga.

Estes pesos associados ao teor de umidade inicial determinado no item 3.7.2, possibilitou que o software residente no microcomputador com auxílio da equação (14) monitorasse o teor de umidade da madeira bem como realizasse as alterações no programa de secagem conforme as faixas de umidade programadas.

$$Tuc = \frac{Pa(Tui + 100)}{Pu} - 100 \quad (14)$$

onde :

Tuc = teor de umidade corrente da carga, %;

Tui = teor de umidade inicial da carga, %;

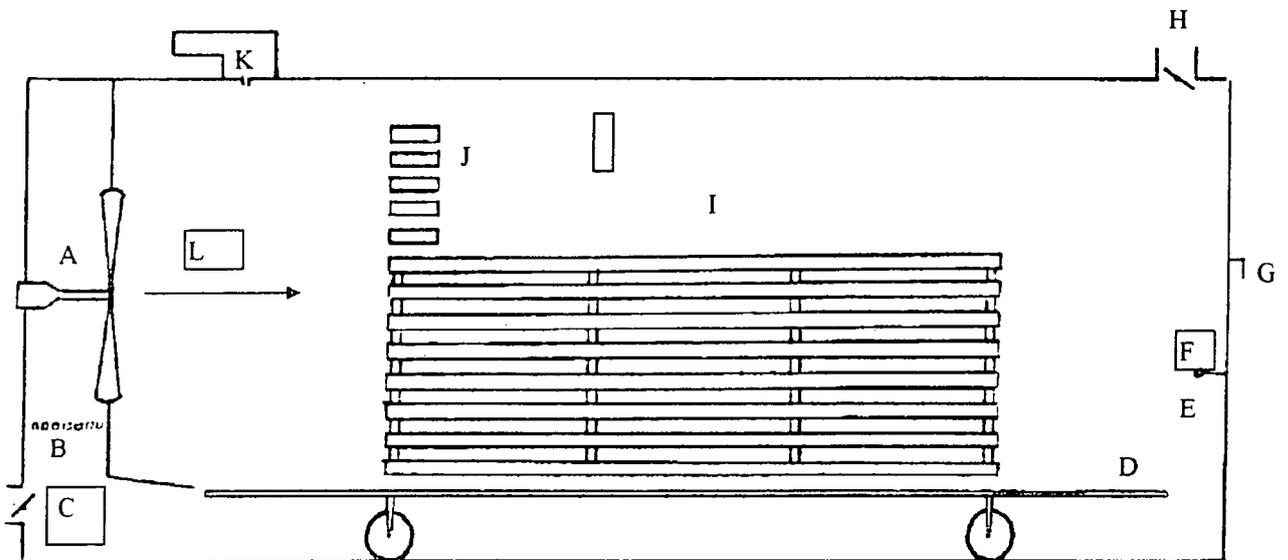
Pa = peso atual da carga de madeira, g;

Pu = peso inicial da carga de madeira, g.

3.7.6. Equipamento de Secagem e Sistema de Gerenciador

A secagem da madeira foi realizada em uma estufa piloto de secagem com as dimensões úteis de 0,8 m x 1,0 m x 4,0 m, largura, altura e comprimento respectivamente com capacidade para aproximadamente 1m³ de madeira serrada. A estufa possui um sistema de aquecimento através de serpentinas elétricas, um sistema de umidificação através de uma caldeira elétrica e um sistema de circulação de ar com capacidade de produzir um fluxo de ar de aproximadamente 1m/seg, conforme mostra a figura 23.

FIGURA 23 - ESQUEMA DA ESTUFA PILOTO SE SECAGEM UTILIZADA NO ESTUDO.

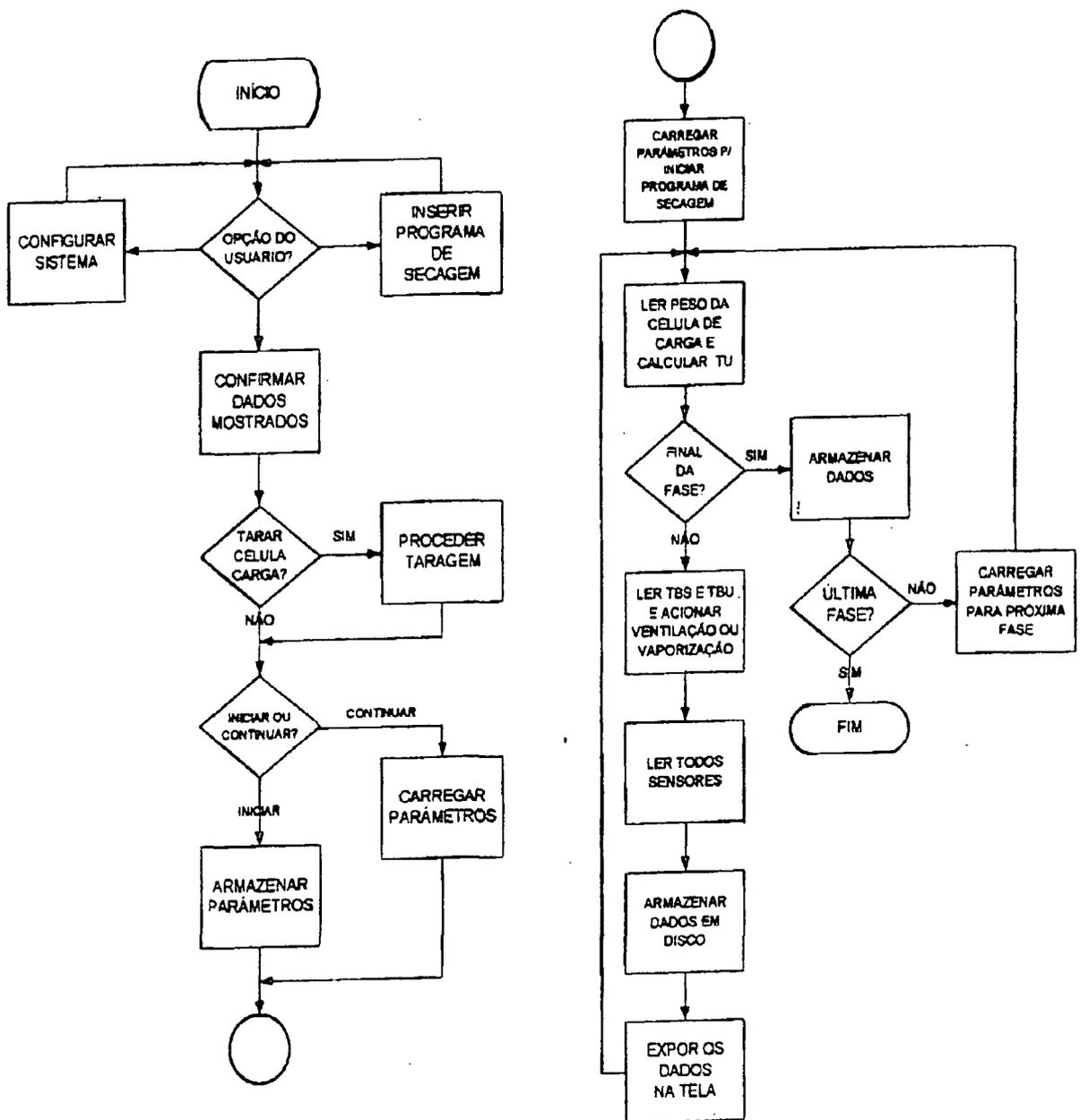


- | | |
|-------------------------------|-----------------------------|
| A - ventilador | G - porta de carga/descarga |
| B - trocador de calor | H - saída de ar |
| C - entrada de ar | I - pilha de madeira |
| D - carrinho transportador | J - pilha falsa "boneco" |
| E - termômetro de bulbo seco | K - caldeira elétrica |
| F - termômetro de bulbo úmido | L - fluxo do ar. |

A estufa possui ainda um sistema de gerenciamento do processo de secagem composto por um microcomputador 386 Dx, 40 Mhz, um software específico, unidade de controle e aquisição de dados. 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 de bulbo seco e bulbo úmido 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.

O fluxograma do software de controle é mostrado na figura 24 o qual foi adaptado de SANTINI (1996).

FIGURA 24 - FLUXOGRAMA DO SOFTWARE DE CONTROLE DO PROCESSO DE SECAGEM.



FONTE: SANTINI (1996).

3.7.7. Avaliação da Secagem

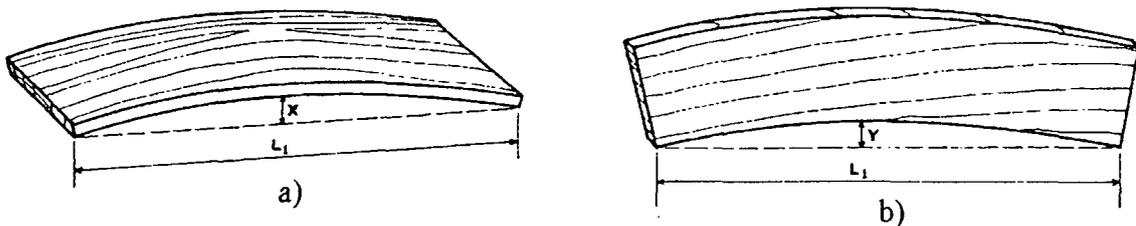
3.7.7.1. Defeitos de Secagem

A avaliação da qualidade da madeira foi realizado ao término de cada secagem através da análise dos defeitos encontrados nas tábuas. Os defeitos foram classificados em leves e fortes tomando-se como base a norma de classificação de madeira serrada de folhosa (IBDF, 1983) e classificação proposta por MENDES & SEVERO (1983). Os defeitos avaliados foram:

a) Empenamentos.

O encurvamento e arqueamento foram medidos e quantificados porcentualmente em relação ao comprimento da peça pela equação (15), conforme pode ser observado na figuras 25a e 25b.

FIGURA 25 - EMPENAMENTOS E SUA MEDIÇÃO: A) ENCURVAMENTO, B) ARQUEAMENTO.



Fonte: IBDF (1983)

$$I_{ea} = \frac{x}{L_1} \times 100 \quad (15)$$

onde

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

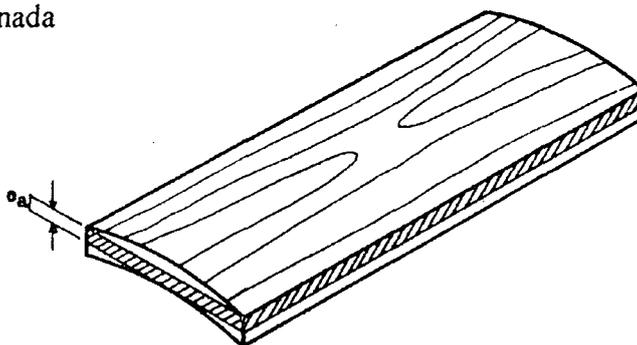
X = flecha na curvatura da peça, mm;

L_1 = comprimento da tábua, mm.

Da mesma forma, o encanoamento foi medido e quantificado em termos de diferença entre espessura nominal (e) e a espessura aplainada (ea) sendo considerado defeito leve quando esta diferença for até 4 mm e considerado como defeito forte quando esta diferença for maior que 4mm. Uma melhor visualização deste defeito e sua forma de medição pode ser observado na figura (26).

FIGURA 26. AVALIAÇÃO DO ENCANOAMENTO.

ea = espessura aplainada



Fonte: IBDF (1983)

b) Rachaduras

As rachaduras de topo foram avaliadas e quantificadas considerando-se o somatório dos comprimentos individuais da peça pela equação (16):

$$R = \frac{(l_2 + l_3 + \dots + l_n)}{L_1} \times 100 \quad (16)$$

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 feita através da remoção de alguns milímetros da superfície da tábua com uma plaina levando-se em consideração os seguintes critérios:

- Madeira livre de colapso:

Quando após a remoção de 1- 1,5 mm da superfície das tábuas não apresentarem ondulações na superfície.

- Madeira com colapso leve:

Após a remoção de 2,5 mm da superfície das tábuas não apresentarem ondulações na superfície.

- Madeira com colapso médio:

Após a remoção de 3,5 mm da superfície das tábuas não apresentarem ondulações na superfície.

- Madeira com colapso forte:

Tábuas que apresentarem ondulações na superfície após removido 3,5 mm.

3.7.7.2. Taxa de Secagem

Esta variável foi determinada da mesma forma como indicado no item 3.6.4.

3.8. PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

3.8.1 Preparo do Material

As pranchas centrais das procedências Urbenville e Dorrigo de *Eucalyptus dunnii*, provenientes das toras controle e toras vaporizadas foram transformadas em vigotas de 70 mm x 70 mm x 2400 mm, espessura, largura e comprimento respectivamente.

Posteriormente uma parte das vigotas provenientes das toras vaporizadas de ambas as procedências foram submetidas a nova vaporização durante 3 horas após uma hora de aquecimento inicial a 100°C e 100% de umidade relativa conforme mostra o item 3.6.2. Esse procedimento permitiu obter-se vigotas não vaporizadas, vaporizadas em tora e pré-vaporizadas (vaporizada em tora e pré-vaporizada).

Essa segunda vaporização (pré-vaporização) foi realizada com o intuito de avaliar as propriedades mecânicas da madeira submetida a vaporização preliminar a secagem.

3.8.2. Propriedades Mecânicas da Madeira

Para a determinação das propriedades mecânicas da madeira de *Eucalyptus dunnii*, procedência Urbenville e Dorrigo na condição saturada e climatizada transformou-se as vigotas provenientes de toras controle, toras vaporizadas e vigotas pré-vaporizadas em corpos de prova segundo as dimensões recomendadas pela norma COPANT para realização dos seguintes ensaios mecânicos:

- a) Módulo de Elasticidade (MOE) em flexão estática - COPANT 555;
- b) Módulo de Ruptura (MOR) em flexão estática - COPANT 555;
- c) Resistência Máxima ($R_{\text{máx.pa}}$) em compressão paralela as fibras - COPANT 464;
- d) Esforço no Limite Proporcional (ELP) em compressão perpendicular as fibras - COPANT - 466;
- e) Resistência Máxima no sentido tangencial ($R_{\text{máx.ct}}$) em cisalhamento - COPANT 463;
- f) Resistência Máxima no sentido radial ($R_{\text{máx.cr}}$) em cisalhamento - COPANT 463.

Uma parte dos corpos de prova proveniente das vigotas não vaporizadas, vaporizadas e pré-vaporizadas (flexão estática) destinados a determinação das propriedades mecânicas na condição saturada foram submersos em água até a completa saturação, sendo a seguir ensaiados.

Enquanto que a outra parte dos corpos de prova destinados a ensaios na condição climatizada foi armazenada em câmara climatizada na condição de 21°C e 65 % de umidade relativa, onde permaneceram até o equilíbrio higroscópico, sendo então da mesma forma ensaiados.

TABELA 11 - DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA E CONDIÇÕES DE ENSAIO.

Propriedade	Dimensão dos corpos de prova (cm)	Condição de ensaio	Velocidade de ensaio mm/min
Módulo de Elasticidade e Módulo de Ruptura em flexão estática	2,0 x 2,0 x 30	saturada climatizada	1,0
Resistência Máxima em compressão paralela as fibras	5,0 x 5,0 x 20	saturada climatizada	0,6
Esforço no Limite Proporcional em compressão perpendicular as fibras	5,0 x 5,0 x 15	saturada climatizada	0,3
Resistência Máxima no sentido tangencial e radial em cisalhamento	5,0 x 5,0 x 6,5	saturada climatizada	0,6

Para determinação das propriedades mecânicas utilizou-se uma máquina universal de ensaios marca TINIUS OLSEN com capacidade para 30.000 Kg e equipamentos acessórios tais como aparatos e suportes necessários a cada ensaio.

Uma unidade de aquisição de dados interligando a máquina de ensaio à um microcomputador propiciou a obtenção da carga até a ruptura e sua respectiva deformação, quando necessária, para as propriedades ensaiadas.

De posse dos arquivos de dados dos ensaios confeccionou-se os diagramas de carga-deformação e determinou-se o Módulo de Elasticidade (MOE), Tensão no Limite Proporcional (TLP) e o Módulo de Ruptura (MOR) em flexão estática pelas equações (17), (18) e (19) respectivamente, Resistência Máxima em compressão paralela às fibras pela equação (20), Esforço no Limite Proporcional em compressão perpendicular às fibras pela equação (21) e Resistência Máxima em cisalhamento no sentido tangencial e radial pelas equações (22) e (23) respectivamente.

$$\text{MOE} = \frac{1}{4} (P' \cdot L^3) / (d \cdot b \cdot h^3) \quad (17)$$

$$\text{TLP} = 3/2(P' \cdot L) / (b \cdot h^2) \quad (18)$$

$$\text{MOR} = 3/2 (P \cdot L) / (b \cdot h^2) \quad (19)$$

$$\text{RM} = P/S \quad (20)$$

$$\text{RLP} = P'/S \quad (21)$$

$$\text{RMC}_t = P/S \quad (22)$$

$$\text{RMC}_r = P/S \quad (23)$$

onde:

MOE = módulo de elasticidade, kgf/cm²;

TLP = tensão no limite proporcional, Kgf/cm²;

MOR = módulo de ruptura, kgf/cm²;

RM = resistência máxima em compressão paralela as fibras, kgf/cm²;

RLP = resistência no limite proporcional em compressão perpendicular as fibras, Kg/cm²;

RMC_t = resistência máxima em cisalhamento no sentido tangencial, kgf/cm²;

RMC_r = resistência máxima em cisalhamento no sentido radial, kgf/cm²;

P = carga máxima, kgf,

P' = carga no limite proporcional, kgf,

L = comprimento do vão, cm;

d = deformação correspondente à carga no limite proporcional, cm;

h = altura do corpo de prova, cm;

b = largura do corpo de prova, cm;

S = superfície do plano em que procedeu-se o cisalhamento, cm².

3.8.3. Análise Estatística

Para análise estatística das propriedades mecânicas da madeira de *Eucalyptus dunnii* levou-se em consideração a umidade, procedências, efeito do tratamento de vaporização dentro das procedências na condição saturada e o efeito do tratamento de vaporização dentro das procedências na condição climatizada.

Para obtenção desses resultados realizou-se uma análise da variância para cada propriedade mecânica considerada no estudo e posteriormente um teste de médias Tukey, conduzido a um nível de 95% de probabilidade para identificar médias que diferiram entre si.

Para realização da análise da variância para as propriedades mecânicas da madeira utilizou-se o programa estatístico denominado Statistical Analysis System (SAS) versão 6.11 fornecido pela Universidade Estadual Paulista.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. 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 estas tensões manifestam-se na madeira serrada, ou seja, abertura das tábuas em relação à tora e conseqüente variação em espessura e rachaduras. Os resultados desta avaliação encontram-se na tabela 12. Porém uma melhor visualização do efeito da vaporização das toras sobre a abertura das tábuas em relação à tora, comprimento e largura das rachaduras é mostrada nas figuras 27, 28 e 29 respectivamente.

Nestas figuras pode-se observar que a vaporização das toras proporcionou uma considerável redução em todas as variáveis utilizadas, como parâmetro de comparação do nível das tensões de crescimento durante o desdobro das toras em ambas as procedências de *Eucalyptus dunmii*. Esta redução na abertura das tábuas em relação à tora, comprimento e largura das rachaduras com a vaporização atingiram em termos médios aproximadamente 40%, 44% e 53% respectivamente.

Estas figuras evidenciam ainda uma aparente diferença no comportamento das tensões de crescimento entre a procedências Urbenville e Dorrigo na madeira não vaporizada. Esta diferença indica que procedência Dorrigo apresentou uma menor abertura das tábuas, comprimento e larguras das rachaduras que a procedência Urbenville, as quais atingiram 28%, 23% e 29% respectivamente.

O mesmo porém não é observado em madeira vaporizada. Este comportamento mostra que a vaporização da madeira proporcionou o nivelamento das procedências.

Para uma melhor comparação dos resultados realizou-se uma análise da variância de forma individual para cada variável considerada no estudo.

Esta análise foi realizada levando-se em consideração tanto o tratamento de vaporização como também as procedências utilizadas no estudo (Anexo 1).

TABELA 12 - EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NO ALÍVIO DAS TENSÕES DE CRESCIMENTO.

Procedências	Tratamentos	Abertura (mm)	Variação em espessura (mm)	Rachaduras	
				Comprimento (cm)	largura (mm)
Urbenville	Controle	37,8	2,9	111,9	31,4
	Vaporizada	19,5	2,3	57,8	15,4
Redução (%)		48,5	21	48	51,0
Dorrigo	Controle	27,4	2,5	86,7	22,2
	Vaporizada	18,5	2,4	52,8	10,2
Redução (%)		32,5	4	39	54

FIGURA 27 - EFEITO DA VAPORIZAÇÃO DAS TORAS NA ABERTURA MÉDIA DAS TÁBUAS DURANTE O DESDOBRO.

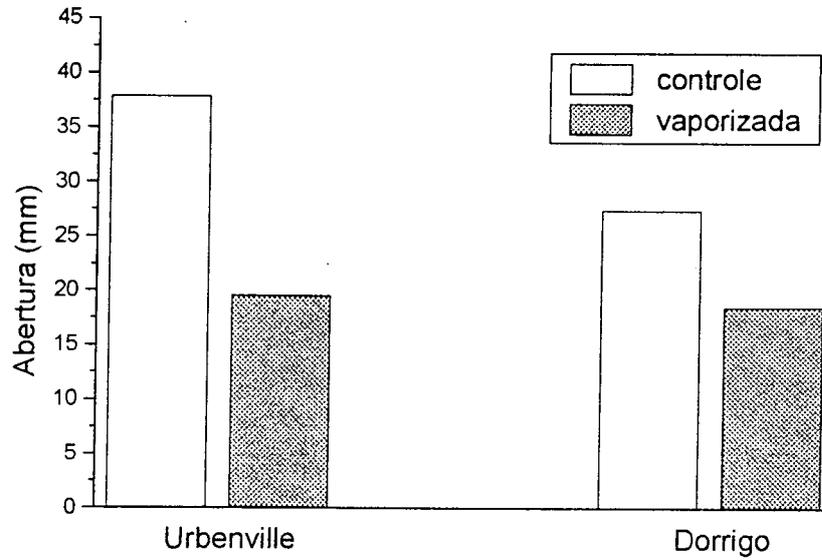


FIGURA 28 - EFEITO DA VAPORIZAÇÃO DAS TORAS NO COMPRIMENTO MÉDIO DAS RACHADURAS.

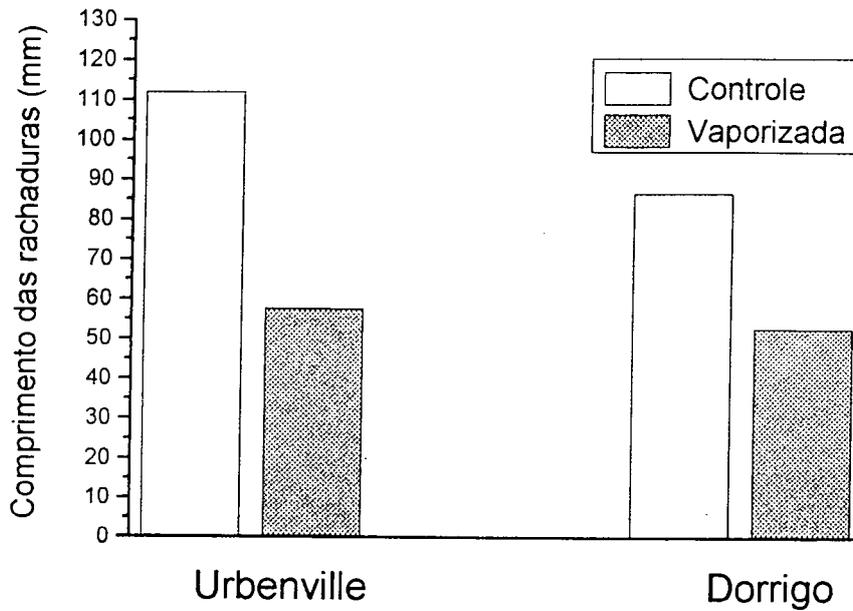
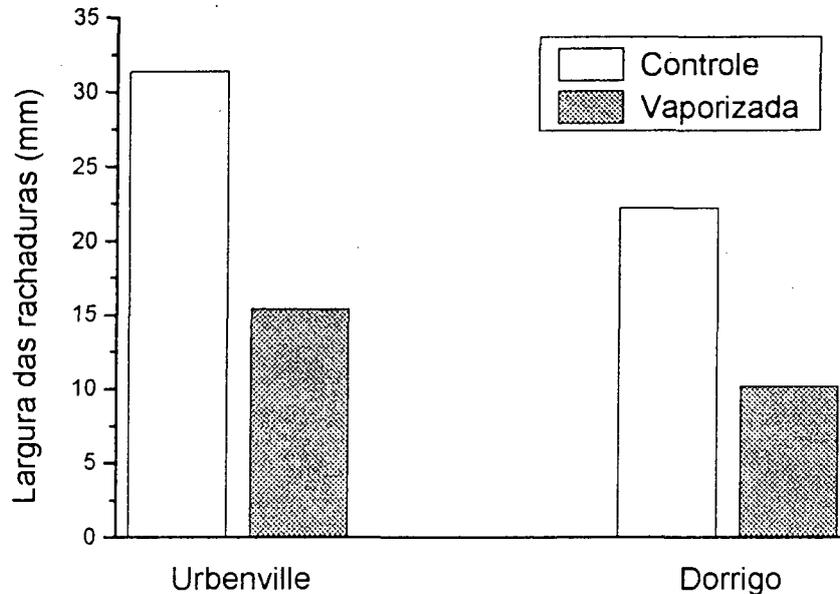


FIGURA 29 - EFEITO DA VAPORIZAÇÃO DAS TORAS NA LARGURA MÉDIA DAS RACHADURAS.



Os resultados desta análise confirmam que realmente a vaporização proporcionou uma redução significativa na aberturas das tábuas em relação a tora e no comprimento e largura das rachaduras em ambas as procedências de *Eucalyptus dunnii*.

Entretanto nesta análise, com exceção apenas da variável abertura das tábuas em relação a tora que em material sem tratamento demonstrou ser maior significativamente na procedências Urbenville do que na procedência Dorrigo, as demais variáveis não mostraram diferença significativa entre as procedências.

Redução no nível das tensões de crescimento com a aplicação de calor e umidade em toras de eucalipto são registrados por vários autores (SKOLMEN, 1967; AGUIAR, 1986; ROZAS, 1993; KIKATA, 1995).

Segundo CHAFE (1979) e KUBLER (1987), a aplicação de calor e umidade simultaneamente na madeira promove a plasticização da lignina, e com isso o alívio das tensões de crescimento. A madeira com relaxamento das tensões continua com a deformação já

admitida, mas esta deformação é transformada de elástica em plástica, e portanto tal material não tem tendência a contrair, expandir, empenar ou rachar (KUBLER, 1987).

SKOLMEN (1967) obteve reduções de cerca de 50% das tensões de crescimento em toras de *Eucalyptus saligna*, com diâmetro de 15,2-20,3 cm, após um tratamento de 24 horas em água quente.

Entretanto, estudo conduzido por ROZAS (1993), com madeira de *Eucalyptus grandis*, mostrou que a vaporização das toras por um período de 18 horas a uma temperatura de 90°C foi suficiente para eliminar por completo as rachaduras desta espécie além de reduzir consideravelmente a abertura das tábuas em relação a tora. Salienta o autor ainda que não houve diferença significativa entre o tempo de vaporização de 18 horas e 36 horas para as mesmas condições de temperatura.

Portanto, a não eliminação por completo das rachaduras na madeira de *Eucalyptus dunnii* indica a princípio que esta espécie possui um índice mais elevado de tensões de crescimento que a madeira de *Eucalyptus grandis*. Se isso for verdadeiro, tudo indica que o tempo de vaporização (20 horas) utilizado neste estudo não foi suficiente para aliviar as tensões de crescimento e portanto, há necessidade de obter-se um tempo otimizado de vaporização para esta espécie, semelhante ao desenvolvido por ROZAS (1993) para *Eucalyptus grandis*.

Segundo CHAFE (1979), a diferença de comportamento das tensões de crescimento entre espécies é normal e sugere que estas podem ser substancialmente controladas por fatores genéticos. Segundo este autor, esta variação não existe somente entre espécies mas também entre árvores de uma mesma espécie e mesmo entre toras de uma mesma árvore.

Para o autor, enquanto que as tensões de crescimento tem um embasamento teórico de origem biológica e mecânica, as causas específicas permanecem quase que completamente desconhecidas.

Esta variação de comportamento das tensões de crescimento serve portanto para explicar a diferença de comportamento entre as variáveis utilizadas para avaliar o nível das tensões de crescimento entre a procedência Urbenville e Dorrigo de *Eucalyptus dunnii* em material não vaporizado.

4.2. SECAGEM EM ESTUFA DE LABORATÓRIO

A secagem em estufa de laboratório teve como finalidade avaliar o efeito da vaporização inicial da madeira sobre o teor de umidade inicial, volume inicial, contração volumétrica, massa específica, taxa de secagem e gradiente de umidade.

Para realização deste estudo utilizaram-se corpos de prova pareados vaporizados e não vaporizados de ambas as procedências de *Eucalyptus dunnii* e provenientes de toras controles e toras vaporizadas.

4.2.1 Efeito da Vaporização no Teor de Umidade Inicial

Na tabela 13 são apresentados os valores médios obtidos para o teor de umidade inicial em corpos de prova pareados de ambas as procedências de *Eucalyptus dunnii*. No entanto, uma melhor visualização do efeito da vaporização no teor de umidade inicial em corpos de prova provenientes de toras controles pode ser observado na figura 30. De forma semelhante, este efeito da vaporização em corpos de prova provenientes de toras vaporizadas, pode ser observado na figura 31.

Nestas figuras, podemos observar que a vaporização proporcionou uma redução considerável no teor de umidade inicial. A magnitude desta redução representa cerca de 11% para madeira de *Eucalyptus dunnii* proveniente de toras controle e cerca de 16,5% para esta espécie em madeira proveniente de toras vaporizadas.

Estas reduções no teor de umidade inicial são significativas conforme mostram os resultados de um teste “t” pareado de média entre madeira não vaporizada e vaporizada, provenientes tanto de toras controle como toras vaporizadas (Anexo 2).

Resultado semelhante foi obtido por CHAFE (1990) utilizando pequenos corpos de prova de madeira de *Eucalyptus regnans*. Neste estudo, o autor observou que a vaporização inicial proporcionou uma redução de 14% no teor de umidade inicial da madeira.

Da mesma forma CAMPBELL (1961), em estudo com várias espécies, observou que a vaporização por um tempo de 3 horas proporcionou reduções no teor de umidade inicial que variaram deste 5% até 20%.

TABELA 13- O TEOR DE UMIDADE INICIAL EM CORPOS DE PROVA VAPORIZADOS E NÃO VAPORIZADOS.

TEOR DE UMIDADE INICIAL																
TORAS CONTROLE								TORAS VAPORIZADAS								
Procedências	Corpos de prova não vaporizados			Corpos de prova Vaporizados				Redução no teor de umidade	Corpos de prova não vaporizados			Corpos de prova vaporizados				Redução no teor de umidade
	S	\bar{X}	n	S	\bar{X}	n	*		%	S	\bar{X}	n	S	\bar{X}	n	
Urbenville	9,3	83,8	18	8,8	73,6	18	*	12,2	13,5	100,6	15	11,8	83,0	15	*	17,5
Dorrigo	15,0	86,3	21	15,6	78,1	21	*	9,5	23,5	94,2	10	21,8	80,3	10	*	14,8
Total	12,6	85,2	39	12,9	76,1	39	*	11,0	18,0	98,0	25	16,2	81,9	25	*	16,5

*- significativo a um nível de 95% de probabilidade;

ns -não significativo

S - desvio padrão,

\bar{X} - média,

n - número de repetições.

FIGURA 30 - EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NO TEOR DE UMIDADE INICIAL DE MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS CONTROLE.

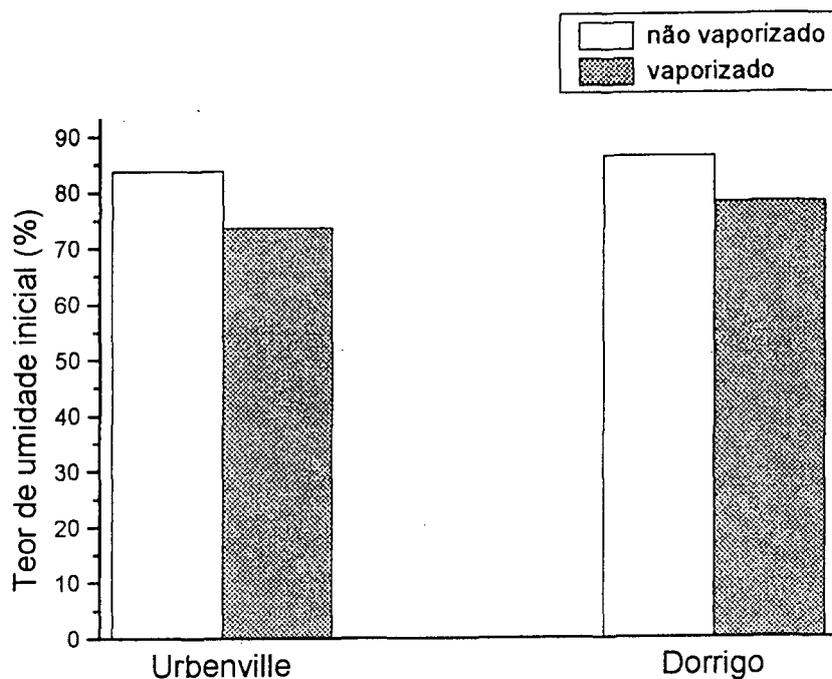
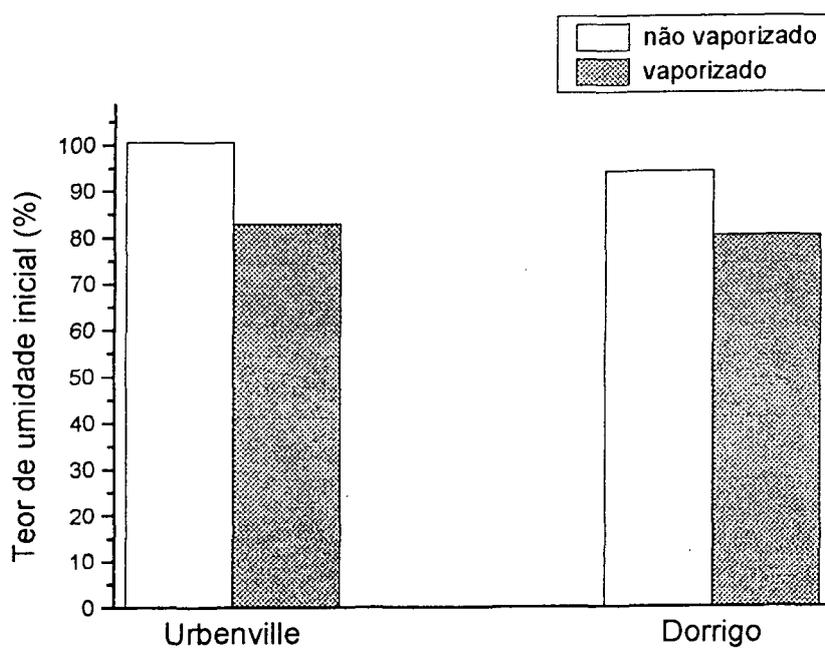


FIGURA 31 - EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NO TEOR DE UMIDADE INICIAL DE MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS VAPORIZADAS.



CAMPBELL (1961), em outro experimento, estudou o efeito de períodos de vaporização inicial de 6, 12, 18 e 24 horas na madeira de *Eucalyptus regnans* com espessura de 25 mm. Neste estudo, o autor observou que a redução no teor de umidade inicial variou de 10-12% independentemente do tempo de vaporização utilizado.

FALCK & LUTZ (1929), citado por CAMPBELL (1961), evidenciaram em seu estudo que o máximo de perda de umidade em decorrência da vaporização, cerca de 10%, ocorre dentro das primeiras 3 a 4 horas do tratamento, a partir da onde este tratamento deixa de ser importante.

De acordo com KOLLMANN & CÔTÉ (1968) e HILDEBRAND (1970), a redução do teor de umidade deve-se ao processo de secagem que ocorre na madeira, mesmo em ambientes saturados de umidade, quando a madeira é submetida à vaporização a pressão atmosférica.

Segundo ELLWOOD & ERICKSON (1962), a perda de umidade da madeira ocorre em três fases distintas:

- a) Pela elevação da temperatura durante o período de aquecimento,
- b) Quando a madeira atinge o ponto de ebulição da água em função da expansão das bolhas de ar e,
- c) Durante o período de resfriamento da madeira à temperatura normal de secagem.

4.2.2 Efeito da Vaporização no Volume Inicial

Na tabela 14 são apresentados os resultados obtidos para o volume inicial em corpos de prova pareados de ambas as procedências de *Eucalyptus dunnii*

No entanto, uma melhor visualização do efeito da vaporização no volume inicial em corpos de prova proveniente de toras controles pode ser observado na figura 32. De forma semelhante este efeito da vaporização em corpos de prova proveniente de toras vaporizadas pode ser observado na figura 33.

TABELA 14 - VOLUME INICIAL DE CORPOS DE PROVA VAPORIZADOS E NÃO VAPORIZADOS..

VOLUME INICIAL																
TORAS CONTROLE									TORAS VAPORIZADAS							
Procedências	Corpos de prova não vaporizados			Corpos de prova vaporizados				Redução no teor de umidade	Corpos de prova não vaporizados			Corpos de prova Vaporizados			Redução no teor de umidade	
	S	\bar{X}	n	S	\bar{X}	n		%	S	\bar{X}	n	S	\bar{X}	N		%
Urbenville	0,03	2,239	17	0,04	2,233	17	ns	0,2	0,06	2,195	15	0,04	2,186	15	ns	0,2
Dorrigo	0,05	2,223	21	0,04	2,216	21	ns	0,3	0,06	2,208	10	0,06	2,19	10	ns	0,8
Total	0,04	2,23	38	0,04	2,224	38	ns	0,25	0,06	2,20	25	0,05	2,187	25	*	0,6

*- significativo a um nível de 95% de probabilidade;

ns - não significativo

S - desvio padrão,

\bar{X} - média,

n - número de repetições.

FIGURA 32-EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NO VOLUME INICIAL DE MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS CONTROLE.

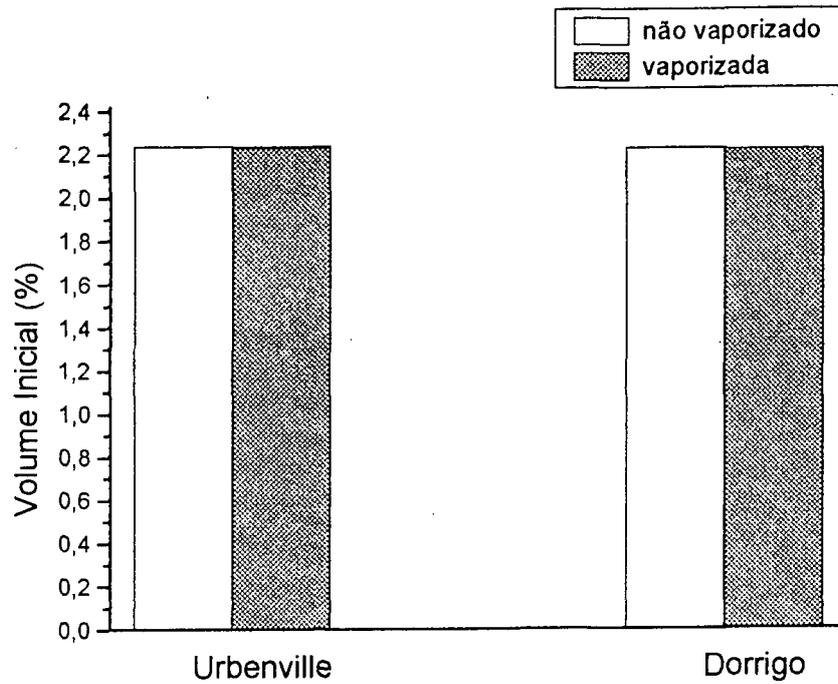
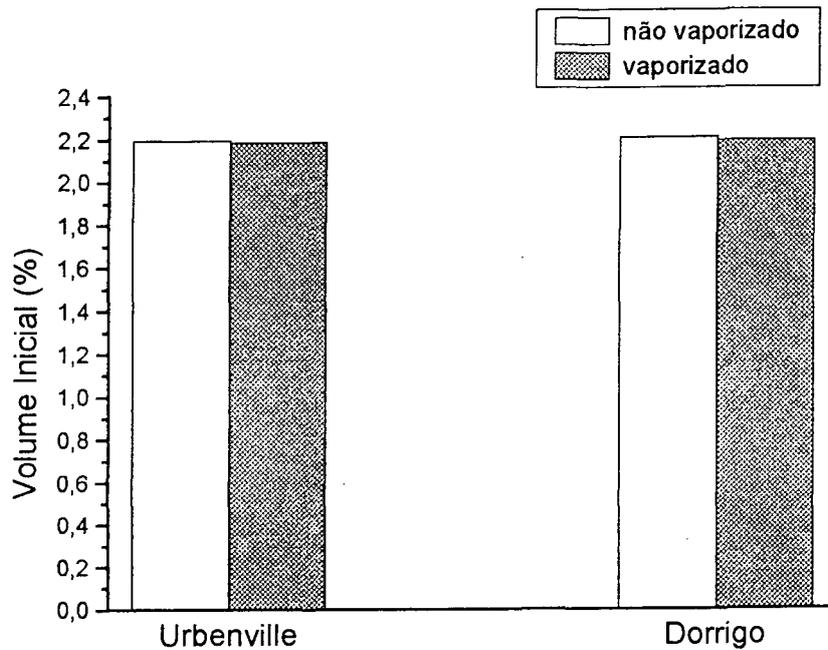


FIGURA 33 - EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NO VOLUME INICIAL DE MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS VAPORIZADAS.



Como pode ser observado nestas figuras, o volume inicial apresenta uma pequena tendência de decréscimo com a vaporização em ambas as procedências de *Eucalyptus dunnii*.

Apesar de muito pequena, uma vez que não atingiu 1%, esta redução foi observada em ambas as procedências desta espécie tanto em corpos de prova provenientes de toras controle (figura 32), como proveniente de toras vaporizadas (figura 33).

Para uma melhor comparação dos resultados, realizou-se um teste “t” pareado de médias entre corpos de prova vaporizados e não vaporizados. Esta análise foi realizada tanto para madeira proveniente de toras controle como para madeira proveniente de toras vaporizadas.

Os resultados desta análise não indicam diferença significativa entre madeira vaporizada e não vaporizada quando considera-se as procedências Urbenville e Dorrego de forma isolada. Entretanto, ao considerar-se ambas as procedências como um conjunto único de dados, a vaporização mostrou reduzir significativamente o volume inicial dos corpos de prova proveniente de toras vaporizadas (Anexo 2).

Resultado semelhante foi obtido por CHAFE (1990) trabalhando com madeira de *Eucalyptus regnans*. Porém neste estudo, o autor observou que a vaporização proporcionou uma pequena redução no volume inicial dos corpos de prova de alburno e um pequeno aumento em corpos de prova de cerne.

Este comportamento do volume inicial com a vaporização é explicado pelo autor da seguinte forma:

Em madeiras permeáveis, como o alburno de certas espécies, a temperatura de vaporização faz com que a água, impulsionada pela expansão das bolhas de água, seja expelida para fora das células, iniciando-se assim um processo de secagem com conseqüente contração da madeira.

Já em madeiras impermeáveis, como o cerne de certas espécies, é esperado justamente o contrário, ou seja, um aumento no volume das células. Este aumento seria provocado pela dificuldade de expansão das bolhas de ar presente nas células em decorrência da presença de extrativos e ajudado pela plasticização das células.

Entretanto como no presente estudo utilizou-se madeira proveniente de árvores jovens de *Eucalyptus dunnii* (16 anos), acredita-se que a maior parte dos corpos de prova utilizados no estudo foram de madeira de alburno justificando, portanto, a leve tendência de redução do volume inicial.

Embora esta explicação fornecida por CHAFE (1990) seja plenamente viável, existe também a possibilidade de que esta pequena redução no volume seja na realidade decorrente da liberação das tensões de crescimento residuais. Neste caso, a presença de tensões residuais de compressão causaria um aumento no volume inicial durante sua liberação, enquanto que tensões residuais de tração provocaria a redução do volume.

4.2.3. Efeito da Vaporização na Contração Volumétrica

Nas tabelas 15 e 16, são apresentados os resultados da contração volumétrica total antes e após o acondicionamento e colapso recuperável em corpos de provas pareados de ambas as procedências de *Eucalyptus dumii*. No entanto, uma melhor visualização do efeito da vaporização na contração volumétrica antes e após o acondicionamento em corpos de prova provenientes de toras controle é mostrado na figura 34. De forma semelhante, a figura 35 mostra o efeito da vaporização na contração volumétrica antes e após o acondicionamento em corpos de prova provenientes de toras vaporizadas.

Nestas figuras, pode-se observar que a contração volumétrica antes do acondicionamento é maior em corpos de prova vaporizados do que em corpos de prova não vaporizados de ambas as procedências de *Eucalyptus dumii* utilizadas. Este comportamento indica que a vaporização provocou uma contração adicional de 5,3% em corpos de prova provenientes de toras controle, e uma contração de 3,2 % em corpos de prova provenientes de toras vaporizadas; quando considera-se ambas as procedências como um conjunto único de dados

Entretanto, após o acondicionamento a contração volumétrica total entre corpos de prova vaporizados e não vaporizados são praticamente iguais. Este comportamento evidencia a princípio, que a contração adicional observada antes do acondicionamento pode ser devida à presença de colapso na madeira.

Para uma melhor comparação dos resultados obtidos neste estudo realizou-se um teste “t” pareado de médias entre corpos de prova vaporizados e não vaporizados de madeira das procedências Urbenville e Dorrigo de *Eucalyptus dumii* (Anexo 2).

TABELA 15-CONTRAÇÃO VOLUMÉTRICA TOTAL ANTES E APÓS O RECONDICIONAMENTO E COLAPSO RECUPERÁVEL EM MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS CONTROLE.

Propriedades Físicas	URBENVILLE								DORRIGO								TOTAL							
	Corpos de prova não vaporizados			corpos de prova vaporizados			aumento (redução) teor de umidade	%	corpos de prova não vaporizados			corpos de prova vaporizados			aumento (redução) teor de umidade	%	corpos de prova não vaporizados			corpos de prova vaporizados			aumento (redução) teor de umidade	%
	S	\bar{X}	n	S	\bar{X}	n			S	\bar{X}	n	S	\bar{X}	n			S	\bar{X}	n	S	\bar{X}	n		
CVT (%)	2,3	23,4	17	3,3	25,3	17	*	8,1	1,6	24,7	17	2,2	25,3	17	*	2,5	2,1	24,0	34	2,7	25,3	34	*	5,3
CVTrec (%)	3,3	22,2	17	2,7	22,1	17	ns	0	1,4	22,8	17	2,5	22,2	17	ns	(2,5)	2,5	22,5	34	2,6	22,0	34	ns	(1,3)
C (%)	1,3	1,17	17	3,7	3,26	17	*	178	1,8	1,86	17	2,9	3,18	17	*	71	1,6	1,52	34	3,3	3,22	34	*	125,0

* - significativo a 95% de probabilidade, ns - não significativo

S - desvio padrão; \bar{X} - média; n - número de repetições,

CVT- contração volumétrica total desde a condição verde até volume seco em estufa antes do recondicionamento;

CVTrec.- contração total desde a condição verde até o volume seco em estufa após o recondicionamento;

C -- Colapso recuperável.

TABELA 16. CONTRAÇÃO VOLUMÉTRICA TOTAL ANTES E APÓS O RECONDICIONAMENTO E COLAPSO RECUPERÁVEL EM MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS VAPORIZADAS.

Propriedades Físicas	URBENVILLE								DORRIGO								TOTAL							
	corpos de prova não vaporizados			corpos de prova vaporizados			Aumento (redução) teor de umidade		corpos de prova não vaporizados			corpos de prova vaporizados			aumento (redução) teor de umidade		corpos de prova não vaporizados			corpos de prova vaporizados			aumento (redução) teor de umidade	
	S	\bar{X}	n	S	\bar{X}	n	*	%	S	\bar{X}	N	S	\bar{X}	n	ns	%	S	\bar{X}	n	S	\bar{X}	n	ns	%
CVT (%)	1,5	23,5	12	1,6	24,7	12	*	5,1	1,9	24,4	10	1,3	24,7	10	ns	1,2	1,7	23,9	22	1,4	24,7	22	ns	3,2
CVTrec (%)	1,5	20,8	12	1,5	20,6	12	ns	0	3,8	20,5	10	3,9	19,7	10	ns	(3,9)	2,8	20,7	22	2,8	20,2	22	ns	(2,0)
C (%)	1,2	2,71	12	1,5	4,05	12	*	50,0	2,8	3,89	10	3,8	4,94	10	ns	27,0	2,2	3,2	22	2,8	4,5	22	*	40,0

* - significativo a 95% de probabilidade, ns - não significativo

S - desvio padrão; \bar{X} -média; n - número de repetições,

CVT - contração volumétrica total desde a condição verde até volume seco em estufa antes do recondicionamento;

CVTrec.- contração total desde a condição verde até o volume seco em estufa após o recondicionamento;

C -- Colapso recuperável.

FIGURA 34-EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NA CONTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS CONTROLE.

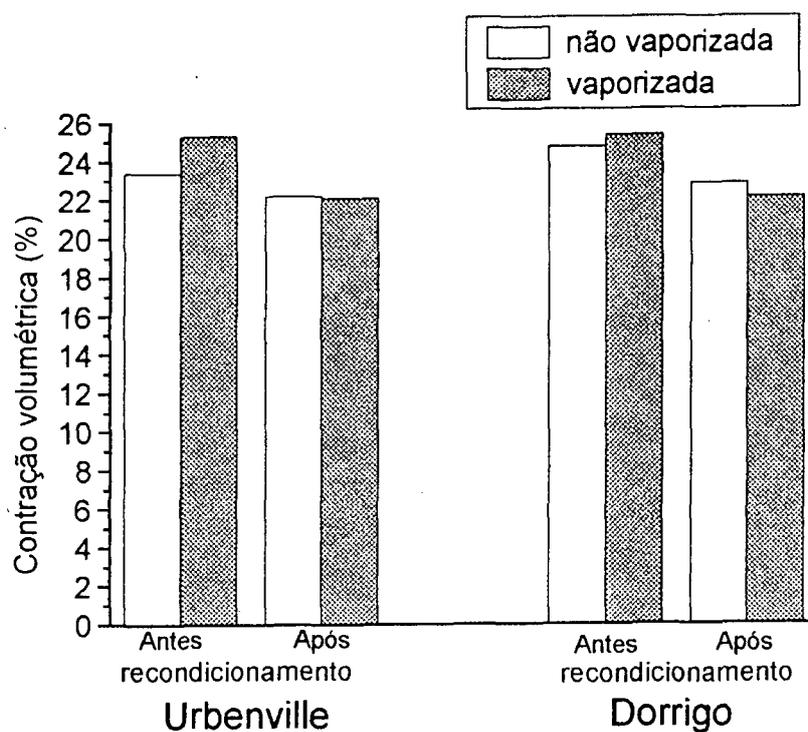
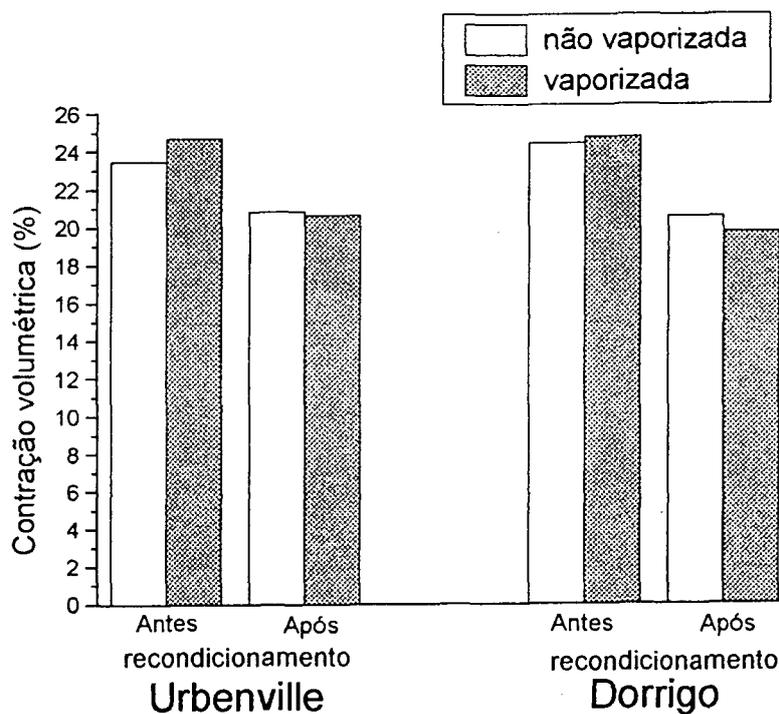


FIGURA 35 - EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NA CONTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS VAPORIZADAS.



O resultado desta análise confirma que realmente a contração volumétrica total antes do acondicionamento é significativamente maior em madeira vaporizada do que em madeira não vaporizada, para ambas as procedências de *Eucalyptus dumii* proveniente tanto de toras controle como toras vaporizada.

Da mesma forma que esta análise não detectou diferença significativa para contração volumétrica após o acondicionamento entre corpos de prova vaporizados e não vaporizados destas procedências em madeira proveniente tanto de toras controle como toras vaporizadas.

Resultado semelhante foi observado por CHAFE (1990) em estudo com madeira de *Eucalyptus regnans*. Neste estudo, o autor observou que a vaporização 2,5 horas proporcionou um aumento significativo na contração dos corpos de prova antes do acondicionamento de aproximadamente 5%. Entretanto, após o acondicionamento, o autor não observou diferença significativa entre corpos de prova vaporizados e não vaporizados.

CAMPBELL (1961), em estudo com a mesma espécie, comenta que uma vaporização de 6 horas proporcionou um aumento na contração volumétrica total antes do acondicionamento de aproximadamente 7% para madeira seca ao ar livre, enquanto que para madeira seca em estufa este aumento foi de aproximadamente 15%. Neste estudo, o autor observou ainda que a contração volumétrica total após o acondicionamento em corpos de prova vaporizados somente é significativo após uma vaporização de 12 horas.

Para KAUMAN (1961) e KUBINSKY (1971) a vaporização da madeira provoca mudanças nas ligações químicas entre os constituintes da parede celular ou mesmo sua degradação, o que torna as células mais susceptíveis a colapsarem quando submetidas à secagem.

Pode-se dizer, portanto, que a contração “adicional” observada na contração volumétrica total antes do acondicionamento, em corpos de prova vaporizados de ambas as procedências de *Eucalyptus dumii*, é atribuída a um aumento na intensidade do colapso (KAUMAN, 1961, CAMPBELL, 1961; CHAFE, 1990).

Já o comportamento da contração volumétrica após o acondicionamento indica que o tratamento de recuperação do colapso foi eficiente. A recuperação do colapso deve-se ao efeito simultâneo exercido pela alta temperatura e umidade relativa durante o acondicionamento (PRATT, 1986).

Este tratamento provoca a plasticização das paredes celulares da madeira tornando-as mais maleáveis para restauração de sua forma original (KOLLMANN & CÔTÉ, 1968; SIAU,

1971; SIMPSON, 1991).

Portanto, se considerarmos que o tratamento de vaporização para recuperação do colapso foi eficiente, e realmente permitiu a recuperação do colapso tanto em corpos de prova vaporizados como não vaporizados como demonstrado anteriormente, pode-se dizer então que a diferença entre a contração volumétrica total antes e após o acondicionamento permite a obtenção do colapso recuperável.

A figura 36 mostra o comportamento do colapso recuperável em corpos de prova pareados vaporizados e não vaporizados obtidos a partir de toras controle, enquanto que a figura 37 apresenta este mesmo comportamento para madeira proveniente de toras vaporizadas.

FIGURA 36-EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NO COLAPSO RECUPERÁVEL DE MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS CONTROLE.

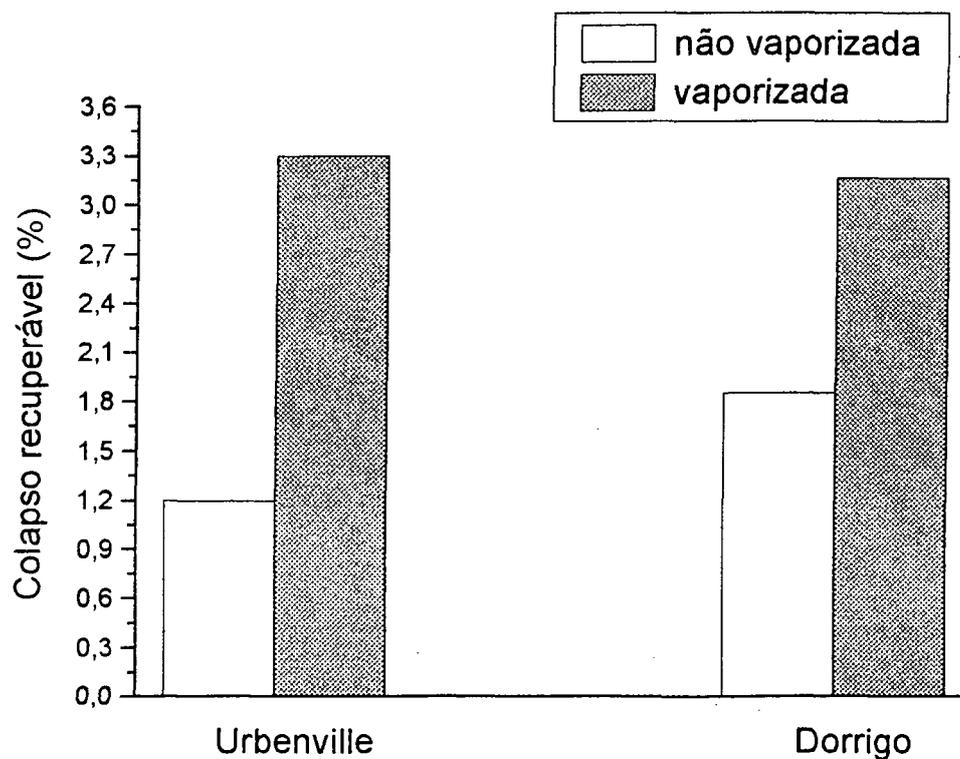
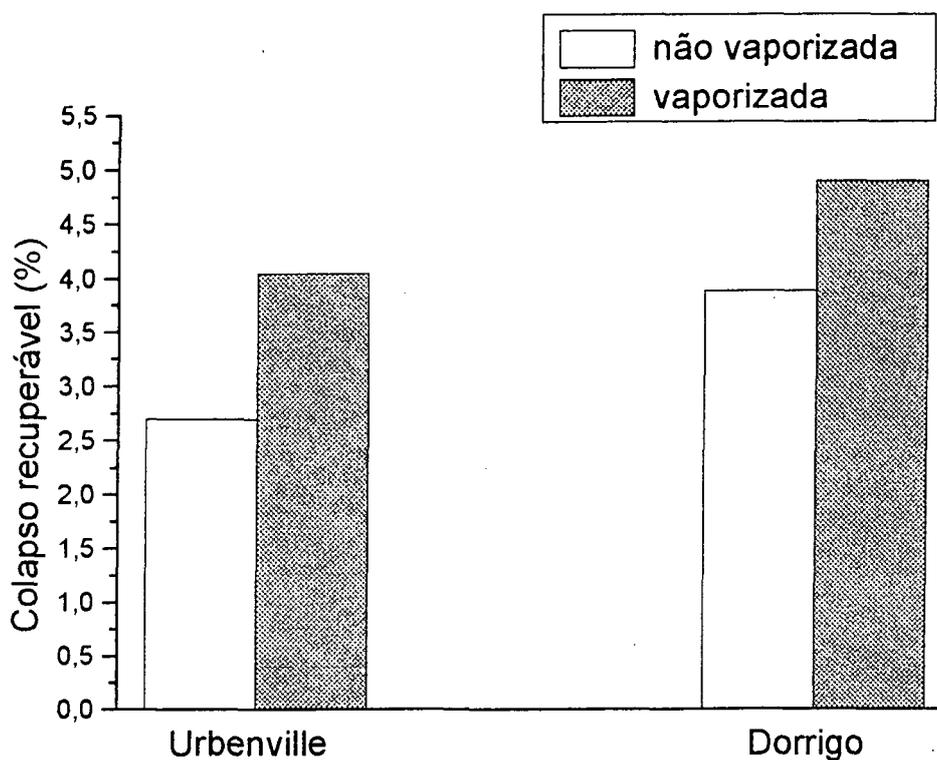


FIGURA 37-EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NO COLAPSO RECUPERÁVEL DE MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS VAPORIZADAS.



Conforme pode ser observado nestas figuras o colapso recuperável é consideravelmente maior em corpos de prova vaporizados do em corpos de prova não vaporizados. Quando considera-se ambas as procedências como um conjunto único de dados, este aumento representa cerca de 125% em madeira proveniente de toras controle e cerca de 40% em madeira provenientes de toras vaporizadas.

Para uma melhor comparação dos resultados obtidos realizou-se um teste “t” pareado de médias entre corpos de prova vaporizados e não vaporizados das procedências Urbenville e Dorrigo de *Eucalyptus dunnii* (Anexo 2).

Os resultados desta análise estatística confirmam os resultados anteriormente obtidos mostrando que a vaporização aumenta significativamente a intensidade do colapso recuperável.

Outro indicativo de que a vaporização da madeira aumenta a intensidade do colapso, pode ser observado ao analisar-se as figuras 36 e 37. Neste caso, a madeira não vaporizada

(figura 37) proveniente de toras vaporizadas apresentou um colapso mais elevado do que o colapso em madeira não vaporizada proveniente de toras controles, indicando, neste caso, que mesmo a vaporização de 20 horas nas toras propiciou um aumento do colapso na madeira.

Resultados obtidos por vários autores mostram que, se por um lado a vaporização inicial aumenta a intensidade do colapso, por outro lado este colapso mostrou ser totalmente recuperável após o acondicionamento da madeira (CAMPBELL, 1961; KAUMAN, 1961; CHAFE, 1990).

GRENHILL (1938), citado por CAMPBELL (1961), evidenciou que a madeira de eucaliptos vaporizada por 24 horas, e posteriormente seca ao ar livre, apresentou cerca de 3 vezes mais colapso do que madeira não vaporizada. Estudos conduzidos por KAUMAN (1961) e CHAFE (1990) da mesma forma mostram comportamento semelhante.

4.2.4. Efeito da Vaporização na Massa Específica

A tabela 17 apresenta os valores médios da massa específica em corpos de prova pareados de ambas as procedências de *Eucalyptus dunnii*. No entanto, uma melhor visualização do efeito da vaporização na massa específica em corpos de prova proveniente de toras controles é mostrado na figura 38. De forma semelhante o efeito da vaporização em corpos de prova proveniente de toras vaporizadas pode ser observado na figura 39.

Nestas figuras, pode-se observar que a massa específica praticamente não altera-se com a vaporização inicial. Em termos percentuais a vaporização proporcionou um aumento médio na massa específica da madeira de *Eucalyptus dunnii* de 0,4% em corpos de prova proveniente de toras controle e 3,3% em corpos de prova provenientes de toras vaporizadas desta espécie.

Para uma melhor comparação dos resultados realizou-se um teste “t” pareado de médias entre corpos de prova vaporizados e não vaporizados proveniente de toras controle e toras vaporizadas (Anexo 2).

TABELA 17-MASSA ESPECÍFICA BÁSICA EM CORPOS DE PROVA VAPORIZADOS E NÃO VAPORIZADOS.

MASSA ESPECÍFICA BÁSICA																
TORAS CONTROLE									TORAS VAPORIZADAS							
Procedências	Corpos de prova não vaporizados			Corpos de prova vaporizados				Aumento no teor de umidade	Corpos de prova não vaporizados			Corpos de prova Vaporizados				Aumento no teor de umidade
	S	\bar{X}	n	S	\bar{X}	n			S	\bar{X}	n	S	\bar{X}	n		
Urbenville	0,02	0,568	17	0,026	0,571	17	ns	0,5	0,03	0,516	12	0,04	0,532	12	ns	3
Dorrigo	0,03	0,579	17	0,03	0,580	17	ns	0,2	0,07	0,544	10	0,08	0,563	10	ns	3,5
Total	0,03	0,573	34	0,03	0,577	34	ns	0,7	0,05	0,529	22	0,06	0,546	22	*	3

* - significativo a um nível de 95% de probabilidade,

ns - não significativo

S -desvio padrão,

\bar{X} - média,

n - número de repetições.

FIGURA 38-EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NA MASSA ESPECÍFICA BÁSICA DE MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS CONTROLE

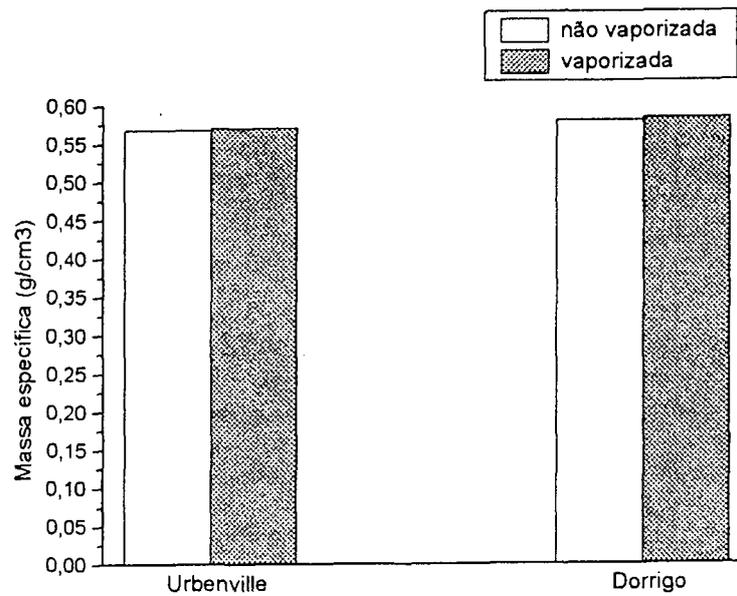
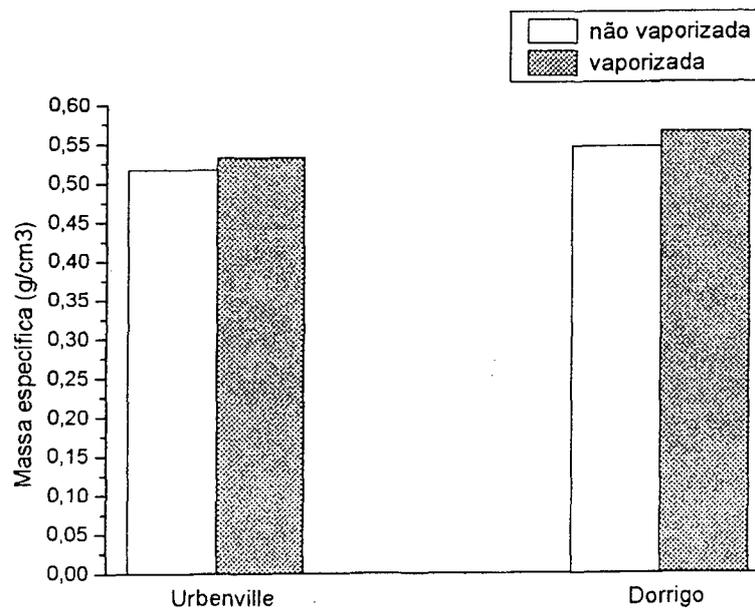


FIGURA 39-EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NA MASSA ESPECÍFICA BÁSICA DE MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS VAPORIZADAS.



O resultado desta análise indica que a vaporização da madeira somente aumenta significativamente a massa específica quando considera-se ambas as procedências como um conjunto único de dados em madeira proveniente de toras vaporizadas.

Embora este aumento na massa específica seja muito pequeno, temos que considerar que as propriedades de resistência da madeira aumentam de forma linear com o aumento da massa específica (FINDLEY, 1975; BODIG & JAYNE, 1982; U.S. FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1987).

De acordo com MITCHEL (1963), uma mudança de 2% na massa específica da madeira afeta o módulo de ruptura em cerca de 70 Kg/cm².

Outros autores que aplicaram vaporização na madeira de eucalipto não fazem qualquer referencia quanto ao efeito da vaporização na massa específica básica da madeira (CAMPBELL, 1961; ALEXIOU et al., 1990; ALEXIOU & MARCHANT, 1990; ROZAS, 1993).

Entretanto, estudo conduzido por CHAFE (1990) com madeira de *Eucalyptus regnans* não mostrou qualquer aumento significativo na massa específica básica com a vaporização. Porém, deve-se considerar também que Chafe não obteve qualquer alteração significativa no volume inicial da madeira com a vaporização a exemplo do presente estudo.

Este resultado obtido por CHAFE (1990) somente confirma que o aumento significativo observado da massa específica básica da madeira de *Eucalyptus dunnii*, na realidade, é resultante da redução do volume inicial provocado pela vaporização, conforme discutido no item 4.2.2.

Este aumento da massa específica com a vaporização, embora pequeno, é extremamente desejável principalmente quando se trata de avaliação das propriedades mecânicas da madeira uma vez que a massa específica está diretamente correlacionada com o aumento de resistências mecânicas da madeira

4.2.5. Efeito da Vaporização na Taxa de Secagem

Os valores médios obtidos para taxa de secagem e seus respectivos coeficientes de determinação para corpos de prova pareados vaporizados e não vaporizados de ambas as procedências de *Eucalyptus dunnii* proveniente de toras controle e toras vaporizadas são

apresentados nas tabelas 18 e 19 respectivamente.

Inicialmente pode-se observar nestas tabelas que o comportamento de secagem da madeira desta espécie ajustou-se perfeitamente à equação (13). Esta equação apresentou coeficientes de determinação (R^2) variando de 95% à 99% e portanto, dentro das limitações experimentais do estudo, esta equação pode ser utilizada para estimativa das taxas de secagem.

As figuras 40 e 41 permitem uma melhor visualização do efeito da vaporização na taxa de secagem de madeira proveniente de toras controles e madeira proveniente de toras vaporizadas respectivamente.

Nestas figuras, pode-se observar que em geral a vaporização inicial proporcionou um aumento na taxa de secagem da madeira de *Eucalyptus dunnii*. Este aumento representa cerca de 8% para madeira de procedência Dorrigo e 2,5% para procedência Urbenville.

Já para madeira proveniente de toras vaporizadas, a procedência Dorrigo apresentou um aumento na taxa de secagem com a vaporização de 7,5% enquanto que para madeira da procedência Urbenville não foi observado aumento na taxa de secagem.

Para uma melhor comparação dos resultados obtidos realizou-se um teste “t” pareado de média entre corpos vaporizados e não vaporizados de madeira das procedências Urbenville e Dorrigo proveniente de toras controle. De forma semelhante foi realizado um teste “t” pareado de médias para corpos de prova proveniente de toras vaporizadas (Anexo 3).

Os resultados desta análise evidenciam que a vaporização inicial aumenta significativamente a taxa de secagem em madeira proveniente de toras controles. Entretanto, este aumento na taxa de secagem somente é significativo para madeira da procedência Dorrigo, e quando considera-se ambas as procedências como um conjunto único de dados.

Já a vaporização inicial da madeira proveniente de toras vaporizadas não apresentou qualquer aumento significativo na taxa de secagem. Estas diferenças no comportamento da taxa de secagem entre as procedências Urbenville e Dorrigo poderiam ser consideradas normais, caso não houvesse sido observado problema de rachaduras em algumas amostras teste não vaporizadas da procedência Urbenville. A presença destas rachaduras nas amostras testes não vaporizadas proporcionou uma secagem mais rápida do que as amostras testes vaporizadas desta procedência tanto em madeira proveniente de toras controle como toras vaporizadas.

TABELA 18-TAXA DE SECAGEM PARA MADEIRA VAPORIZADA E NÃO VAPORIZADA PROVENIENTE DE TORAS CONTROLE.

Procedências	Árvore	TUI (%)	TUF (%)	Taxa de secagem madeira vaporizada (Ln Tu/hora)	TUI (%)	TUF (%)	Taxa de secagem madeira não vaporizada (Ln Tu/hora)		Aumento (decréscimo) na taxa de secagem (%)	Coeficiente de determinação	
										(r ² x 100%)	
										vaporizada	Não vaporizada
Urbenville	1	64,1	4,31	0,008164	74,5	3,0	0,008141		0,3	97,1	95,0
	2	74,7	5,0	0,007197	84,0	5,9	0,006887		4,4	98,0	99,0
	3	69,4	5,2	0,006475	73,8	4,7	0,006505		(0,5)	97,0	98,0
	4	61,7	5,7	0,006412	85,2	7,7	0,006059		5,5	97,0	99,0
Média		67,5	5,1	0,007062	79,4	5,3	0,006898	ns	2,4		
Dorrigo	1	101,6	4,7	0,008064	103,1	5,4	0,007222		10,5	97,6	98,7
	2	73,9	4,9	0,007478	88,2	5,7	0,007246		2,1	98,6	98,3
	3	68,2	5,4	0,007045	76,4	5,4	0,006371		9,6	96,0	98,6
	4	68,5	6,3	0,006468	75,9	7,2	0,005979		7,6	97,0	98,2
Média		78,1	5,3	0,007256	85,9	5,9	0,006705	*	8,2		
TOTAL		72,8	5,2	0,0071591	82,7	5,6	0,006801	*	5,0		

TUI - teor de umidade inicial;

TUF - teor de umidade final;

Ln Tu - logaritmo neperiano do teor de umidade;

* - significativo a um nível de 95% de probabilidade;

ns - não significativo

TABELA 19-TAXA DE SECAGEM PARA MADEIRA VAPORIZADA E NÃO VAPORIZADA PROVENIENTE DE TORAS VAPORIZADAS.

Procedências	Árvore	TUI (%)	TUF (%)	Taxa de secagem madeira Vaporizada (Ln Tu/hora)	TUI (%)	TUF (%)	Taxa de secagem Madeira não vaporizada		Aumento (decréscimo) na taxa de secagem (%)	Coeficiente de determinação (r ² x 100%)	
										vaporizada	Não vaporizada
Urbenville	1	76,9	8,8	0,005175	84,5	7,2	0,006495		(25,5)	99,0	99,2
	2	85,3	9,9	0,005720	85,6	8,5	0,005671		1,0	97,7	97,9
	3	61,9	9,8	0,005360	71,7	13,4	0,0044		17,9	96,6	98,7
Média		74,7	9,5	0,005418	80,6	9,7	0,005522	ns	(1,9)		
Dorrigo	1	77,98	5,4	0,007242	86,0	5,4	0,007209		0,5	98,2	99,0
	2	66,91	5,0	0,006891	67,5	7,3	0,005962		14,1	97,1	98,4
	3	86,8	6,7	0,007042	87,7	7,4	0,006565		6,8	96,0	97,4
	4	70,4	4,4	0,007677	76,1	6,03	0,007096		7,6	97,0	97,4
Média		75,5	5,4	0,007213	79,3	6,5	0,006708	ns	7,5		
TOTAL		75,1	7,5	0,006497	79,9	8,1	0,006280	ns	3,4		

TUI - teor de umidade inicial;

TUF - teor de umidade final;

Ln Tu - logaritmo neperiano do teor de umidade

* - significativo a um nível de 95% de probabilidade;

ns - não significativo

FIGURA 40-EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NA TAXA DE SECAGEM DE MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS CONTROLE.

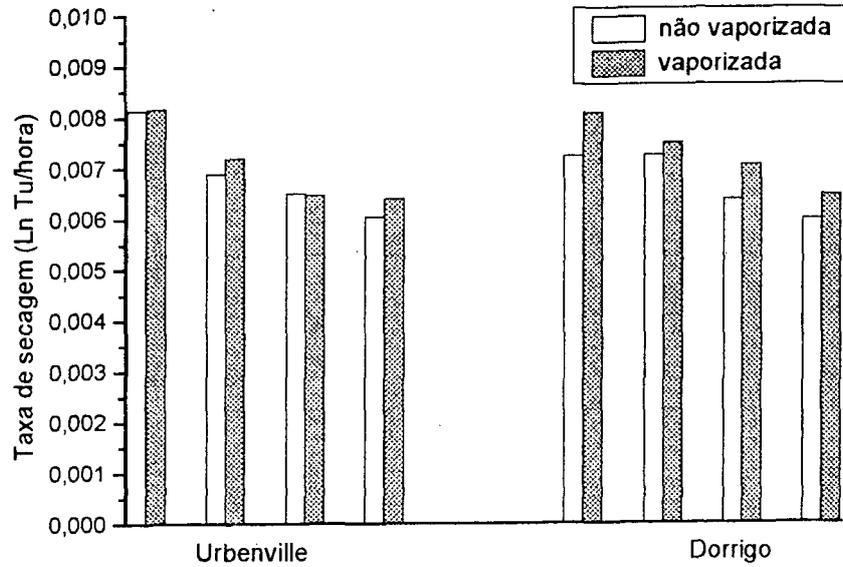
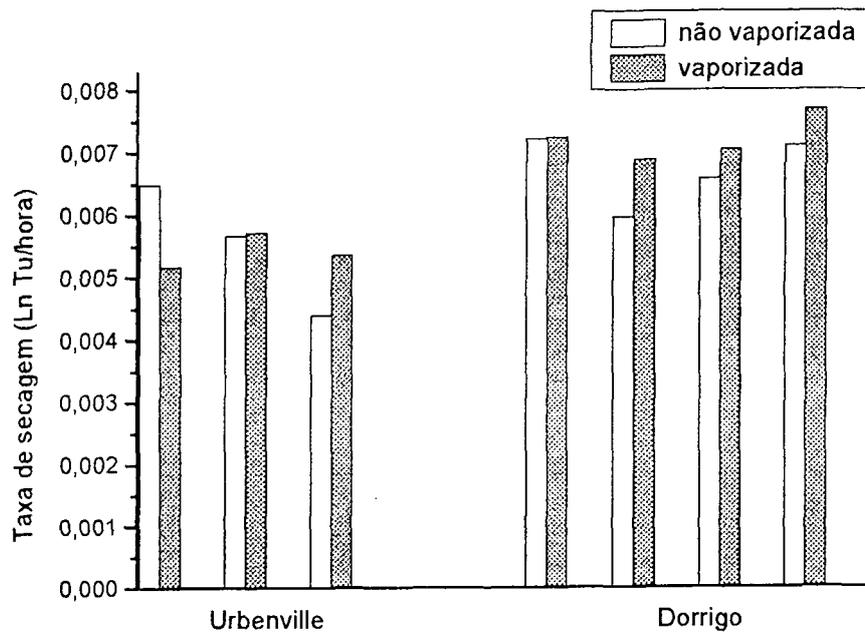


FIGURA 41 - EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NA TAXA DE SECAGEM DE MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS VAPORIZADAS.



De qualquer forma, mesmo considerando-se o problema de rachaduras, ao considerar-se a madeira de ambas as procedências de *Eucalyptus dunnii*, sejam estas provenientes de toras controles ou vaporizadas, pode-se verificar que a vaporização inicial proporcionou aumento na taxa de secagem desta espécie na ordem de 3,5 à 5%.

Aumento na taxa de secagem em diferentes espécies com a vaporização são registrados por vários autores (SIMPSON, 1975; KOZLIK, 1970; KOZLIK & HAMLIM, 1972; HASLET & KINIMONTH, 1986; ANANIAS, 1982; ALEXIOU et al., 1990; CHAFE, 1990).

No entanto, resultados obtidos por ALEXIOU et al. (1990) mostram que a vaporização por 3 horas da madeira de *Eucalyptus pilularis* proporcionou um aumento na taxa de secagem que variou de 7-16%. Neste estudo porém, o autor utilizou uma estufa de secagem piloto com ventilação forçada.

Segundo SIMPSON (1975; 1976), o grau de efetividade da vaporização tem mostrado ser variável de espécie para espécie. Segundo o autor, em algumas espécies, a exemplo do *Quercus rubra*, a vaporização chegou a aumentar a taxa de secagem em 50%, porém em outros, este efeito foi bem menos pronunciado.

Várias hipóteses têm sido propostas para explicar o mecanismo pelo qual a taxa de secagem aumenta em material vaporizado, incluindo:

- a) aumento na permeabilidade da camada verrugosa e acessibilidade para camada S₃ através do lume vazio (KUBINSKY, 1971);
- b) hidrólise ácida dos componentes químicos das paredes celulares (MACKAY, 1971);
- c) mobilização e remoção de parte dos extrativos solúveis em água durante o processo de vaporização, permitindo maior acesso das moléculas de água na parede celular e portanto, aumentando a difusão (KININMONTH, 1971; SALUD, 1976; MACGINNES & ROSEN, 1984; ALEXIOU et al., 1990).

Portanto, não se pode atribuir o aumento da taxa de secagem em madeira vaporizada a uma única possibilidade de forma isolada, e sim a interação destas, as quais podem contribuir em maior ou menor escala dependendo da espécie, uma vez que todas estas possibilidades estão intimamente correlacionadas com o aumento da permeabilidade e difusão de líquidos na madeira.

4.2.6. Efeito da Vaporização no Gradiente de Umidade

O gradiente de umidade médio, aqui considerado como a variação do teor de umidade na espessura das peças, obtido em corpos de prova pareados vaporizados e não vaporizados de ambas as procedências de *Eucalyptus dunnii* proveniente de toras controle e toras vaporizadas são mostradas nas tabelas 20 e 21 respectivamente. No entanto, uma melhor visualização do efeito da vaporização no gradiente de umidade em madeira provenientes de toras controle pode ser observado na figura 42. De forma semelhante, o efeito da vaporização em madeira provenientes de toras vaporizadas pode ser observado na figura 43.

Nestas figuras pode-se observar que a madeira vaporizada de ambas as procedências de *Eucalyptus dunnii* apresentam sempre um menor gradiente de umidade do que a madeira não vaporizada destas procedências. Este comportamento é válido tanto entre as camadas externas e o centro da peça (referência 3-1), como entre as camadas intermediárias e o centro (referência 2-1).

Esta redução entre as camadas externas e o centro (referência 3-1) representa cerca de 15,5%, para madeira proveniente de toras controles e cerca de 10,7%, para madeira proveniente de toras vaporizadas. Enquanto que esta redução no gradiente de umidade entre as camadas intermediárias e o centro (referência 2-1) representa cerca de 14,8% para madeira proveniente de toras controles e cerca de 9,5%, para madeira proveniente de toras vaporizadas.

No entanto, como pode ser observado, o gradiente de umidade entre madeira vaporizada e não vaporizada mostra-se sempre mais acentuado entre as camadas externas e o centro (referência 3-1) do que entre as camadas intermediárias e o centro (referência 2-1).

Para uma melhor comparação do gradiente de umidade realizou-se um teste “t” pareado de média entre corpos de prova vaporizados e não vaporizados de madeira proveniente de toras controle. De forma semelhante foi realizado um teste “t” pareado de médias para corpos de prova proveniente de toras vaporizadas (Anexo 3).

TABELA 20 - GRADIENTE DE UMIDADE ENTRE AS CAMADAS EXTERNAS E O CENTRO E ENTRE AS CAMADAS INTERMEDIÁRIAS E O CENTRO PARA MADEIRA VAPORIZADA E NÃO VAPORIZADA PROVENIENTE DE TORA CONTROLE.

Procedências	Referência 3 – 1 (%)							Redução do gradiente de umidade	Referência 2 – 1 (%)							Redução do gradiente de umidade
	vaporizada			não vaporizada					vaporizada			não vaporizada				
	S	X	n	S	X	n		(%)	S	X	n	S	X	n		(%)
Urbenville	13,7	19,3	14	15,3	22,1	14	*	12,6	2,4	4,4	14	2,5	5,1	14	ns	13,7
Dorrigo	7,5	14,4	6	6,9	18,8	6	*	23,5	0,7	4,9	6	1,7	5,9	6	ns	16,9
Total	12,2	17,8	20	13,2	21,1	20	*	15,6	2,1	4,6	20	2,3	5,4	20	*	14,8

X - média; S - desvio padrão; Gl - graus de liberdade; teste “t”; * - significativo a um nível de 95% de probabilidade; ns - não significativo; referência (3-1) - gradiente de umidade entre as camadas exteriores e o centro da peça; referência (2-1) - gradiente de umidade entre as camadas intermediárias e o centro da peça

TABELA 21 - GRADIENTE DE UMIDADE ENTRE AS CAMADAS EXTERNAS E O CENTRO E ENTRE AS CAMADAS INTERMEDIÁRIAS E O CENTRO PARA MADEIRA VAPORIZADA E NÃO VAPORIZADA PROVENIENTE DE TORAS VAPORIZADAS.

Procedências	Referência 3 – 1 (%)							Redução do gradiente de umidade (%)	Referência 2 – 1 (%)							Redução do gradiente de umidade (%)
	vaporizada			não vaporizada					vaporizada			não vaporizada				
	S	X	n	S	X	n	*		S	X	n	S	X	n	*	
Urbenville	13,0	18,3	13	12,9	20,1	13	*	10	2,4	4,1	13	2,2	4,4	13	ns	6,8
Dorrigo	11,8	16,7	9	11,5	19,1	9	*	12,6	0,9 2	3,4	9	1,1	3,9	9	*	12,8
Total	12,3	17,6	2,2	12,1	19,7	22	*	10,9	1,9	3,8	2,2	4,8	4,2	22	*	9,5

X - média; S -desvio padrão; Gl - graus de liberdade; teste “t”; * - significativo a um nível de 95% de probabilidade; ns - não significativo; referência (3-1) - gradiente de umidade entre as camadas exteriores e o centro da peça; referência (2-1) - gradiente de umidade entre as camadas intermediárias e o centro da peça

FIGURA 42-EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NO GRADIENTE DE UMIDADE DA MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS CONTROLE

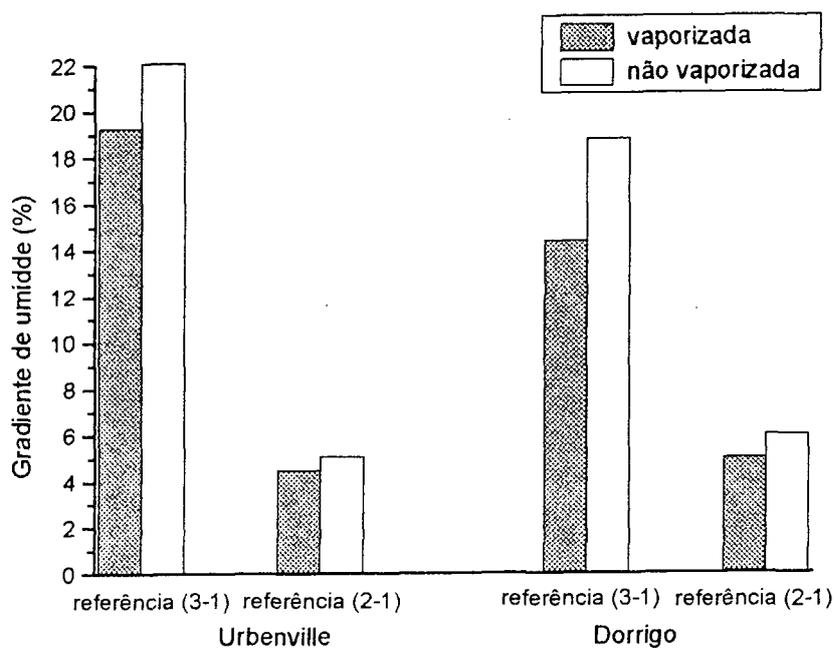
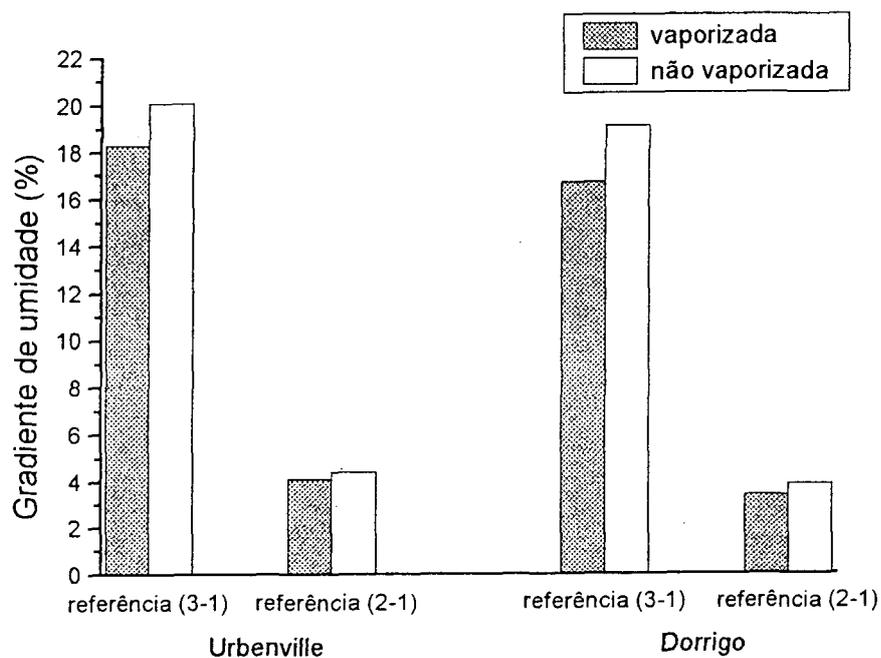


FIGURA 43-EFEITO DA VAPORIZAÇÃO NO GRADIENTE DE UMIDADE DA MADEIRA PROVENIENTE DE TORAS VAPORIZADAS.



Os resultados desta análise mostram que o gradiente de umidade entre as camadas externas e o centro (referência 3-1) reduz significativamente com a vaporização em ambas as procedências de *Eucalyptus dunnii*. Este comportamento foi observado tanto para madeira vaporizada proveniente de toras controles como para madeira vaporizada proveniente de toras vaporizadas.

Entretanto, o gradiente de umidade entre as camadas intermediárias e o centro (referência 2-1) reduz de forma menos acentuada. Neste caso, somente observou-se redução significativa quando considerou-se ambas as procedências como um conjunto único de dados. Estes resultados são válidos tanto para madeira vaporizada proveniente de toras controles como para madeira vaporizada proveniente de toras vaporizadas.

Reduções no gradiente de umidade em várias espécies com a vaporização da madeira são referidas por muitos autores (CAMBELL, 1961; ELLWOOD & ERICKSON, 1962; SIMPSON, 1976; AVRAMIDIS & OLIVEIRA, 1993; ALEXIOU & MARCHANT, 1990).

Entretanto, resultados obtidos por ALEXIOU & MARCHANT (1990) indicam que a vaporização por 3 horas à pressão atmosférica reduz o gradiente de umidade da madeira de *Eucalyptus pilularis* seco em estufa convencional com ventilação. Neste estudo, os autores observaram que o gradiente de umidade, entre as camadas externas e o centro da peça reduz cerca de 25% nos oito primeiros dias da secagem e cerca de 12,6%, no período total da secagem desta espécie.

Estudos conduzidos por KININMONTH (1971) e ALEXIOU et al. (1990) indicam que a vaporização da madeira causa uma mobilização ou remoção parcial dos extrativos solúveis em água, o que permite maior acesso das moléculas de água na parede celular e portanto, aumenta o movimento de água na madeira por difusão.

De acordo com MACKAY (1971), a vaporização preliminar a secagem da madeira de *Eucalyptus regnans* proporcionou um aumento no coeficiente de difusão que variou de 7% - 12%.

Segundo ALEXIOU & MARCHANT (1990), este aumento no coeficiente de difusão da madeira em decorrência da vaporização parece ser o principal responsável pela redução do gradiente de umidade.

4.3. SECAGEM EM ESTUFA PILOTO

4.3.1 Considerações Gerais

Para a secagem da madeira em estufa piloto utilizaram-se tábuas de ambas as procedências de *Eucalyptus dunnii* provenientes tanto de toras controles como toras vaporizadas. Estas tábuas com espessura de 24 mm, largura variável e comprimento igual ou superior a 2 metros, foram submetidas à secagem visando obter-se uma estimativa real do tempo de secagem, taxa de secagem e qualidade da madeira seca sob condições controladas de temperatura e umidade relativa.

Para isso foram empregados três programas de secagem sendo o programa 1 considerado o mais suave, pois não utilizou-se temperatura inicial superior a 45°C até que a madeira atingisse o ponto de saturação das fibras conforme recomendação de vários autores (KAUMAN, 1961; BLUHM & KAUMAN, 1965; CAMPBELL & HARTLEY, 1978; BRENNAN et. al., 1983; VERMAAS, 1996).

Nos demais programas empregou-se temperaturas iniciais crescentes ou seja, 45°C e 50°C para os programas 2 e 3 respectivamente, de forma a acelerar a secagem desta espécie. Os programas de secagem utilizados neste estudo encontram-se descrito no item 3.7.4..

4.3.2 Qualidade da Madeira

A quantificação e avaliação dos defeitos foram realizados após o término da secagem. Para isso mediu-se o comprimento das rachaduras nos dois extremos da tábua, flecha dos empenamentos, encanoamentos e colapsos. Estes defeitos foram posteriormente enquadrados conforme metodologia anteriormente descrita.

Os resultados obtidos na avaliação dos defeitos são mostrados na tabela 22. Nesta tabela pode-se observar que o programa 1, onde manteve-se a temperatura inicial de secagem abaixo de 45°C até a madeira atingir o ponto de saturação das fibras, foi o programa que apresentou a menor incidência de defeitos.

Estes defeitos são representados principalmente por 37,5% de colapso, 35% de encanoamento e 10% de rachaduras.

TABELA 22 - CLASSIFICAÇÃO DOS DEFEITOS PARA MADEIRA SUBMETIDA A SECAGEM NOS PROGRAMAS 1, 2, E 3.

TIPOS DE DEFEITO	CLASSIFICAÇÃO DOS DEFEITOS	PROGRAMA 1		PROGRAMA 2		PROGRAMA 3	
		n.º total de peças = 40		n.º total de peças = 40		n.º total de peças = 40	
		n.º de peças com defeito	% de defeitos	n.º peças com defeito	% de defeitos	n.º peças com defeito	% de defeitos
RACHADURAS DE TOPO	RACHAS LEVE $\Sigma r = \leq 10\% Lr$	1	2,5	4	10	4	10
	RACHAS FORTES $\Sigma r = > 10\% Lr$	3	7,5	7	18	23	58,0
ENCANOAMENTO	ENCANOAMENTO LEVE $ea \geq e - 4 \text{ mm}$	8	20	14	35	17	42,5
	ENCANOAMENTO FORTE $ea < e - 4 \text{ mm}$	6	15,0	12	30	17	42,5
ENCURVAMENTO	ENCURVAMENTO LEVE $x \leq 5 \text{ mm/m}$	3	7,5	5	12,5	8	20
	ENCURVAMENTO FORTE $x > 5 \text{ mm/m}$	1	2,5	2	5	4	10
ARQUEAMENTO	ARQUEAMENTO LEVE $x \leq 5 \text{ mm/m}$	0	0	0	0	5	12,5
	ARQUEAMENTO FORTE $x > 5 \text{ mm/m}$	0	0	2	5	3	7,5
COLAPSO	LEVE	5	12,5	7	17,5	1	2,5
	MÉDIO	4	10,0	3	7,5	9	22,5
	FORTE	6	15,0	17	42,5	25	62,5
	TOTAL	15	37,5	26	67,5	35	87,5

Σr = somatório do comprimento das rachaduras; Lr = comprimento total das tábuas; ea = espessura aplainada das tábuas; e = espessura nominal das tábuas; x = comprimento da flecha para o encurvamento e arqueamento;

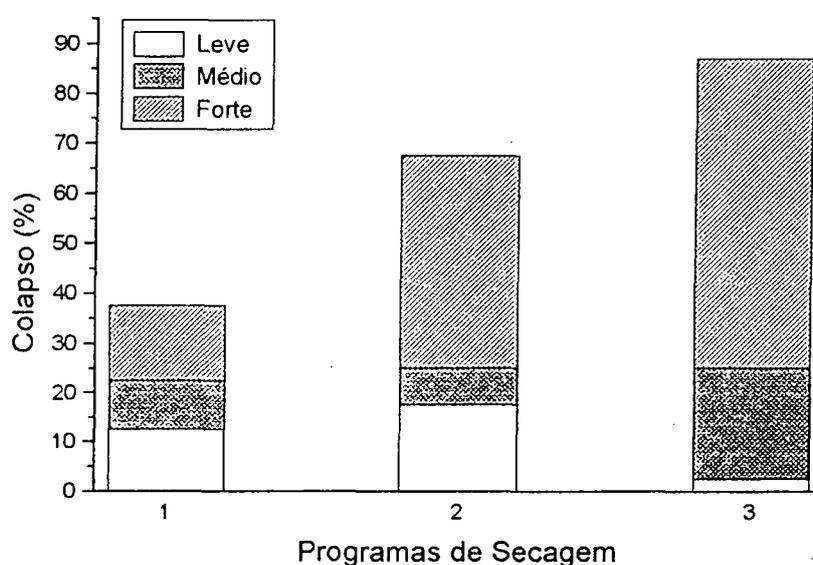
Resultado semelhante foi obtido por ROZAS (1993) com madeira de *Eucalyptus grandis* com espessura de 30 mm. Neste estudo, o autor obteve cerca de 42% de colapso, 50% de encanoamento e 5,6% de rachaduras.

No programa 2, estes defeitos aumentaram para 67,8% de colapso, 65% de encanoamento e 28% de rachaduras. Enquanto que no programa 3, estes defeitos aumentaram para 87,5% de colapso, 85% de encanoamento e 68% de rachaduras.

Como era esperado, a porcentagem de defeitos aumentou de acordo com o grau de severidade imposto aos programas de secagem. Entretanto, em termos de importância, os defeitos permaneceram na mesma ordem: colapso, encanoamento, rachaduras e empenamentos.

O colapso, como o principal defeito observado nos três programas de secagem, é atribuído principalmente ao emprego de temperaturas elevadas no início da secagem (KAUMAN, 1964; SANTINI & TOMASELLI, 1980; SIMPSON, 1991). Uma melhor visualização do comportamento do colapso nos três programas de secagem pode ser observado na figura 44.

FIGURA 44-PORCENTAGEM DE COLAPSO OBTIDO NOS TRÊS PROGRAMAS DE SECAGEM.



Nesta figura, pode-se realmente constatar que o colapso está diretamente relacionado com a temperatura inicial de secagem. O programa 1, considerado o mais suave, foi o que apresentou o menor índice deste defeito. Entretanto, neste programa não esperava-se um índice de colapso dessa magnitude, uma vez que utilizou-se temperatura inicial de secagem abaixo de 45°C até que a madeira atingisse o ponto de saturação das fibras, conforme recomendação de vários autores (KAUMAN, 1965; BLUHM & KAUMAN, 1965; CAMPBELL & HARTLEY, 1987; BRENNAN et al., 1983; STOHR & MACKAY, 1983).

Portanto, entre outros fatores como a própria espécie, a vaporização inicial deve ter contribuído para aumentar a incidência do colapso conforme demonstrado anteriormente no item 4.2.2. e constatado por vários autores (KAUMAN, 1961; LIANG, 1981; HASLETT & KININMONTH, 1986).

A vaporização, segundo CHAFE (1990), propicia alterações nos componentes da parede celular ou mesmo sua degradação, o que facilita a incidência do colapso durante a secagem da madeira.

O segundo defeito mais pronunciado foi o encanoamento, o qual é atribuído a diferentes intensidades de contração no sentido tangencial e radial da madeira (anisotropia). O comportamento deste defeito pode ser observado na figura 45.

Este defeito no programa 1 não pode ser considerado elevado uma vez que do total de 35%, somente 15% foi classificado como defeito forte.

Resultados obtidos por ROZAS (1993), para secagem da madeira de *Eucalyptus grandis* em condições de secagem semelhantes, mostram que a intensidade destes defeitos variam de 42-50%. Da mesma forma STOHR & MACKAY (1983) obtiveram uma incidência de aproximadamente 50% de encanoamento para *Eucalyptus grandis*.

Entre os fatores que contribuíram para o baixo índice deste defeito está logicamente a baixa temperatura inicial de secagem (40°C) empregada no programa 1.

Segundo TOMASELLI (1978), outro fator que também deve ter contribuído para o baixo índice de empenamento está relacionado com a vaporização inicial. Segundo este autor, a vaporização inicial quando realizada a temperaturas próximas a 100°C, e por períodos dependentes das espécies e espessura do material, minimiza este defeito durante a secagem pois esta fase é importante para que ocorra na madeira o processo de plasticização.

Reduções no nível do encanoamento em função da vaporização inicial foram observadas por ROZAS (1993) para madeira de *Eucalyptus grandis* com 30 mm de espessura e seca em estufa piloto utilizando um programa de secagem semelhante ao utilizado no presente estudo.

De forma semelhante, CAMPBELL (1961) observou redução no encanoamento com a vaporização inicial para madeira de *Eucalyptus regnans*.

Entretanto, nos programas 2 e 3 houve um acréscimo acentuado do encanoamento, principalmente no que refere-se a defeitos fortes (figura 45).

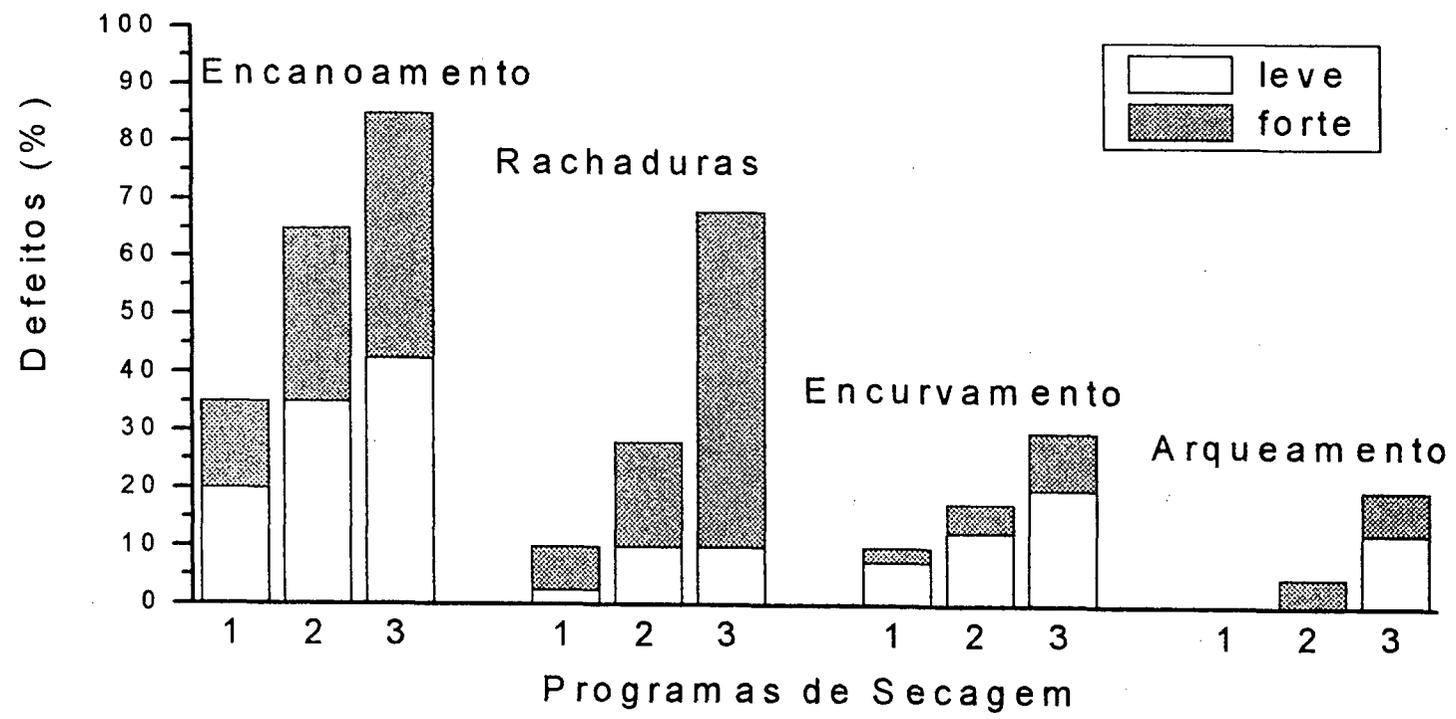
Este aumento pode ser atribuído a elevação da temperatura de secagem que conseqüentemente provoca aumento na contração e colapso da madeira (CAMPBELL, 1961; CHAFE, 1990).

O terceiro defeito em importância encontrado nas tábuas, após a secagem da madeira, foram as rachaduras (figura 45). Este defeito no programa 1, constitui-se de apenas 10% dos quais somente 7,5% foram classificados como fortes e portanto, superando as expectativas iniciais deste estudo pois é sabido que este defeito se constitui sem dúvida no maior problema de degradação desta espécie (VERMAAS, 1987).

Entre os fatores que contribuíram para a baixa porcentagem das rachaduras no programa de secagem 1 estão:

- a) A baixa temperatura inicial e alta umidade relativa aplicada durante a fase inicial da secagem sugeridas por (KAUMAN, 1961; BLUHM & KAUMAN, 1965; CAMPBELL & HARTLEY, 1978; BRENNAN et al., 1983). Estudos conduzidos por NEUMANN & SAAVEDRA (1992) mostram que para eliminar por completo as rachaduras durante o processo de secagem com madeira de *Eucalyptus globulus* foi necessário iniciar a secagem com temperaturas de bulbo seco abaixo de 30°C e ainda umidificar a carga de madeira 4 vezes ao dia.
- b) O processo de vaporização inicial recomendado por CAMPBELL (1961). Segundo este autor, a madeira de *Eucalyptus obliqua*, com espessura de 25 mm e 50 mm, após sofrer uma vaporização inicial de 3 horas apresentou consideravelmente menos rachaduras que a madeira não vaporizada desta espécie.

FIGURA 45-PORCENTAGEM DE ENCANOAMENTO, RACHADURAS, ENCURVAMENTO E ARQUEAMENTO OBTIDO COM O EMPREGO DOS PROGRAMAS DE SECAGEM 1, 2 E 3.



Segundo SIMPSON (1980), este procedimento além de liberar as tensões de crescimento remanescentes na madeira, as quais são responsáveis por parte das rachaduras, contribui ainda para redução do gradiente de umidade que é outro fator responsável pelas rachaduras da madeira (ALEXIOU & MARCHANT, 1990; SIMPSON, 1976).

- c) Outro fator que contribuiu ainda para minimizar o surgimento das rachaduras está relacionado com o aplainamento das tábuas. O aplainamento das tábuas elimina a marca dos dentes da serra os quais facilitam o surgimento das rachaduras (CUPPETT & CRAFT, 1972; CECH & PFAFF, 1977). RICE (1986) obteve reduções consideráveis nas rachaduras após o aplainamento das tábuas da madeira de *oak* enquanto RIETZ & JENSON (1968) obtiveram reduções nas rachaduras da madeira de *Beech*.

Entretanto, no programa 2, as rachaduras fortes praticamente duplicaram em relação ao programa 1, enquanto que no programa 3 estas praticamente triplicaram em relação ao programa 2 (figura 45).

Este comportamento evidencia que apesar da vaporização inicial e aplainamento das tábuas, o principal fator para o controle das rachaduras nesta espécie está relacionado com as condições iniciais de secagem (temperatura e umidade relativa).

Os demais defeitos tais como encurvamento e arqueamento, não se constituíram em maiores problemas mesmo nos programas 2 e 3 pois os defeitos fortes não ultrapassaram 10% do total (figura 45).

Com base nos resultados obtidos nos três programas de secagem, e dentro das limitações do estudo, pode-se concluir que a madeira de *Eucalyptus dumii* apresenta sérias dificuldades de secagem, semelhante as demais espécies desse gênero, e portanto, para sua secagem adequada, não devem ser empregadas temperaturas superiores a 45°C até que a madeira atinja o ponto de saturação das fibras (programa de secagem 1), além é claro de realizar-se a vaporização inicial e se possível o aplainamento das tábuas, caso contrário o índice de defeitos irá provavelmente aumentar e grande quantidade de material será perdido.

4.3.3. Tempo e Taxa de Secagem

Como no caso da secagem da madeira em estufa de laboratório, o emprego da equação (13) para determinação da taxa de secagem mostrou excelente ajuste dos dados. O coeficiente de determinação (R^2) para os três programas de secagem foi de 97% e portanto, dentro das limitações experimentais do estudo, podendo ser utilizado para estimar a taxa de secagem desta espécie.

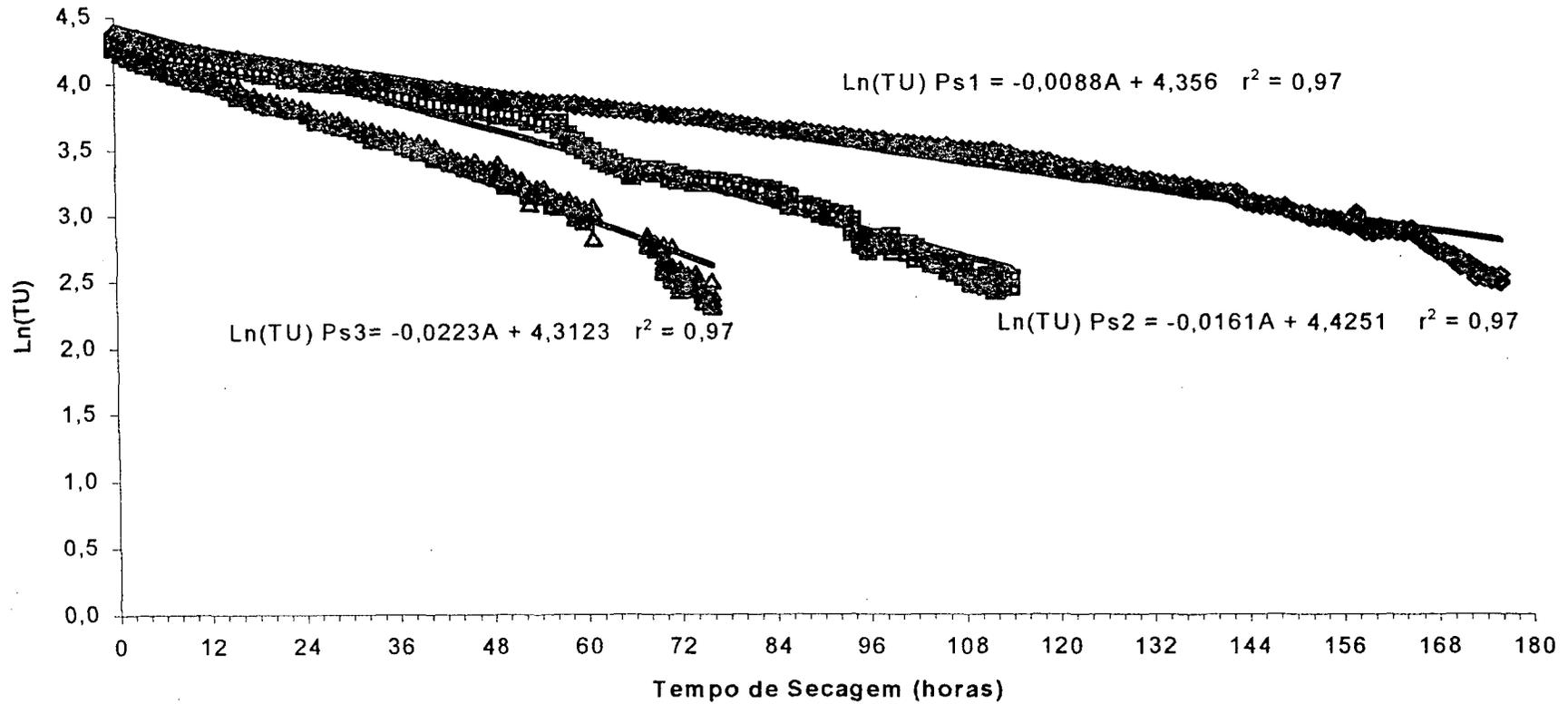
Uma melhor visualização do comportamento da taxa de secagem nos programas 1, 2 e 3 é mostrado na figura 46.

Embora a equação (13) represente bem o comportamento de secagem desta espécie, pode-se observar na figura 46 que o teor de umidade reduziu de forma muito abrupta quando a madeira foi submetida a vaporização para recuperação do colapso (5 horas). Na realidade, esta redução no teor de umidade foi causado por um problema de ordem técnica da estufa piloto, uma vez que o sistema de umidificação (caldeira elétrica) da estufa não possui a mesma capacidade de produzir vapor que o sistema de aquecimento (resistência elétrica) de elevar a temperatura de bulbo seco para 100°C. Esta disparidade entre os dois sistemas fez com que a madeira fosse submetida a condições muito rigorosas de secagem durante o período de vaporização para recuperação do colapso, o que conseqüentemente deve ter elevado a taxa de secagem.

É possível também que este problema tenha ocorrido durante a vaporização inicial de 3 horas da madeira, contudo neste caso não é possível de verificar-se na figura 46.

Uma síntese das taxas de secagem obtidas nos três programas de secagem é mostrada na tabela 23.

FIGURA 46-TAXA DE SECAGEM OBTIDA NOS PROGRAMAS 1, 2 E 3 PARA O INTERVALO DE UMIDADE DE VERDE ATÉ 12% DE UMIDADE.



PS₁- programa de secagem 1; PS₂- programa de secagem 2; PS₃ - programa de secagem 3; Ln Tu - logaritmo neperiano do teor de umidade; A - coeficiente angular da regressão que representa a taxa de secagem em cada programa de secagem para o tempo total de secagem.

TABELA 23-TAXA DE SECAGEM OBTIDAS PARA OS PROGRAMAS DE SECAGEM UTILIZADOS NO ESTUDO.

Programa de secagem	TUI	TUF	Tempo de secagem (horas)	Taxa de Secagem Ln Tu (%) / hora	Coefficiente de determinação ($r^2 \times 100\%$)
1	80,2	12	180	0,0088	97,0
2	76,1	12	120	0,0161	97,0
3	75,2	12	75	0,0223	97,0

TUI- teor de umidade inicial,

TUF - teor de umidade final

Ln Tu (%) -logaritmo neperiano do teor de umidade da madeira.

Na figura 46 pode-se observar que o programa de secagem 1, considerado o mais suave, e portanto o que mais se assemelha as demais espécies desse gênero no Brasil, mostrou uma taxa de secagem média de 0,0088 Ln (Tu)/hora. Esta taxa de secagem corresponde a uma velocidade média de secagem de 9%/dia, já incluído a vaporização inicial e a vaporização destinada a recuperação do colapso.

Já os programas 2 e 3 apresentaram taxas de secagem mais elevadas ou seja, 0,0161 Ln (Tu)/hora e 0,0223 Ln (Tu)/hora, o que corresponde a uma velocidade de secagem de 12,8%/dia e 20,2%/dia respectivamente.

Portanto, o tempo e a taxa de secagem obtidos para os três programas de secagem podem ser considerados excelentes quando comparados as demais espécies desse gênero, uma vez que até o momento não se dispõe de informações a respeito do comportamento de secagem dessa espécie no Brasil.

Estudos conduzidos por TOMASELLI (1992) e citado por ROZAS (1993), mostram que a utilização de um sistema combinado de pré-secagem ao ar livre e secagem convencional, para madeira de eucalipto de 25 mm de espessura destinado a caixotaria, leva cerca de 2 meses para atingir o ponto de saturação das fibras, e posteriormente varia de 5 a 10 dias em estufa para alcançar o teor de umidade final desejado.

Segundo ROZAS & TOMASELLI (1993), a madeira de *Eucalyptus viminalis* apresenta um tempo de secagem de aproximadamente 21 dias para secar desde 50% até 9%, o que corresponde a uma velocidade de secagem de aproximadamente 2%/dia.

Da mesma forma, estudos conduzidos por ROZAS (1993) com madeira de *Eucalyptus grandis* com 30 mm de espessura, mostram que para secar esta espécie desde 97,6% até 7,6% de umidade final leva aproximadamente 26 dias, o que corresponde a uma velocidade de secagem de aproximadamente 3,5 %/dia. STORH (1977) comenta ainda da possibilidade de secar madeira de *Eucalyptus grandis* com uma temperatura inicial de 60°C. Segundo o autor, neste caso o tempo de secagem seria de 18 a 25 dias.

NEUMANN (1989) comenta que é possível secar madeira de *Eucalyptus globulus* com 30 mm de espessura através de um sistema misto de pré-secagem e secagem à alta temperatura. Neste caso, o tempo de secagem é de aproximadamente 35 dias, para secar desde 70 % até 21% e 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.

Portanto, acredita-se que entre os fatores que devam ter contribuído para secagem rápida desta espécie estejam sem dúvida alguma sua alta permeabilidade, uma vez que a taxa de secagem foi elevada tanto na secagem estufa piloto quanto em estufa de laboratório. Esta alta permeabilidade pode ser percebida quando do estudo do efeito vaporização inicial no teor de umidade. Nesta oportunidade, a madeira perdeu cerca de 15 % do seu teor de umidade inicial apenas com a vaporização conforme mostrado no item 4.2.1.

Da mesma forma, esta espécie mostrou alta permeabilidade durante o estudo do efeito da vaporização inicial no gradiente de umidade (item 4.2.5). Nesta oportunidade a vaporização mostrou reduzir o gradiente de umidade entre as camadas externas e o centro da madeira na ordem de 10,7% – 15,5% e entre as camadas intermediárias e o centro na ordem de 9,5% – 14,8%.

Entretanto, outros fatores devem ter contribuído de forma expressiva para aumentar a taxa de secagem.

A própria vaporização inicial de 3 horas, que já demonstrou ser eficiente no aumento da taxa de secagem e melhora da permeabilidade da madeira (CAMPBELL, 1961; SHARMA & BALI, 1969; MACKAY, 1971; KININMONTH, 1973; CHEN, 1975).

Outro fator que contribuiu para a elevação da taxa de secagem foi sem dúvida alguma a vaporização destinada a recuperação do colapso (5horas). Esta vaporização, devido a problemas técnicos do equipamento, como discutido anteriormente, proporcionou uma redução acentuada no teor de umidade da madeira quando de sua aplicação, embora sua finalidade não fosse esta (figura 50). Existe ainda a possibilidade de que tenha ocorrido problema semelhante durante a vaporização inicial de 3 horas a qual contudo não pode ser detectada na análise gráfica do comportamento de secagem desta espécie.

4.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

4.4.1 Considerações Gerais

As propriedades mecânicas da madeira de *Eucalyptus dumii* foram determinadas a partir de corpos de prova retirados de toras controle e toras vaporizadas. Das toras vaporizadas foram retiradas vigotas as quais foram vaporizadas (pré-vaporizadas) por três horas e posteriormente, também transformadas em corpos de prova.

Este terceiro tratamento de vaporização foi criado levando-se em consideração a possibilidade de utilizar-se madeira que tenha sofrido uma vaporização em tora e posteriormente, tenha sido submetida a uma vaporização preliminar a secagem.

Desta forma, as propriedades mecânicas desta espécie foram determinadas para corpos de prova controle (C), corpos de prova vaporizados (V) e para corpos de prova vaporizados em tora e pré-vaporizados (V+PV) tanto nas condições saturadas (100% de umidade) como climatizadas (12% de umidade).

Estes corpos de prova foram dimensionados de acordo com a recomendação da norma COPANT indicada para cada propriedade mecânica ensaiada, conforme metodologia anteriormente descrita.

4.4.2. Considerações Sobre o Teor de Umidade de Equilíbrio nas Propriedades Mecânicas.

O teor de umidade de equilíbrio da madeira é um fator importante na avaliação do efeito da vaporização nas propriedades mecânicas.

Segundo KOLLMANN & CÔTÉ (1968), sua importância está relacionada com o menor teor de umidade final alcançado pela madeira que foi submetida a determinado tratamento térmico.

Este comportamento realmente pôde ser verificado no presente estudo, uma vez que os corpos de prova vaporizados não apresentaram o mesmo teor de umidade de equilíbrio dos corpos de prova controle, após o condicionamento em ambiente de temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $65 \pm 3\%$.

O teor de umidade de equilíbrio alcançado pelos corpos de prova após o acondicionamento são mostrados na tabela 24.

TABELA 24 - TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO PARA CORPOS DE PROVA APÓS ACONDICIONAMENTO EM CÂMARA CLIMATIZADA.

Tratamentos	Teor de umidade de equilíbrio		
	S	X	n
C	0,54	12,6 A	94
V	1,26	12,1 B	94
V+PV	0,63	11,7 C	92

*-médias seguidas por letras distintas são significativas à um nível de 95% de probabilidade ; C- corpos de prova controle, V- corpos de prova vaporizados em tora; V+PV - corpos de prova vaporizados em tora e pré-vaporizados na forma de vigotas; S- desvio padrão; X- média da umidade de equilíbrio, n - número de repetições.

Como pode-se observar nesta tabela, o teor de umidade de equilíbrio reduz com o nível de vaporização imposto a madeira. Estas variações do teor de umidade de equilíbrio entre os tratamentos são significativas como demonstra o resultado de um teste Tukey de médias.

SKAAR (1976), considerando a importância das mudanças que ocorrem no teor de umidade de equilíbrio, comenta que a avaliação do efeito da temperatura (vaporização) nas propriedades mecânicas da madeira pode ser feita de duas formas:

- a) comparar as propriedades mecânicas da madeira que foi submetida a diferentes tratamentos térmicos, após acondicionamento, a um mesmo ambiente. Esta opção é considerada a melhor para avaliação prática, uma vez que a madeira quando em serviço não manterá um teor de umidade fixo, e sim estará em equilíbrio com o ambiente.

b) comparar as propriedades da madeira a um mesmo teor de umidade de equilíbrio. Esta opção é considerada como a mais apropriada do ponto de vista do mecanismo da degradação térmica da madeira. Neste caso é necessário ajustar os valores calculados para um mesmo teor de umidade.

Após análise criteriosa de ambas as possibilidades optou-se pela utilização da segunda condição, ou seja, corrigir as propriedades mecânicas para um mesmo teor de umidade.

Com a correção dessas propriedades acredita-se evitar que qualquer perda de resistência, resultante da vaporização (degradação), seja de alguma forma compensada pela elevação da resistência, decorrente do menor teor de umidade final, alcançado pela madeira após a climatização.

Para corrigir as propriedades mecânicas da madeira para 12% de umidade utilizou-se a equação (24) proposta pelo U.S. FOREST PRODUCTS LABORATORY (1955).

$$\log x_{12} = \log x_v + \left(\frac{TU_{psf} - 12}{TU_{psf} - TU_t} \right) \log \left(\frac{x_t}{x_v} \right) \quad (24)$$

onde:

log - logaritmo na base 10;

x_{12} - valor da propriedade a 12% de teor de umidade;

x_v - valor da propriedade obtido no ensaio em condição verde (teor de umidade igual ou superior ao PSF);

x_t - valor da propriedade obtido no ensaio a um teor de umidade t;

TU_t - teor de umidade correspondente ao ensaio, %;

TU_{psf} - teor de umidade no ponto de saturação das fibras (no caso de não conhecer-se o PSF da espécie pode-se usar o valor 25);

12 - teor de umidade de 12%.

4.4.3 Resultados do Efeito da Vaporização nas Propriedades Mecânicas

Para avaliar o efeito da vaporização nas madeiras das duas procedências de *Eucalyptus dunnii* foram realizados ensaios de flexão estática, compressão paralela às fibras e cisalhamento nos sentidos radial e tangencial.

Estas propriedades foram ensaiadas tanto na condição saturada (100% de umidade) como climatizada (12% de umidade).

a) Flexão Estática

Para flexão estática foram calculadas três valores de resistência para cada procedência de *Eucalyptus dunnii* utilizada: módulo de elasticidade (MOE), módulo de ruptura (MOR) e tensão no limite proporcional (TLP).

Os resultados obtidos para cada propriedade e condição de umidade do estudo são apresentados na tabela 25.

Uma melhor visualização do efeito do tratamento de vaporização no MOE, MOR e TLP em flexão estática para as condições de umidade empregadas no estudo são mostrados nas figuras 47 e 48 respectivamente.

i) Módulo de Elasticidade (MOE)

- Condição saturada: o MOE de ambas as procedências apresentou-se crescente com a vaporização. Para procedência Urbenville, a pré-vaporização da madeira mostrou aumentar significativamente o MOE tanto em relação ao controle como em relação a material vaporizado em tora. Já para procedência Dorrigo, a pré-vaporização mostrou aumentar significativamente o MOE somente em relação ao controle (Anexo 4).
- Condição climatizada: neste caso o MOE apresentou comportamento crescente somente em uma das procedências. Na procedência Urbenville a pré-vaporização da madeira mostrou aumentar significativamente o MOE em relação ao controle, entretanto, para procedência

TABELA 25-MÓDULO DE ELASTICIDADE, MÓDULO DE RUPTURA E TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL EM FLEXÃO ESTÁTICA.

Procedência	T	CONDIÇÃO DO ENSAIO													
		SATURADA							CLIMATIZADO						
		n	MOE (kg/cm ² x10 ³)	S	TLP	S	MOR (kg/cm ²)	S	n	MOE (kg/cm ² x10 ³)	S	TLP	S	MOR (kg/cm ²)	S
Urbenville	C	24	109,7 A	31,62	500,8 A	66,9	702,6 AB	87,0	49	181,8 A	28,8	824,7 A	106,8	1052,0 A	123,8
	V	20	132,4 A	52,26	501,5 A	52,2	743,9 A	48,9	47	181,3 AB	32,9	797,9 A	156,9	1059,1 A	161,9
	V+PV	28	155,9 B	35,52	367,7 B	65,5	663,7 B	109,9	50	196,9 B	38,1	642,8 B	86,1	903,8 B	105,3
Dorrigo	C	24	109,2 B	30,27	530,0 A	85,0	756,9 A	79,7	46	184,7 A	32,7	864,4 A	103,7	1054,5 A	113,5
	V	26	130,9 AB	34,42	538,6 A	40,5	781,8 A	68,4	44	180,9 A	24,8	806,6 B	136,2	1037,2 A	123,8
	V+PV	30	137,4 A	34,31	375,7 B	56,8	688,2 B	78,7	55	183,3 A	33,0	613,1 C	76,5	872,2 B	101,6

*- médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de 95% de probabilidade.

T - tratamentos; C - controle; V - vaporizada; V+PV - madeira vaporizada em tora e pré-vaporizada na forma de vigotas; n - número de repetições; S - desvio padrão; MOE - módulo de elasticidade; TLP - tensão no limite proporcional; MOR - módulo de ruptura.

FIGURA 47-EFEITO DOS TRATAMENTOS DE VAPORIZAÇÃO NO MÓDULO DE ELASTICIDADE (MOE), TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL (TLP) E MÓDULO DE RUPTURA (MOR) NA CONDIÇÃO SATURADA

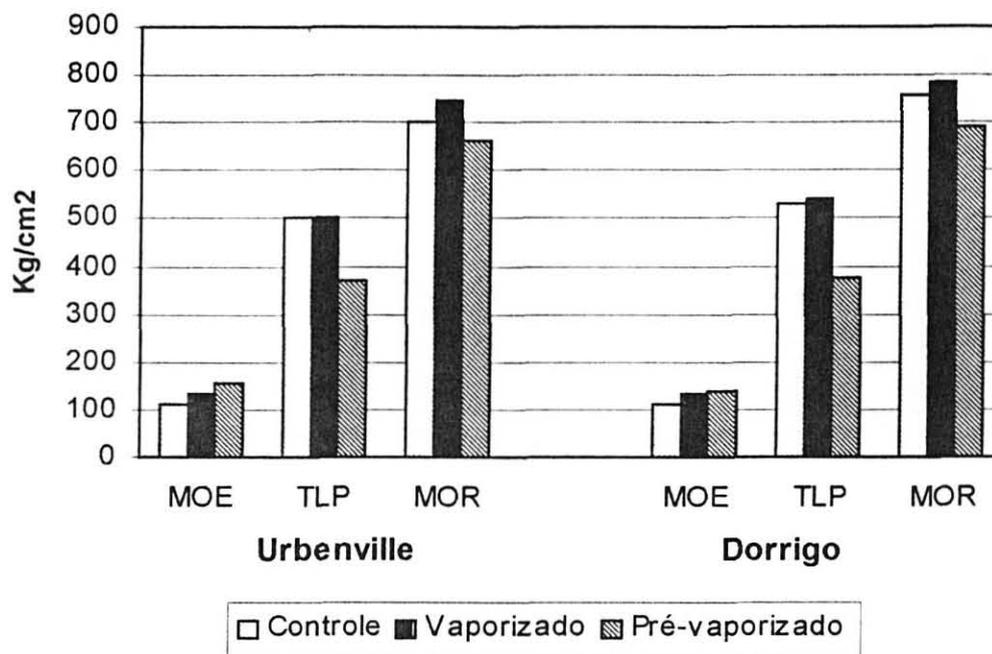
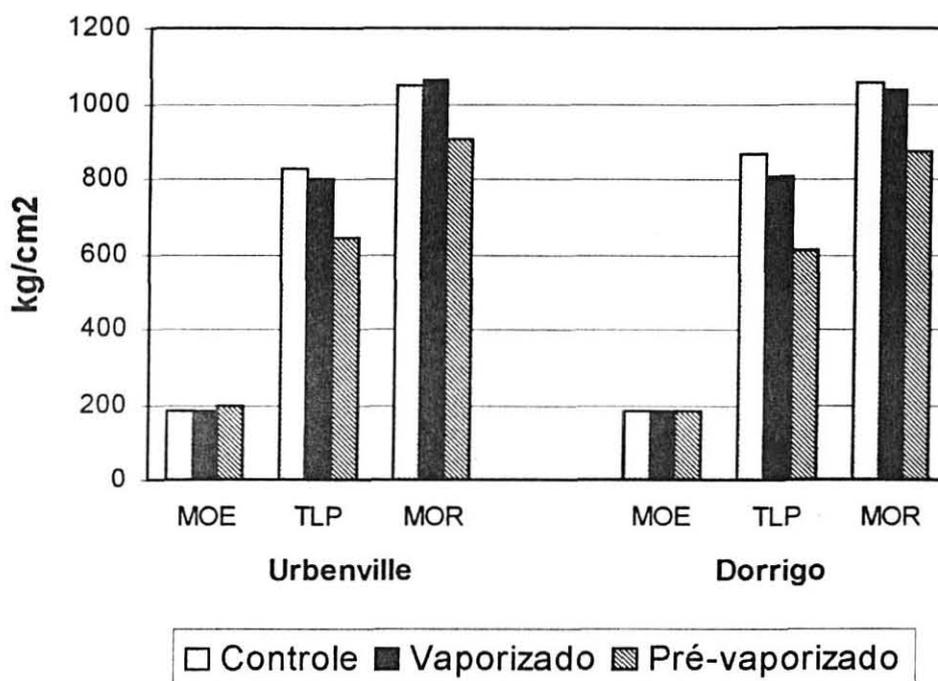


FIGURA 48-EFEITO DOS TRATAMENTOS DE VAPORIZAÇÃO NO MÓDULO DE ELASTICIDADE (MOE), TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL (TLP) E MÓDULO DE RUPTURA (MOR) NA CONDIÇÃO CLIMATIZADA



Dorrigo não foi observado qualquer aumento no valor desta propriedade com a vaporização. Embora tenha sido observado aumento significativo com a vaporização em uma das procedências, não foi observado efeito significativo do tratamento de vaporização para madeira de *Eucalyptus dunnii* dentro da condição climatiza (Anexo 4).

ii) Módulo de Ruptura (MOR)

- Condição saturada: o MOR de ambas as procedências de *Eucalyptus dunnii* apresentou um leve aumento com a vaporização das toras, e posteriormente um decréscimo com a pré-vaporização, entretanto, o aumento com a vaporização não foi significativo. Já o decréscimo com a pré-vaporização para a procedência Urbenville foi significativo em relação a material vaporizado, enquanto que para procedência Dorrigo, foi significativo tanto em relação a material vaporizado em tora como ao controle (Anexo 4).
- Condição climatizada: o MOR decresce sua resistência com a pré-vaporização em ambas as procedências estudadas. Este decréscimo foi significativo para ambas as procedências, tanto em relação ao controle como material vaporizado em tora (Anexo 4).

iii) Tensão no Limite Proporcional (TLP)

- Condição saturada: a TLP mostra reduzir em ambas as procedências com a pré-vaporização do material. Este decréscimo foi significativo em ambas as procedências, tanto em relação ao controle como ao material vaporizado em tora.
- Condição climatizada: em geral a TLP somente aparenta reduzir com a pré-vaporização. Na procedência Urbenville, a pré-vaporização mostrou reduzir significativamente a TLP tanto em relação ao controle como em relação a material vaporizado. Já para procedência Dorrigo, a TLP mostrou reduzir significativamente tanto com a vaporização das toras como com a pré-vaporização da madeira (Anexo 4).

b) Compressão Perpendicular e Compressão Paralela às Fibras

Para compressão perpendicular às fibras foi calculada o valor do esforço no limite proporcional, enquanto que para compressão paralela às fibras calculou-se a resistência máxima da madeira.

Os resultados obtidos para cada propriedade e condição de umidade do estudo são apresentados na tabela 26.

Uma melhor visualização do efeito do tratamento de vaporização no esforço no limite proporcional em compressão perpendicular às fibras e resistência máxima em compressão paralela às fibras nas condições de umidade estudadas, são mostrados nas figuras 49 e 50 respectivamente.

i) Esforço no Limite Proporcional (ELP)

- Condição saturada: o ELP apresenta comportamento divergente com a vaporização entre as duas procedências utilizadas. Entretanto, o decréscimo observado na procedência Urbenville mostrou ser significativo, enquanto que para procedência Dorrigo não foi observado qualquer diferença significativa entre os tratamentos. Apesar deste decréscimo do ELP com a vaporização em uma das procedências, não foi observado diferença significativa entre os tratamentos dentro da condição saturada (Anexo 4).
- Condição climatizada: o ELP não apresentou qualquer diferença significativa entre os tratamentos.

ii) Resistência Máxima (RM_{áx.})

- Condição saturada: já para a R_{máx.}, não foi observado qualquer diferença significativa entre os tratamentos.

TABELA 26 - ESFORÇO NO LIMITE PROPORCIONAL EM COMPRESSÃO PERPENDICULAR E RESISTÊNCIA MÁXIMA EM COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS.

Procedências	T	Condição do ensaio											
		Saturada						Climatizado					
		n	ELP compressão perpendicular (kg/cm ²)	S	n	R.máx. compressão paralela (kg/cm ²)	S	n	ELP compressão perpendicular (kg/cm ²)	S	n	R.máx. compressão paralela (kg/cm ²)	S
Urbenville	C	12	76,03 A	10,25	12	395,63 A	21,34	14	108,88 A	16,86	15	607,57 B	95,21
	V	12	64,38 B	12,19	12	374,56 A	36,8	11	109,13 A	11,85	13	531,59 A	75,19
	PV	na	na	Na	na	na	na	9	95,84 A	12,26	8	550,78 A	85,18
Dorrigo	C	12	62,29 A	11,20	12	386,16 A	44,43	14	112,15 A	14,99	13	643,15 A	65,91
	V	11	64,24 A	12,85	12	350,63 A	44,73	13	106,69 A	11,32	16	578,79 B	71,6
	V+PV	na	na	Na	na	na	na	9	105,37 A	15,57	10	500,23 C	112,06

* Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de 95% de probabilidade.

T - tratamentos; C - controle; V - vaporizada; V+PV - madeira vaporizada em tora e pré-vaporizada na forma de vigotas; n - número de repetições; S - desvio padrão; ELP - esforço no limite proporcional; R.máx. - resistência máxima; na - condição não analisada.

FIGURA 49-EFEITO DOS TRATAMENTOS DE VAPORIZAÇÃO NO ESFORÇO NO LIMITE PROPORCIONAL (ELP) EM COMPRESSÃO PERPENDICULAR AS FIBRAS E RESISTÊNCIA MÁXIMA (R.Máx.) EM COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS NA CONDIÇÃO SATURADA.

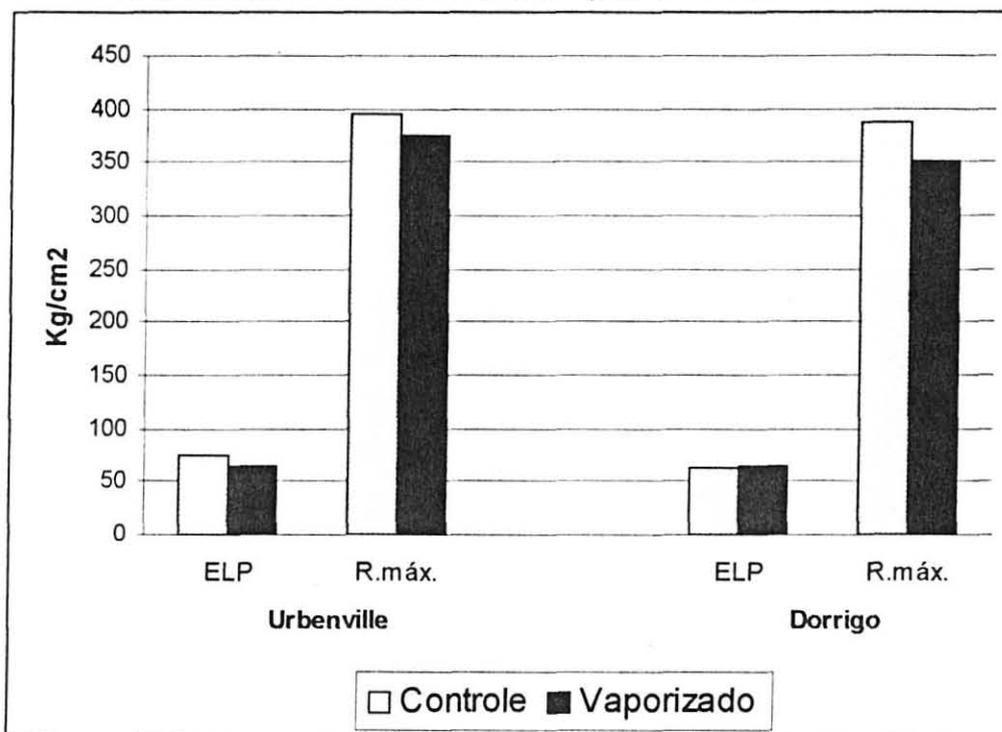
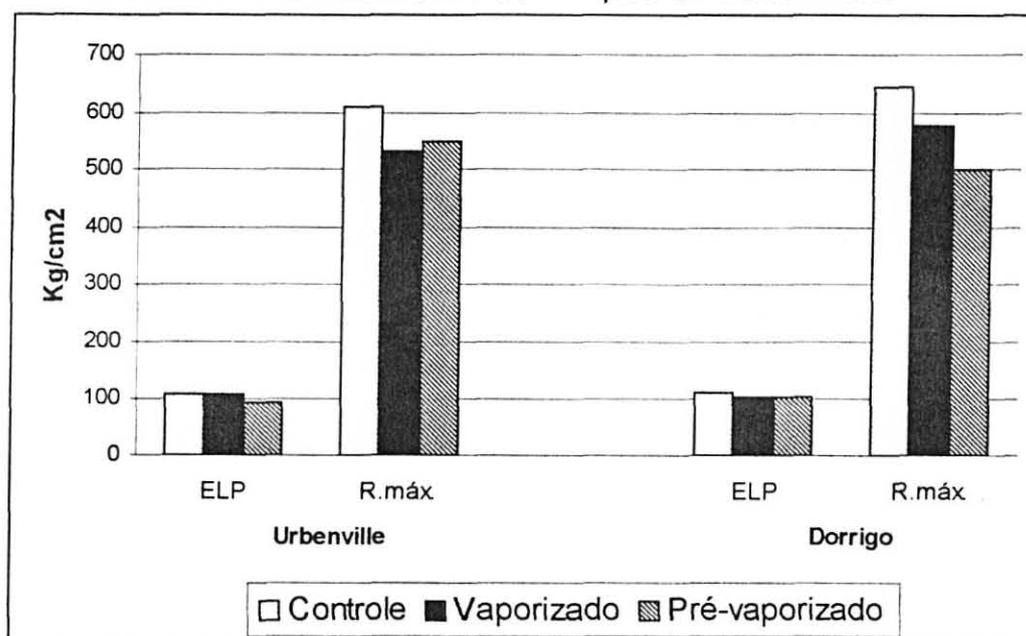


FIGURA 50-EFEITO DOS TRATAMENTOS DE VAPORIZAÇÃO NO ESFORÇO NO LIMITE PROPORCIONAL (ELP) EM COMPRESSÃO PERPENDICULAR AS FIBRAS E RESISTÊNCIA MÁXIMA (R.Máx.) EM COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS NA CONDIÇÃO CLIMATIZADA



- Condição climatizada: entretanto a $R_{m\acute{a}x}$. mostrou decrescer com o nível de vaporização imposto à madeira em ambas as procedências estudadas. Para procedência Urbenville, tanto a vaporização como a pré-vaporização, mostrou reduzir significativamente a $R_{m\acute{a}x}$. em relação ao controle. Já na procedência Dorrigo, qualquer tratamento de vaporização implicou na redução da resistência da madeira (Anexo 4).

c) Cisalhamento

Para o cisalhamento, foi calculada a resistência máxima no sentido radial e tangencial das fibras da madeira de *Eucalyptus dunnii*. Os resultados obtidos para estas propriedades e condições de umidade do estudo são apresentados na tabela 27.

Uma melhor visualização do comportamento da resistência máxima ao cisalhamento no sentido radial e sentido tangencial na condição saturada e climatizada são mostrados nas figuras 51 e 52 respectivamente.

i) Resistência Máxima no Sentido Radial ($R_{m\acute{a}x}$.)

- Condição saturada: não foi observada nenhuma diferença significativa entre os tratamentos empregados.
- Condição climatizada: a $R_{M\acute{a}x}$. no sentido radial mostrou decrescer com a vaporização. Para procedência Urbenville, qualquer tratamento de vaporização empregado mostrou reduzir significativamente a $R_{m\acute{a}x}$. no sentido radial. Já para procedência Dorrigo, somente a pré-vaporização da madeira em relação ao controle mostrou reduzir significativamente a $R_{m\acute{a}x}$.(anexo 4).

TABELA 27 - RESISTÊNCIA MÁXIMA AO CISALHAMENTO NO SENTIDO TANGENCIAL E RADIAL DA MADEIRA.

Procedência	T	Condição do ensaio											
		Saturada						Climatizada					
		n	R.máx. radial (kg/cm ²)	S	n	R.máx. tangencial (kg/cm ²)	S	n	R.máx. radial (kg/cm ²)	S	n	R.máx. tangencial (kg/cm ²)	S
Urbenville	C	12	75,19 A	13,49	12	98,74 A	8,23	12	137,91 A	9,36	15	173,75 A	18,09
	V	12	70,74 A	7,11	12	98,73 A	8,06	13	127,72 B	11,57	13	159,97 B	23,39
	V+PV	na	na	na	na	na	na	16	117,30 C	10,64	15	137,89 C	14,70
Dorriogo	C	12	71,24 A	4,95	12	100,29 A	11,95	15	129,09 A	7,67	14	167,49 A	19,66
	V	11	68,57 A	5,74	12	98,12 A	7,35	15	124,59 AB	11,18	14	156,45 A	16,10
	V+PV	na	na	na	na	na	na	15	118,52 B	11,24	15	141,07 B	15,26

*- Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de 95% de probabilidade;

T - tratamentos; C - controle; V - vaporizada; V+PV - madeira vaporizada em tora e pré-vaporizada na forma de vigotas; n - número de repetições; S - desvio padrão; R.máx. - resistência máxima; na - condição não analisada.

FIGURA 51-EFEITO DOS TRATAMENTOS DE VAPORIZAÇÃO NA RESISTÊNCIA MÁXIMA AO CISALHAMENTO NO SENTIDO RADIAL E TANGENCIAL DA MADEIRA NA CONDIÇÃO SATURADA.

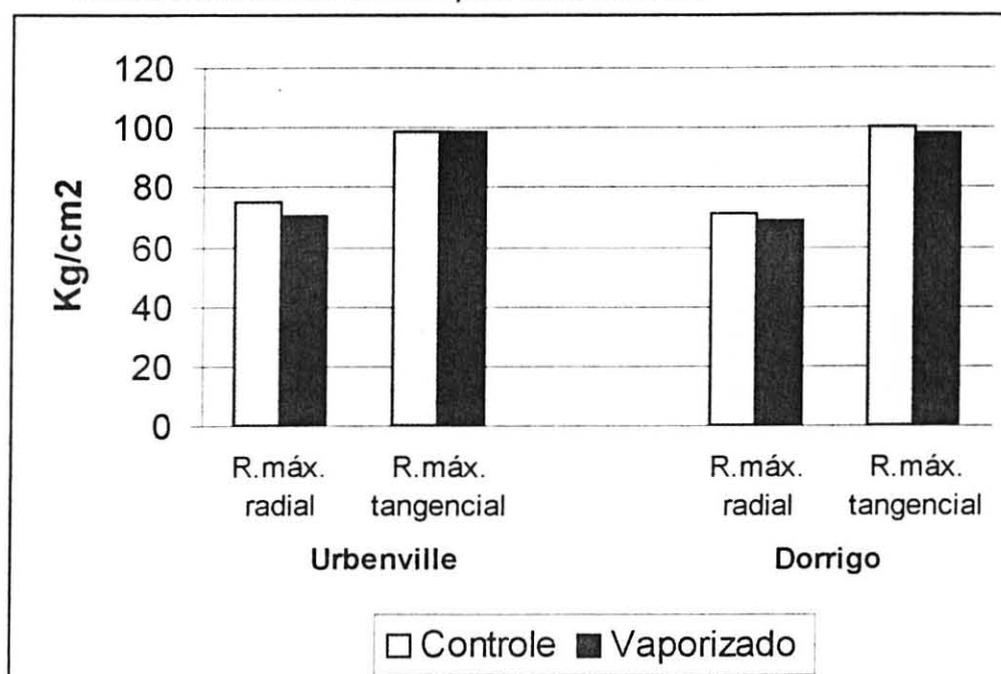
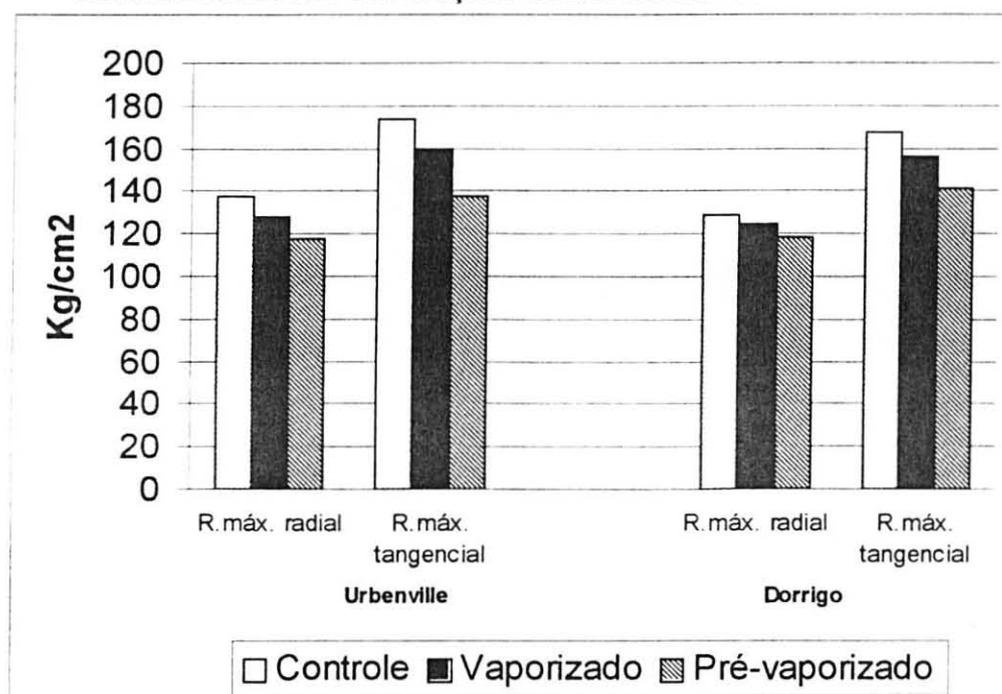


FIGURA 52-EFEITO DOS TRATAMENTOS DE VAPORIZAÇÃO NA RESISTÊNCIA MÁXIMA AO CISALHAMENTO NO SENTIDO RADIAL E TANGENCIAL DA MADEIRA NA CONDIÇÃO CLIMATIZADA.



b) Resistência Máxima no Sentido Tangencial ($R_{m\acute{a}x.}$)

- Condição saturada: não foi observada nenhuma diferença significativa entre os tratamentos empregados.
- Condição climatizada: a $R_{m\acute{a}x.}$ no sentido tangencial mostrou decrescer com a vaporização. Para procedência Urbenville, qualquer tratamento de vaporização empregado mostrou reduzir significativamente a $R_{m\acute{a}x.}$ no sentido tangencial. Entretanto, para procedência Dorrigo, somente a pré-vaporização mostrou reduzir significativamente a $R_{m\acute{a}x.}$ tanto em relação a madeira vaporizada como controle (anexo 4).

4.4.4 Discussão dos Resultados do Efeito da Vaporização nas Propriedades Mecânicas

Conforme pode ser observado nas tabelas 25, 26 e 27, o módulo de ruptura, tensão no limite proporcional e resistência máxima ao cisalhamento no sentido radial e tangencial de forma geral apresentam redução na resistência com a vaporização.

Estas reduções além de significativas são importantes do ponto de vista prático da utilização da madeira.

Entre estas propriedades, o módulo de ruptura (MOR) e a tensão no limite proporcional (TLP) apresentam comportamento muito semelhante, tanto na condição saturada como climatizada. A magnitude dessas reduções chegou a atingir 15% para o MOR e 29% para TLP quando compara-se madeira pré-vaporizada com controle na madeira de *Eucalyptus dunnii*.

Resultados obtidos por vários pesquisadores para estas propriedades indicam perdas de resistência com a temperatura que variam de 4-10%. No entanto, deve-se considerar que estes resultados foram obtidos para o efeito da temperatura de secagem nas propriedades mecânicas (MACLEAN, 1953, 1954, 1956; KOZLIK, 1976, SALAMON, 1963, 1973; TOMASELLI, 1977).

Entretanto, estudos conduzidos em condições que aproximam-se mais da realidade da vaporização indicam resultados muito semelhantes aos alcançados neste estudo.

ROSEN & LAURIE (1983) mostraram que a secagem de Yellow-poplar em vapor saturado à uma temperatura de 125°C proporcionou uma redução no MOR de 8% e 15% na TLP. Enquanto que estudo semelhante conduzido por ROSEN & BODKIN (1981), com esta mesma espécie, mostra reduções de cerca de 16% no MOR e 13% na TLP.

De forma semelhante, a resistência máxima em compressão paralela às fibras, resistência máxima ao cisalhamento no sentido radial e tangencial da madeira apresentaram comportamentos similares.

Porém, para estas propriedades somente foi observado perda significativa de resistência com a vaporização em madeira ensaiada na condição climatizada. A magnitude dessas reduções foi de cerca de 12% para resistência máxima em compressão paralela às fibras e para resistência ao cisalhamento no sentido radial. Já para resistência máxima ao cisalhamento no sentido tangencial esta redução foi de 16%.

São poucas as informações na literatura a respeito desta propriedade, mesmo no que diz respeito ao efeito da temperatura de secagem em ensaios de compressão e cisalhamento.

Estudos realizados em relação a compressão paralela às fibras mostram que em geral esta propriedade não é afetada pela temperatura de secagem (SALAMON, 1963, 1973; SCHNEIDER, 1973, CAMPBELL, 1961; TOMASELLI, 1977).

Um dos poucos estudos que reportam perda de resistência nesta propriedade com a temperatura foi conduzido com madeira de Pinus. Neste estudo, a madeira foi aquecida a 250°C por um período de 1000 segundos (THUNELL & ELKEN, 1948 citado por TOMASELLI, 1977).

Já estudos conduzidos visando avaliar o efeito da temperatura de secagem na resistência ao cisalhamento, além de restritos, mostram-se muitas vezes contraditórios.

Estudos conduzidos por KOZLIK (1976) evidenciam que a resistência máxima ao cisalhamento no sentido radial e tangencial reduzem significativamente com a temperatura a qual madeira foi imposta.

De forma semelhante, PETRI (1967) observou que a madeira de *Birch*, *Aspen* e *Linden* submetidas a vapor super aquecido a uma temperatura de 121°C, reduziu significativamente sua resistência ao cisalhamento quando comparada ao controle.

Por outro lado, estudos conduzidos por CHRISTENSEN & GOUCH (1975) não mostram qualquer redução na resistência máxima ao cisalhamento após a secagem da madeira de *Slash Pine* a 110°C.

Já estudos conduzidos por TOMASELLI (1977), indicam que a resistência máxima no sentido radial da madeira seca à alta temperatura de *Pinus radiata*, reduz significativamente quando comparada ao controle. Entretanto, o autor não observou qualquer redução na resistência máxima no sentido tangencial para as mesmas condições de estudo.

Como pôde ser observado neste estudo, houve uma perda significativa de resistência no módulo de ruptura e tensão no limite proporcional em flexão estática, resistência máxima em compressão paralela às fibras e resistência máxima em cisalhamento no sentido radial e tangencial.

Esta perda de resistência é atribuída à degradação dos componentes da madeira: celulose, hemiceluloses e lignina. Entre estes componentes, as hemiceluloses tem demonstrado ser o componente menos estável e portanto pode ser facilmente degradada.

Para FENGEL & WEGENER (1982), a fragilidade das hemiceluloses deve-se a ausência de cristalinidade, baixa massa molecular e configuração irregular e ramificada, o que facilita a absorção de água e conseqüentemente a degradação.

Essa degradação pode ser ainda muito mais elevada quando a madeira é submetida ao aquecimento em altas umidades relativas (STAMM, 1964; SALAMON, 1969). Segundo SKAAR (1976), em ambientes de alta umidade e calor a degradação ocorre predominantemente por hidrólise ácida, sendo que a taxa de degradação neste caso é maior que a degradação térmica ou pirolítica. A hidrólise ácida faz com que sejam quebrados os grupos acetilas e com isso ocorra a formação de ácido acético, responsável pela degradação da madeira (SUCHSLAND & WOODSON, 1991). Dependendo do pH, e se a concentração de ácido for alta, a degradação por hidrólise torna-se apreciável mesmo em temperaturas inferiores a 100°C (FENGEL & WEGENER, 1982).

Portanto, se considerarmos que a degradação hidrolítica é maior que a degradação térmica ou pirolítica, as reduções obtidas neste estudo embora mais elevadas que as fornecidas pela literatura podem ser consideradas normais.

Existe ainda a possibilidade de que parte da perda de resistência seja devido a presença do colapso, e conseqüente formação de fendas internas (favo de mel). Essa possibilidade torna-

se real no momento que verificou-se no presente estudo que a vaporização da madeira provocou um aumento considerável na intensidade do colapso conforme discutido no item 4.2.2.

Neste estudo, foi verificado ainda que algumas propriedades mecânicas da madeira de *Eucalyptus dunnii* não foram alteradas pela vaporização, enquanto outras demonstraram inclusive aumentar seu valor em relação ao controle.

A exemplo, o esforço no limite proporcional em compressão perpendicular às fibras não demonstrou qualquer alteração com a vaporização (tabela 26).

Poucas informações a respeito do efeito da temperatura de secagem estão disponíveis na literatura. Entretanto, alguns estudos indicam pequenas perdas nesta propriedade com a temperatura (KEYLWERTH, 1952; KOZLIK, 1976), enquanto outros não mostram qualquer alteração (TOMASELLI, 1977).

Já o módulo de elasticidade mostrou aumentar significativamente em relação ao controle, principalmente na condição saturada.

Novamente a literatura a respeito do assunto mostra-se bastante contraditória. Alguns estudos mostram que o módulo de elasticidade tende a reduzir com a temperatura. (ROSEN & LAURIE, 1983; ROSEN & BODKIN, 1981; U.S. FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1987), enquanto outros estudos não demonstram qualquer alteração com a temperatura (COMBEM, 1955, CECH & HUFFMAN, 1974; CHRISTENSEN & GOUGH, 1975; TOMASELLI, 1977; MILLETT & GERHARDS, 1972; KIKATA, 1995). Outros estudos mostram ainda que o módulo de elasticidade tende a aumentar com o emprego da alta temperatura (KEYWERTH, 1952; LANDELL, 1956; PRATT, 1955; SCHNEIDER, 1973).

Entre as possibilidades levantadas para explicar o aumento do módulo de elasticidade estão:

- a) o rearranjo dos componentes da madeira devido a plasticização durante as vaporizações;
- b) eliminação de grande parte dos extrativos solúveis em água, o que ocasionaria sem dúvida a aproximação das micelas umas das outras tornando conseqüentemente a madeira mais rígida.

Estudos conduzidos por KIKATA (1995), realmente confirmam que a madeira vaporizada torna-se mais rígida. Neste estudo, o autor observou que a madeira de *Eucalyptus rubida* após ser submetida a vaporização por 3 horas nas temperaturas de 140°C, 110°C e 90°C reduziu sua taxa de curvatura (vaporizada/controle) para 0,01, 0,39 e 0,49 respectivamente nestas temperaturas.

Com base nos resultados obtidos no estudo pode-se concluir que, com exceção do módulo de elasticidade em flexão estática que apresentam aumento significativo com a pré-vaporização nas condições saturadas e o esforço no limite proporcional em compressão perpendicular às fibras que não mostrou qualquer alteração, as demais propriedades mecânicas reduziram com a vaporização das toras ou pré-vaporização da madeira.

Portanto, cuidados devem ser tomados quando da utilização de madeira de *Eucalyptus dunnii* que tenha sido submetida a processo de vaporização em tora, e posteriormente pré-vaporizada em uma fase preliminar a secagem. Esta perda de resistência é importante principalmente no que se refere a uso estrutural da madeira e portanto, deve ser levada em consideração durante o dimensionamento das peças.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.

Os estudos desenvolvidos com a madeira de *Eucalyptus dunnii* mostraram que esta espécie possui um grande potencial para utilização como madeira sólida, embora, a exemplo das demais espécies desse gênero, apresente problemas de secagem.

No estudo relativo ao efeito da vaporização das toras, no alívio das tensões de crescimento, conclui-se que:

- a) a vaporização das toras por um período de 20 horas, apesar de não eliminar por completo as tensões de crescimento, proporcionou uma redução significativa das mesmas;
- b) de uma forma geral, a procedência Dorriço apresentou um menor nível de tensões de crescimento que a procedência Urbenville em material controle. No entanto, após a vaporização das toras esta vantagem foi eliminada, tornando as duas procedências iguais no relativo as tensões de crescimento.

Com relação ao efeito da vaporização preliminar desta espécie em estufa de laboratório, conclui-se:

- a) o teor de umidade inicial foi significativamente reduzido pela vaporização;
- b) o volume inicial da madeira proveniente de toras controles não foi alterado, entretanto este tratamento reduziu significativamente o volume inicial em madeira proveniente de toras vaporizadas. Esta redução proporcionou um acréscimo na massa específica básica da madeira;
- c) a contração volumétrica total da madeira teve um aumento significativo com a vaporização principalmente em madeira proveniente de toras controle. Esse aumento pode ser atribuído ao aumento do colapso o qual, no entanto, demonstrou ser recuperável com o acondicionamento da madeira;

- d) a taxa de secagem mostrou um aumento significativo principalmente em madeira proveniente de toras controle;
- e) os gradientes de umidade, entre as camadas externas e o centro (referência 3-1) e entre as camadas intermediárias e o centro (referência 2-1) das peças, foram reduzidos com a vaporização tanto em madeira proveniente de toras controles como de toras vaporizadas.

No que diz respeito à secagem em estufa piloto, conclui-se que entre os programas de secagem aplicados a madeira de *Eucalyptus dunnii*, o programa 1 (mais suave) foi o que apresentou a menor porcentagem de defeitos sendo, em ordem de importância: colapso, encanoamento, rachaduras e empenamentos. O tempo de secagem, para secar de 80,2% até 12% de umidade final, foi de 7,5 dias correspondente a uma taxa de secagem de 9,1%/dia. Esta taxa de secagem pode ser considerada elevada para madeira de eucalipto. Os demais programas não apresentaram bons resultados em termos de qualidade de madeira seca, pois apresentaram um aumento acentuado dos níveis de defeitos a ponto de inviabilizar seu emprego.

Com referência ao efeito da vaporização nas propriedades mecânicas da madeira de *Eucalyptus dunnii*, conclui-se que:

- a) A vaporização das toras por um período de 20 horas praticamente não afetou as propriedades mecânicas da madeira.
- b) Quando a madeira foi vaporizada por 20 horas e revaporizada por 3 horas (pré-vaporizada) apresentou uma redução significativa em praticamente todas as propriedades mecânicas, com exceção apenas do Módulo de Elasticidade em flexão estática que demonstrou aumentar significativamente na condição saturada, e o Esforço no Limite Proporcional em compressão perpendicular às fibras que não demonstrou alteração.

Com base nos resultados, discussões e conclusões obtidos neste estudo, recomenda-se:

- a) Adotar a vaporização das toras e a vaporização preliminar das tábuas na produção de madeira de alta qualidade de *Eucalyptus dunnii*.
- b) Desenvolver estudos para definir com maior exatidão limites de tempo e temperatura de vaporização para minimizar o efeito negativo da redução das propriedades mecânicas de resistência da madeira.
- c) Desenvolver estudos para otimizar um programa de secagem visando a maximização de ganhos.

ANEXO 1

ANÁLISE DA VARIÂNCIA PARA AS VARIÁVEIS DO DESDOBRO

Tabela A1-1 - Abertura das tábuas em relação a tora para tábuas das procedências Urbenville e Dorrigo de *Eucalyptus dunnii*.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	
Procedência	1	803,982286	803,982286	5,35	*
Tratamento	1	9038,930545	9038,930545	60,16	*
Procedência X Tratamento	1	1055,658874	1055,658874	7,03	*
Procedência dentro Tratamento 1	1	1931,783099	1931,783099	12,86	*
Procedência dentro Tratamento 2	1	36,222996	36,222996	0,24	ns
Tratamento dentro Procedência 1	1	8246,109492	8246,109492	54,88	*
Tratamento dentro Procedência 2	1	1848,479926	1848,479926	12,3	*
Resíduo	211	31703,14923	150,25189		
TOTAL	214	42601,72093			

Tabela A1-2 - Comprimento das rachaduras para tábuas das procedências Urbenville e Dorrigo de *Eucalyptus dunnii*

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	
Procedência	1	6338,33652	6338,33652	1,83	ns
Tratamento	1	93342,89765	93342,89765	27,00	*
Procedência X Tratamento	1	4883,68838	4883,68838	1,41	ns
Procedência dentro Tratamento 1	1	11317,05014	11317,05014	3,27	ns
Procedência dentro Tratamento 2	1	887,58259	887,58259	0,26	ns
Tratamento dentro Procedência 1	1	71685,71476	71685,71476	20,74	*
Tratamento dentro Procedência 2	1	26540,87128	26540,87128	7,68	*
Resíduo	211	729330,9437	3456,5448		
TOTAL	214	833895,8662			

* significativo ao nível de 95 % de probabilidade; GL = graus de liberdade; SQ = soma dos quadrados; QM = quadrado médio; F = teste F;
 procedência 1 = Urbenville; procedência 2 = Dorrigo;
 tratamento 1 = madeira não vaporizada; tratamento 2 = madeira vaporizada

Tabela A1-3 - Largura das rachaduras para tábuas das procedências Urbenville e Dorrigo de *Eucalyptus dunnii*

Fonte Variação	GL	SQ	QM	F
Procedência	1	2081,634924	2081,634924	3,79 ns
Tratamento	1	9332,125607	9332,125607	16,98 *
Procedência X Tratamento	1	191,808470	191,808470	0,35 ns
Procedência dentro Tratamento 1	1	1494,038911	1494,038911	2,72 ns
Procedência dentro Tratamento 2	1	954,210612	954,210612	1,74 ns
Tratamento dentro Procedência 1	1	6226,429825	6226,429825	11,33 *
Tratamento dentro Procedência 2	1	3297,504252	3297,504252	6,0 *
Resíduo	211	115979,42002	549,66550	
TOTAL	214	127584,98902		

Tabela a1-4 - Variação em espessura para tábuas das procedências Urbenville e Dorrigo de *Eucalyptus dunnii*

Fonte Variação	GL	SQ	QM	F
Procedência	1	0,28598073	0,28598073	0,09 ns
Tratamento	1	5,39980529	5,39980529	1,61 ns
Procedência X Tratamento	1	3,71871356	3,71871356	1,11 ns
Procedência dentro Tratamento 1	1	3,65220836	3,65220836	1,09 ns
Procedência dentro Tratamento 2	1	0,40294139	0,40294139	0,12 ns
Tratamento dentro Procedência 1	1	9,06200710	9,06200710	2,71 ns
Tratamento dentro Procedência 2	1	0,05651175	0,05651175	0,02 ns
Resíduo	211	706,1896399	3,34687033	
TOTAL	214	715,59413953		

* significativo ao nível de 95 % de probabilidade; GL = graus de liberdade; SQ = soma dos quadrados; QM = quadrado médio; F = teste F;
 procedência 1 = Urbenville; procedência 2 = Dorrigo;
 tratamento 1 = madeira não vaporizada; tratamento 2 = madeira vaporizada

ANEXO 2

TESTE “t” PAREADO DE MÉDIAS PARA VAPORIZAÇÃO E SEUS EFEITOS NO
PROCESSO DE SECAGEM

TABELA A2-1- Teste “t” pareado de médias para a variação do volume inicial entre corpos de prova antes e após vaporização para procedência Urbenville proveniente de toras controle.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	2,239412	0,034437						
Vaporizado	2,233412	0,038230	17	0,00600	0,031032	0,797191	16	0,437011 ^{NS}

TABELA A2-2- Teste “t” pareado de médias para o teor de umidade inicial entre corpos de prova antes e após a vaporização para procedência Urbenville proveniente de toras controle.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	83,82238*	9,292093*						
Vaporizado	73,58089*	8,805071*	18*	10,2414*	5,251023*	8,27475*	17*	0,000*

TABELA A2-3- Teste “t” pareado de médias para a contração volumétrica desde a condição verde até o volume seco em estufa após a primeira secagem entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados para procedência Urbenville proveniente de toras controle.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	23,36590*	2,38267*						
Vaporizado	25,27792*	3,31769*	17*	-1,9120*	3,58898*	-2,1965*	16*	0,043 *

TABELA A2-4- Teste “t” pareado de médias para a contração volumétrica desde a condição verde até o volume seco em estufa seguido do condicionamento entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados para procedência Urbenville proveniente de toras controle.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	22,19252	3,376828						
Vaporizado	22,01429	2,792047	17	0,178226	2,417309	0,30399	16	0,765 ^{NS}

Legenda:

m = média da propriedade;

dp = desvio padrão;

n = número de repetições;

d = diferença;

ddp = Diferença no desvio padrão;

t = teste t;

gl = graus de liberdade;

p = probabilidade.

TABELA A2-5- Teste “t” pareado de médias para a intensidade do colapso entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados para procedência Urbenville proveniente de toras controle.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	1,173381*	1,367842*						
Vaporizado	3,263626*	3,752378*	17*	-2,09024	3,698392*	-2,3302*	16*	0,033*

TABELA A2-6 - Teste “t” pareado de médias para a massa específica básica entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados para procedência Urbenville proveniente de toras controle.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	0,568567	0,025567						
Vaporizado	0,571857	0,026844	17	-0,00329	0,020854	-0,6504	16	0,524 ^{NS}

TABELA A2-7 - Teste “t” pareado de médias para o volume inicial em corpos de prova antes e após a vaporização para procedência Dorrigo proveniente de toras controle.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	2,2231	0,048421						
Vaporizado	2,216714	0,036952	21	0,006386	0,02815	1,0395	20	0,310 ^{NS}

TABELA A2-8- Teste “t” pareado de médias para o teor de umidade inicial entre corpos de prova antes e após a vaporização para procedência Dorrigo proveniente de toras controle.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	86,28821*	15,04180*						
Vaporizado	78,11888*	15,64443*	21*	8,1693*	2,7052*	13,8386*	20*	0,00*

Legenda:

m = média da propriedade;

dp = desvio padrão;

n = número de repetições;

d = diferença;

ddp = Diferença no desvio padrão;

t = teste t;

gl= graus de liberdade;

p= probabilidade.

TABELA A2-9- Teste “t” pareado de médias para a contração volumétrica desde a condição verde até o volume seco em estufa após a primeira secagem entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados para procedência Dorrigo proveniente de toras controle.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	24,68324*	1,667363*						
Vaporizado	25,26032*	2,238116*	17*	-0,5770*	0,94387*	-2,5208*	16*	0,022*

TABELA A2-10 - Teste “t” pareado de médias para a contração volumétrica desde a condição verde até o volume seco em estufa seguido do acondicionamento entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados para procedência Dorrigo proveniente de toras controle.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	22,82089	1,400296						
Vaporizado	22,08150	2,549571	17	0,73939	1,909002	1,5969	16	0,129 ^{NS}

TABELA A2-11- Teste “t” pareado para a intensidade do colapso entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados para procedência Dorrigo proveniente de toras controle.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	1,862341*	1,868988*						
Vaporizado	3,178821*	2,993887*	17*	-1,3164*	2,02228*	-2,6840*	16*	0,016*

TABELA A2-12 - Teste “t” pareado de médias para a massa específica básica entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados para procedência Dorrigo proveniente de toras controle.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	0,579409	0,038582						
Vaporizado	0,582537	0,039712	17	-0,00313	0,01002	-1,28696	16	0,216 ^{NS}

Legenda:

m = média da propriedade;

dp = desvio padrão;

n = número de repetições;

d = diferença;

ddp = Diferença no desvio padrão;

t = teste t;

gl = graus de liberdade;

p = probabilidade.

TABELA A2-13 - Teste “t” pareado de médias para a variação do volume em corpos de prova antes e após a vaporização para procedência Urbenville e Dorrigo proveniente de toras controle.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	2023039	0,04298						
Vaporizado	2,224184	0,037959	38	0,006213	0,029066	1,3177	37	0,195 ^{NS}

TABELA A2-14 - Teste “t” pareado de médias para o teor de umidade inicial em corpos de prova antes e após a vaporizados para procedência Urbenville e Dorrigo proveniente de toras controle.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	85,15013*	12,61983*						
Vaporizado	76,02442*	12,99044*	39*	9,12571*	4,157195*	13,7088*	38*	0,00*

TABELA A2-15 - Teste “t” pareado de médias para a contração volumétrica desde a condição verde até o volume seco em estufa após a primeira secagem entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados para procedência Urbenville e Dorrigo proveniente de toras controle.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	24,02457*	2,13248*						
Vaporizado	25,26912*	2,786672*	34*	-1,24455	2,671369*	-2,716*	33*	0,010*

TABELA A2-16 - Teste “t” pareado de médias para a contração desde a condição verde até o volume seco em estufa seguido do acondicionamento entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados para procedência Urbenville e Dorrigo proveniente de toras controle.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	22,5067	2,565370						
Vaporizado	22,0479	2,632960	34	0,458812	2,163607	1,236	33	0,225 ^{NS}

Legenda:

m = média da propriedade;

dp = desvio padrão;

n = número de repetições;

d = diferença;

ddp = Diferença no desvio padrão;

t = teste t;

gl = graus de liberdade;

p = probabilidade.

TABELA A2-17 - Teste "t" pareado para a intensidade docolapso entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados para procedência Urbenville e Dorrigo proveniente de toras controle.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	1,517861*	1,650164*						
Vaporizado	3,221223*	3,342836*	34*	-1,70336	2,96122 *	-3,354*	33*	0,0020*

TABELA A2-18 - Teste "t" pareado de médias para a massa específica básica entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados para procedência Urbenville e Dorrigo proveniente de toras controle.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	0,573988	0,032695						
Vaporizado	0,577197	0,033814	34	-0,00320	0,01611	-1,1615	33	0,2537 ^{NS}

TABELA A2-19 - Teste "t" pareado de médias para o volume inicial entre corpos de prova antes e após a vaporização para procedência Urbenville proveniente de toras vaporizadas.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	2,195500	0,058326						
Vaporizado	2,186107	0,049484	15	0,00939	0,018429	1,974	14	0,068 ^{NS}

TABELA A2-20 - Teste "t" pareado de médias para o teor de umidade inicial em corpos de prova antes e após a vaporização para procedência Urbenville proveniente de toras vaporizadas.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	100,5765*	13,45355*						
Vaporizado	83,0458*	11,84248*	15*	17,5306*	5,341822*	12,71*	14*	0,000*

Legenda:

m = média da propriedade;

dp = desvio padrão;

n = número de repetições;

d = diferença;

ddp = Diferença no desvio padrão;

t = teste t;

gl = graus de liberdade;

p = probabilidade.

TABELA A2-21 - Teste "t" pareado de médias para a contração volumétrica desde a condição verde até o volume seco em estufa após a primeira secagem entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados para procedência Urbenville proveniente de toras vaporizadas.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	23,511*	1,500364*						
Vaporizado	24,67364*	1,613626*	12*	-1,1626*	1,660135*	-2,426*	11*	0,033*

TABELA A2-22 - Teste "t" pareado de médias para a contração volumétrica desde a condição verde até o volume seco em estufa seguido do acondicionamento entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados para procedência Urbenville proveniente de toras vaporizadas.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	20,80224	1,593222						
Vaporizado	20,61952	1,52923	12	0,182714	2,54014	0,2491	11	0,807 ^{NS}

TABELA A2-23- Teste "t" pareado para a intensidade do colapso entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados para procedência Urbenville proveniente de toras vaporizadas.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	2,70876*	1,26768*						
Vaporizado	4,054112*	1,573356*	12*	-1,3453*	2,04676*	-2,276*	11*	0,043*

TABELA A2-24 - Teste "t" pareado de médias para a massa específica básica entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados para procedência Urbenville proveniente de toras vaporizadas.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	0,516231	0,034979						
Vaporizado	0,532511	0,046239	12	-0,01628	0,029599	-1,9054	11	0,0831 ^{NS}

Legenda:

m = média da propriedade;

dp = desvio padrão;

n = número de repetições;

d = diferença;

ddp = Diferença no desvio padrão;

t = teste t;

gl = graus de liberdade;

p = probabilidade.

TABELA A2-25 - Teste "t" pareado de médias para a variação do volume em corpos de prova antes e após a vaporização para procedência Dorrigo proveniente de toras vaporizadas.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	2,20878	0,059173						
Vaporizado	2,190280	0,055691	10	0,0185	0,02865	2,0417	9	0,071 ^{NS}

TABELA A2-26 - Teste "t" pareado de médias para o teor de umidade inicial em corpos de prova antes e após a vaporizados para procedência Dorrigo proveniente de toras vaporizadas.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	94,19224*	23,52441*						
Vaporizado	80,25561*	21,75936*	10*	13,9366*	2,101134*	20,975 *	9*	0,0000*

TABELA A2-27- Teste "t" pareado de médias para a contração desde a condição verde até o volume seco em estufa após a primeira secagem entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados para procedência Dorrigo proveniente de toras vaporizadas.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	24,41536	1,980912						
Vaporizado	24,6512	1,309465	10	-0,23584	2,02578	-0,3681	9	0,7212 ^{NS}

TABELA A2-28- Teste "t" pareado de médias para a contração desde a condição verde até o volume seco em estufa seguido do acondicionamento entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados para procedência Dorrigo proveniente de toras vaporizadas.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	20,5218	3,847471						
Vaporizado	19,71231	3,980312	10	0,80949	2,47532	1,0341	9	0,3280 ^{NS}

Legenda:

m = média da propriedade;

dp = desvio padrão;

n = número de repetições;

d = diferença;

ddp = Diferença no desvio padrão;

t = teste t;

gl = graus de liberdade;

p = probabilidade.

TABELA A2-29- Teste “t” pareado para o colapso entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados para procedência Dorrigo proveniente de toras vaporizadas.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	3,89356	2,883735						
Vaporizado	4,93889	3,869837	10	-1,04533	1,820534	-1,8157	9	0,1027 ^{NS}

TABELA A2-30- Teste “t” pareado de médias para a massa específica básica em corpos de prova não vaporizados e vaporizados para procedência Dorrigo proveniente de toras vaporizadas.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	0,544428	0,077588						
Vaporizado	0,563818	0,088957	10	-0,01939	0,03556	-1,724	9	0,118 ^{NS}

TABELA A2-31 - Teste “t” pareado de médias para a variação do volume em corpos de prova antes e após a vaporização para procedência Urbenville e Dorrigo proveniente de toras vaporizadas.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	2,200812*	0,057806*						
Vaporizado	2,187776*	0,050949*	25*	0,01336	0,022950*	2,84*	24*	0,0090*

TABELA A2-32 - Teste “t” pareado de médias para o teor de umidade inicial em corpos de prova antes e após a vaporizados para procedência Urbenville e Dorrigo proveniente de toras vaporizadas.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	98,02277*	17,98043*						
Vaporizado	81,92975*	16,16498*	25*	16,093*	4,640060*	17,3*	24*	0,0000*

Legenda:

m = média da propriedade;

dp = desvio padrão;

n = número de repetições;

d = diferença;

ddp = Diferença no desvio padrão;

t = teste t;

gl = graus de liberdade;

p = probabilidade.

TABELA A2-33 - Teste "t" pareado de médias para a contração desde a condição verde até o volume seco em estufa após a primeira secagem entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados para procedência Urbenville e Dorrigo proveniente de toras vaporizadas.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	23,92207	1,753082						
Vaporizado	24,66344	1,44875	22	-0,74137	1,85082	-1,878	21	0,0742 ^{NS}

TABELA A2-34 - Teste "t" pareado de médias para a contração desde a condição verde até o volume seco em estufa seguido do acondicionamento entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados para procedência Urbenville e Dorrigo proveniente de toras vaporizadas.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	20,67477	2,77384						
Vaporizado	20,20715	2,86854	22	0,46761	2,47139	0,887	21	0,3848 ^{NS}

TABELA A2-35 - Teste "t" pareado para o colapso entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados para procedência Urbenville e Dorrigo proveniente de toras vaporizadas.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	3,247307*	2,18413*						
Vaporizado	4,456285*	2,81391*	22*	-1,2089*	1,907396*	-2,97*	21*	0,0072*

TABELA A2-36 - Teste "t" pareado de médias para a massa específica básica em corpos de prova não vaporizados e vaporizados para procedência Urbenville e Dorrigo proveniente de toras vaporizadas.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Não vaporizado	0,529048*	0,05854*						
Vaporizado	0,546742*	0,06904*	22*	-0,0176*	0,03167*	-2,62*	21*	0,0159*

Legenda:

m = média da propriedade;

dp = desvio padrão;

n = número de repetições;

d = diferença;

ddp = Diferença no desvio padrão;

t = teste t;

gl = graus de liberdade;

p = probabilidade.

ANEXO 3

TESTE “t” PAREADO DE MÉDIAS PARA A TAXA DE SECAGEM E GRADIENTE DE UMIDADE

TABELA A3-1 - Teste "t" pareado de média para a taxa de secagem entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados da procedência Urbenville proveniente de toras controle.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Vaporizado	0,007062	0,000816						
Controle	0,006898	0,000895	4	0,000164	0,000195	1,678	3	0,1918 ^{NS}

TABELA A3-2 - Teste "t" pareado de médias para a taxa de secagem entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados da procedência Dorrigo proveniente de toras controle.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Vaporizado	0,007256*	0,000672*						
Controle	0,006705*	0,000632*	4*	0,00055*	0,000274*	4,02*	3	0,0275*

TABELA A3-3 - Teste "t" pareado de médias para a taxa de secagem entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados das procedências Urbenville e Dorrigo proveniente de toras controle.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Vaporizado	0,007159*	0,000700*						
Controle	0,006801*	0,000725*	8*	0,00035*	0,000303*	3,34*	7*	0,01232*

Legenda:

m = média da propriedade;

dp = desvio padrão;

n = número de repetições;

d = diferença;

ddp = Diferença no desvio padrão;

t = teste t;

gl = graus de liberdade;

p = probabilidade.

TABELA A3-4 - Teste "t" pareado de médias para a taxa de secagem entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados da procedências Urbenville proveniente de toras vaporizadas.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Vaporizado	0,005419	0,000277						
Controle	0,005522	0,001055	3	-0,00010	0,001148	-,156	2	0,890039 ^{NS}

TABELA A3-5 - Teste "t" pareado de médias para a taxa de secagem de corpos de prova não vaporizados e vaporizados da procedência Dorrigo proveniente de toras vaporizadas.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Vaporizado	0,007213	0,000341						
Controle	0,006708	0,000571	4	0,000505	0,000369	2,734	3	0,07163 ^{NS}

TABELA A3-6 - Teste "t" pareado de médias para a taxa de secagem entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados das procedências Urbenville e Dorrigo proveniente de toras vaporizadas.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Vaporizado	0,006444	0,001002						
Controle	0,006200	0,000968	7	0,000244	0,00078	0,8249	6	0,44094 ^{NS}

Legenda:

m = média da propriedade;
 dp = desvio padrão;
 n = número de repetições;
 d = diferença;
 ddp = Diferença no desvio padrão;
 t = teste t;
 gl = graus de liberdade;
 p = probabilidade.

TABELA A3-7 - Teste "t" pareado de média para o gradiente de umidade entre a camada central e externa entre corpos de não vaporizados e vaporizados da procedência Urbenville proveniente de toras controle.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Vaporizado	14,43833*	7,493536*						
Controle	18,79117*	6,975494*	6*	-4,3528*	2,688373*	-3,966*	5*	0,0106*

TABELA A3-8 - Teste "t" pareado de médias para o gradiente de umidade entre a camada central e externa entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados da procedência Dorrigo proveniente de toras controle.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Vaporizado	19,26287*	13,74907*						
Controle	22,08564*	15,30537*	14*	-2,8227*	4,451483*	-2,372*	13*	0,033*

TABELA A3-9 - Teste "t" pareado de médias para o gradiente de umidade entre a camada central e externa entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados das procedências Urbenville e Dorrigo proveniente de toras controle.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Vaporizado	17,81550*	12,21734*						
Controle	21,09730*	13,24701*	20*	-3,2818*	3,997192*	-3,671*	19*	0,001*

TABELA A3-10- Teste "t" pareado de médias para o gradiente de umidade entre a camada central e intermediária entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados da procedência Urbenville proveniente de toras controle.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Vaporizado	4,970500	0,779540						
Controle	5,998500	1,738050	6	-1,0280	1,063597	-2,367	5	0,0641 ^{NS}

Legenda:

m = média da propriedade;

dp = desvio padrão;

n = número de repetições;

d = diferença;

ddp = Diferença no desvio padrão;

t = teste t;

gl = graus de liberdade;

p = probabilidade.

TABELA A3-11 - Teste "t" pareado de médias para o gradiente de umidade entre a camada central e intermediária entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados da procedência Dorrigo proveniente de toras controle.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Vaporizado	4,448043	2,444603						
Controle	5,114143	2,521849	14	-0,66610	1,175728	-2,1198	13	0,0538 ^{NS}

TABELA A3-12 - Teste "t" pareado de médias para o gradiente de umidade entre a camada central e intermediária entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados das procedências Urbenville e Dorrigo proveniente de toras controle.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Vaporizado	4,60478*	2,07585*						
Controle	5,37945*	2,30634*	20*	-0,7746*	1,12803*	-3,071*	19*	0,0062*

TABELA A3-13 - Teste "t" pareado de médias para o gradiente de umidade entre a camada central e externa entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados da procedência Urbenville proveniente de toras vaporizadas.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Vaporizado	16,70678*	11,77482*						
Controle	19,10956*	11,52327*	9*	-2,4027*	2,918886*	2,4695*	8	0,0387*

TABELA A3-14 - Teste "t" pareado de médias para o gradiente de umidade entre a camada central e externa entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados da procedência Dorrigo proveniente de toras vaporizadas.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Vaporizado	18,27777*	13,01686*						
Controle	20,08454*	12,87979*	13*	-1,8067*	2,875373*	-2,265*	12*	0,0427*

Legenda:

m = média da propriedade;

dp = desvio padrão;

n = número de repetições;

d = diferença;

ddp = Diferença no desvio padrão;

t = teste t;

gl = graus de liberdade;

p = probabilidade.

TABELA A3-9 - Teste "t" pareado de médias para o gradiente de umidade entre a camada central e a externa entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados da procedência Urbenville e Dorrigo provenientes de toras vaporizadas.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Vaporizado	17,63509*	12,25826*						
Controle	19,68568*	12,06729*	22*	-2,0505*	2,839027*	-3,387*	21*	0,0027*

TABELA A3-10 - Teste "t" pareado de média para o gradiente de umidade entre a camada central e intermediária entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados de procedência Urbenville proveniente de toras vaporizadas.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Vaporizado	3,361111*	0,925282*						
Controle	3,875333*	1,089272*	9*	-0,51422*	0,587315*	-2,6266	8*	0,030*

TABELA A3-11 - Teste "t" pareado de médias para o gradiente de umidade entre a camada central e intermediária entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados de procedência Dorrigo proveniente de tora vaporizada.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Vaporizado	4,105462	2,351459						
Controle	4,433538	2,156256	13	-0,32808	0,829922	-1,4253	12	0,1795 ^{NS}

TABELA A3-12 - Teste "t" pareado de médias para o gradiente de umidade entre a camada central e intermediária entre corpos de prova não vaporizados e vaporizados de procedência Urbenville e Dorrigo proveniente e toras vaporizado.

Variáveis	m	dp	n	d	ddp	t	gl	p
Vaporizado	3,800955*	1,904232*						
Controle	4,205182*	1,785424*	22*	-0,4042*	0,730591*	-2,595*	21*	0,0168*

Legenda:

m = média da propriedade;

dp = desvio padrão;

n = número de repetições;

d = diferença;

ddp = Diferença no desvio padrão;

t = teste t;

gl = graus de liberdade;

p = probabilidade.

ANEXO 4
ANÁLISE DA VARIÂNCIA PARA AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA
NAS CONDIÇÕES SATURADA E CLIMATIZADA (CORRIGIDA PARA 12 % DE
UMIDADE)

TABELA A4-1 -: MÓDULO DE ELASTICIDADE EM FLEXÃO ESTÁTICA

Fonte Variação	GL	SQ	QM	F
UMIDADE	1	30.4445,6	30.4445,6	268,02**
TRATAMENTOS	2	33678,11	16839,05	14,82*
PROCEDÊNCIAS	1	2736,81	2736,81	2,41 ^{ns}
TRATAMENTO DENTRO CLIMATIZADA	2	4395,92	2197,96	1,93 ^{ns}
. Tratamento dentro climatizada Urbenville	2	7772,57	3886,28	3,42*
. Tratamento dentro climatizada Dorrigo	2	342,8	171,40	0,15 ^{ns}
TRATAMENTO DENTRO SATURADA	2	36499,17	18249,58	16,07**
. Tratamento dentro saturada Urbenville	2	27710,90	13855,45	12,20**
. Tratamento dentro saturada Dorrigo	2	11269,57	5634,78	4,96**
Outras interações	10	50082,35	-	-
RESIDUO	431	489576,86	1135,90	
TOTAL	442	838527,49		

* significativo ao nível de 95% de probabilidade; * significativo ao nível de 99% de probabilidade; ns= não significativo; tratamento 1 = madeira controle; tratamento 2=- madeira vaporizada; tratamento 3= madeira pré-vaporizada.

TABELA A4-2: TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL EM FLEXÃO ESTÁTICA

Fonte Variação	GL	SQ	QM	F
UMIDADE	1	8238039,6	8238039,6	842,4**
TRATAMENTOS	2	274.2233,1	1371116,6	140,2**
PROCEDÊNCIAS	1	23604,1	23604,1	2,41 ^{NS}
TRATAMENTO DENTRO CLIMATIZADA	2	2640239,53	1320119,76	134,9**
. Tratamento dentro climatizada Urbenville	2	954214,09	477107,04	48,79**
. Tratamento dentro climatizada Dorrigo	2	1754177,1	877088,55	89,69**
TRATAMENTO DENTRO SATURADA	2	761631,73	380815,86	38,98*
. Tratamento dentro saturada Urbenville	2	304615,39	152307,69	15,57**
. Tratamento dentro saturada Dorrigo	2	473559,9	236779,98	24,2**
Outras interações	10	3511627,7	-	-
RESIDUO	430	4205213,81	9779,57	
TOTAL	441	161.26828,54		

* significativo ao nível de 95 % de probabilidade; * significativo ao nível de 99% de probabilidade; ns= não significativo; tratamento 1 = madeira controle; tratamento 2=- madeira vaporizada; tratamento 3= madeira pré-vaporizada.

TABELA A4-3: MÓDULO DE RUPTURA EM FLEXÃO ESTÁTICA

Fonte Variação	GL	SQ	QM	F
UMIDADE	1	7561179,16	7561179,16	619,01**
TRATAMENTOS	2	1385327,0	692663,5	56,71**
PROCEDÊNCIAS	1	5704,5	5704,5	0,47 ^{ns}
TRATAMENTO DENTRO CLIMATIZADA	2	1776459,9	888229,9	72,72**
. Tratamento dentro climatizada Urbenville	2	758120,146	379060,0	31,03**
. Tratamento dentro climatizada Dorrigo	2	1038519,0	519259,5	42,51**
TRATAMENTO DENTRO SATURADA	2	253714,3	126857,1	10,39**
. Tratamento dentro saturada Urbenville	2	75684,5	37842,2	3,10*
. Tratamento dentro saturada Dorrigo	2	201691,49	100845,7	8,26**
Outras interações	10	2154588,5	-	-
RESIDUO	431	5264656,8	12214,9	
TOTAL	442	15006255,9		

* significativo ao nível de 95 % de probabilidade; * significativo ao nível de 99 % de probabilidade; ns= não significativo; tratamento 1 = madeira controle; tratamento 2=- madeira vaporizada; tratamento 3= madeira pré-vaporizada.

TABELA A4-4 - ESFORÇO NO LIMITE PROPORCIONAL EM COMPRESSÃO PERPENDICULAR AS FIBRAS

Fonte Variação	GL	SQ	QM	F
UMIDADE	1	43445,42	43445,42	251**
TRATAMENTOS	2	2732,14	1366,07	7,89**
PROCEDÊNCIAS	1	14,20	14,20	0,08 ^{ns}
TRATAMENTO DENTRO CLIMATIZADA	2	1102,4	551,19	3,18*
. Tratamento dentro climatizada Urbenville	2	1145,65	572,8	3,31*
. Tratamento dentro climatizada Dorrigo	2	317,6	158,8	0,92 ^{ns}
TRATAMENTO DENTRO SATURADA	1	275,84	275,84	1,59 ^{ns}
. Tratamento dentro saturada Urbenville	1	814,43	814,43	4,71*
. Tratamento dentro saturada Dorrigo	1	21,9	21,9	0,13 ^{ns}
Outras interações	10	3028,14	-	-
RESIDUO	107	18520,28	173,08	
TOTAL	116	67105,79	-	

* significativo ao nível de 95 % de probabilidade; * significativo ao nível de 99 % de probabilidade; ns= não significativo; tratamento 1 = madeira controle; tratamento 2=- madeira vaporizada; tratamento 3= madeira pré-vaporizada.

TABELA A4-5 - RESISTÊNCIA MÁXIMA EM COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS

Fonte Variaçãp	GL	SQ	QM	F
UMIDADE	1	1054324,0	1054324,0	216,11**
TRATAMENTOS	2	89903,3	44951,67	9,21**
PROCEDÊNCIAS	1	1,633	1,633	0,0 ^{ns}
TRATAMENTO DENTRO CLIMATIZADA	2	125416,1	62708,05	12,85**
. Tratamento dentro climatizada Urbenville	2	43079,84	21539,92	4,42*
. Tratamento dentro climatizada Dorrigo	2	115489,8	57744,9	11,8**
TRATAMENTO DENTRO SATURADA	1	9607,9	9607,9	1,97 ^{ns}
. Tratamento dentro saturada Urbenville	1	2663,07	2663,07	0,55 ^{ns}
. Tratamento dentro saturada Dorrigo	1	7571,8	7571,8	1,55 ^{ns}
Outras interações	10	175116,57	-	-
RESIDUO	113	551285,5	4878,63	
TOTAL	122	1865951,6		

* significativo ao nível de 95% de probabilidade; * significativo ao nível de 99 % de probabilidade; ns= não significativo; tratamento 1 = madeira controle; tratamento 2= madeira vaporizada; tratamento 3= madeira pré-vaporizada.

TABELA A4-6 - RESISÊNCIA MÁXIMA EM CISALHAMENTO NO SENTIDO RADIAL

Fonte Variação	GL	SQ	QM	F
UMIDADE	1	89630,9	89630,9	936,3**
TRATAMENTOS	2	7823,22	3911,6	40,86**
PROCEDÊNCIAS	1	372,37	372,37	3,89 ^{ns}
TRATAMENTO DENTRO CLIMATIZADA	2	3501,49	1750,74	18,29**
. Tratamento dentro climatizada Urbenville	2	2935,59	1467,79	15,33**
. Tratamento dentro climatizada Dorrigo	2	843,13	421,56	4,4*
TRATAMENTO DENTRO SATURADA	1	149,03	149,03	1,56 ^{ns}
. Tratamento dentro saturada Urbenville	1	118,69	118,69	1,24 ^{ns}
. Tratamento dentro saturada Dorrigo	1	41,22	41,22	0,43 ^{ns}
Outras interações	10	4186,55	-	-
RESIDUO	123	11773,89	95,72	
TOTAL	132	103933,6		

* significativo ao nível de 95% de probabilidade; * significativo ao nível de 99% de probabilidade; ns= não significativo; tratamento 1 = madeira controle; tratamento 2=- madeira vaporizada; tratamento 3= madeira pré-vaporizada.

TABELA A4-7 - RESISTÊNCIA MÁXIMA EM CISALHAMENTO NO SENTIDO TANGENCIAL

Fonte Variação	GL	SQ	QM	F
UMIDADE	1	99287,7	99287,7	417,9**
TRATAMENTOS	2	2836,58	1418,29	5,97**
PROCEDÊNCIAS	1	17,74	17,74	0,07 ^{ns}
TRATAMENTO DENTRO CLIMATIZADA	2	14395,7	7197,85	30,3**
. Tratamento dentro climatizada Urbenville	2	9680,83	4840,4	20,37**
. Tratamento dentro climatizada Dorrigo	2	5120,25	2560,12	10,38**
TRATAMENTO DENTRO SATURADA	1	14,28	14,28	0,06 ^{ns}
. Tratamento dentro saturada Urbenville	1	0,00	0,00	0,00 ^{ns}
. Tratamento dentro saturada Dorrigo	1	28,39	28,39	0,12 ^{ns}
Outras interações	10	19087,86	-	-
RESIDUO	124	29460,8	237,58	
TOTAL	133	143067,13		

* significativo ao nível de 95% de probabilidade; * significativo ao nível de 99% de probabilidade; ns= não significativo; tratamento 1 = madeira controle; tratamento 2=- madeira vaporizada; tratamento 3= madeira pré-vaporizada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, E.; MOORE, G.; BRAZIER, J. The effect of flame-retardant treatments on some mechanical properties of wood, Building Research Establishment information paper IP 24/79. Princes Risborough, 1979.
- AGUIAR, O. JR. *Métodos para controle das rachaduras de topo para toras de Eucalyptus grandis Hill ex. Maiden, visando a produção de lâminas para desenrolamento.* Piracicaba, 1986. Dossertação (Mestrado em Engenharia Florestal) Universidade de São Paulo.
- ALEXION, P.N., WILKINS, A. P., HARTLEY, J. Effect of presteaming on drying rate. Wood anatomy and shrinkage of regrowth *Eucalyptus pilularis* Sm. *Wood Sci. Technology*, New York, v.24, p103-10, 1990.
- ALEXIOU, P. N., MARCHANT, J. F. Effect of pre-steaming on moisture gradients, drying stresses and sets, and fuse checking in regrowth *Eucalyptus pilularis* Sm. *Wood Sci. Technol.*, 24: 201-209, 1990.
- ANDRADE, E. N. *O eucalipto 2 ed.* São Paulo, FEPASA, 1961.
- AVRAMIDIS, S., OLIVEIRA, L. Influence of presteaming on Kiln-drying of thick hemfir lumber. *For. Prod. J.*, v.43, n.11/12, p.7-12, 1993.
- BARISKA, M., KNUFFEL, W.E., VAN RENSBURG, Z. Literature survey on selected properties of Eucalypts. Part II - collapse, shrinkage and drying characteristics. CSIR subject survey O/Hout 64, Pretoria, South Africa. Project n. TP/44345, 1987.
- BARNACLE, J. E., GOTTSTEIN, J. W. Control of end-splitting in tound timber: A promising new method. *Technical Notes*. F. P. CSIRO, Melbourne, n.4, p.8, 1968.
- BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O. *A madeira das espécies de eucalipto como matéria-prima para a indústria de celulose e papel.* Brasília. PRODEPEF, 1976. 145p. Série Divulgação 13, 145p. 1976.
- BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O. A utilização a utilização de madeira na produção de celulose, *circulação técnica IPEF*. Piracicaba (68):1-16, 1979.
- BARRICHELO, L.E.G, BRITO, J.O., MIGLIORINI, A.J. Estudo da variação longitudinal da densidade básica de *Eucalyptus* spp. *Silvicultura*, São Paulo, n.28, p.726- 31, 1983.
- BENDTSEN, B. A.; FREESE, F.; ETHINGTON, R. L. A forest samfling method for wood strength. *For prod. J.*, 20 (11):38-47, 1970.

- BENVENUTI, R. R. *An investigation of methods of increasing the permeability of loblolly pine*. M.S. thesis, Dept of Wood Sci, and Tech., North Carolina state Univ., Raleigh. N.C. 1963.
- BLUHM, E., KAUMAN, W.G. El colapso en la madera y su reacondicionamento. *Informe Técnico. Instituto Forestal*, Santiago, Chile, n.22, p.1-23, 1965.
- BODIG, J., JAYNE, B.A. *Mechanics of wood and wood composites*. New York, Van Nostrand Reinhold Co., 1982. 712p.
- BOYD, J. D. Tree growth Stresses V. Evidence of an origin in differentiation and lignification. *Wood Science and technol.*, v.6, p.251-62, 1972.
- BOYD, J. D. Tree growth stresses. III. The origen of growth stresses. *Australian Journal of Scientific Research*, v.3, n.3, p.294-309, 1950c.
- BOYD, J.D. Tree growth stresses: I. Growth stresses evaluation. *Australian Journal of Scientific Research. Série B - Biological Sciences*. Melbourne. v.3, p.270-293. , 1950a.
- BRAMHALL, G., WELLWOOD, R.W. Kiln drying of western Canadian lumber. *Information Report, VP-X*, Vancouver, n.156, p.1-111, 1976.
- BRASIL, M, VEIGA, R.A, FERREIRA, M. Variação da densidade básica nas seções transversais do caule da base do tronco para a copa de eucalipto. *IPEF*, Piracicaba, n.15, p.73-82, 1977.
- BRASIL, M. A. M.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica e das características das fibras em *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden ao nível do DAP. *IPEF*, Piracicaba, n.4 p. 81-90, 1972.
- BRENNAN, L. J., FRICKE, K. W., KAUMAN, W. G., WRIGHT, G. W. Pre-drying in Australia. *The Australian timber J.*, Congress Issue, December: p.360-9, 1966.
- BRITO, J.O., BARRICHELO, L. E. M. Correlações entre características, físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I. Densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. *IPEF*, Piracicaba, n.14, p.9-20, 1977.
- BROWN, H.P., PANSHIN, A.J., FORSAITH, C.C. Wood in relation to moisture. In: *TEXTBOOK OF WOOD TECHNOLOGY*. New York: McGraw-Hill, v.2, Cap.3, p.61-98, 1952.
- BROWN, W.H. *The conversion and seasoning of wood* London. Stobart & Son Ltd. 1988. 221p.
- CALVERT, W. W. High-temperature kiln drying of eastern canadian species *Can. wood Prod. Ind.* 5 (7) 34-39, 1965.

- CALIL JUNIOR, C.; SALES, A; FUSCO, P.B. *Valores médios usuais de resistência e rigidez de algumas madeira nativa e de forestamento*: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1996, 4p, (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, BT/PEF?9607).
- CAMPBELL, G. S. The value of presteaming for drying some collapse-susceptible *Eucalypts*. *Forest. Prod. J.*, v.11, n:8, p.334-7, 1961.
- CAMPBELL, G.S., HARTLEY, J. Drying and dried wood. Chapter 16 in "Eucalypts for Wood Production", Hillis, W.E. and Brown, A.G. CSIRO, Australia. 1978.
- CECH, M. Y., PFAFF, F. *Kiln Operators Manual of Eastern Canada*. Ontario: Eastern For. Prod. Lab, 1977, 189 p.
- CECH, M.Y. The status of high-temperature kiln drying in Eastern Canada. *Can. For. Ind.*, v.93, n.8, p.63-71, 1973.
- CECH, M.Y., PFAFF, F. *Kiln Operators Manual of Eastern Canada*. Ontario: Eastern For. Prod. Lab., 1977. 189p.
- CECH, M.Y.; HUFFMAN. High-temperature drying of mixed spruce, Jack pine, and balsam fir. Can. For. Dep. Environmente. Publ. N. 1337. 15p. 1974.
- CHAFE, S. C. Effect of brief presteaming on shrinkage, collapse and other wood-water relationships in *Eucalyptus regnans* F Muell. *Wood Sci. Technol.*, New York, v.24, p.311-26, 1990.
- CHAFE, S. C. Growth stresses in trees. *Australian For. Res.*, v.9, p.203-23, 1979.
- CHEN, P. Y. S. The effect of Steameng time and temperature on the longitudinal permeability of black Walnut heartwood. *Wood Fiber*, v.7, p.222-5, 1975.
- CHRISTENSEN, F.J. High temperature drying of hardwoods increases kiln throughput. New Series n.2. *Forest Products Newsletters*, outubro, 1985.
- CHRISTENSEN, F.J. Recent research on the high temperature drying of sawn *Eucalyptus delegatensis* below fibre saturation point. Proc. 21st. *For. Prod. Res. Conf.*, Clayton, november, 1984.
- CHRISTENSEN, F.J.; GOUGH, D.K. Control of drying distortion in framing from young plantation slash pine. CSIRO. *Div. Buid. Res.*, Rpt n. 44. 1975.
- COMBEN, A. J. The effect of high temperature kiln drying on the strength properties of timber. *Wood*. v.20, n.8, p.311-3, 1955.
- COMISION PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS - COPANT. Maderas: metodo de ensayo de flexion estatico. COPANT 555, 1973.

- COMISION PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS - COPANT. Maderas: metodo de determinação del cizalhamento paralelo al grano. COPANT 463, 1972.
- COMISION PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS-COPANT. Maderas: método de determinacion de la compresión axial a paralela al grana. COPANT 464, 1972.
- COMISION PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS-COPANT. Maderas: método de determinacion de la compresión perpendicular al grana. COPANT 466, 1972.
- COMSTOCK, G. L. Longitudinal permeability of green eastern hemlock. *Forest Prod. J.*, v.15, n.10, p.441-9. 1965.
- CONRADIE, W.E. *Utilization of South African Grown E. grandis (W. Hill ex.:MAiden) as veneer log: Part 1 - Control of End-splitting in veneer logs.* Pretoria: National Timber Research Institute, 1980. 14p.
- CUPPETT, D. G., GRAFT. Kiln-drying of pre-surfaced 4/4 appalachion OAK. *For Prod. J.*, v.22, n.6, p.36-41, 1972.
- DAVIS, W. H., THOMPSON, W. S.. Influence of thermal treatments of schort duration on the toughness and chemical composition of wood. *For. Prod. J.*, v.14, p.350-456, 1964.
- De VILLIERS, A.M. Utilization problems with some eucalipts in South Africa. In: IUFRO-5 MEETING (1973: Cape Town, RSA). *Proceedings.* Republic of South Africa, 1973, v.2, p.238-55, 1973.
- DINWOODIE, J.M. Growth stresses in timber - A review of literature. *Forestry*, v.39, n.2, p.162-70, 1966.
- EATON, R. L.; HALE, M. D. C. Wood: Decay, pest and protection. London. Chapman & Hall. 1993.
- EDDY, A. A., GRAHAM, B. D. The effect of drying conditions on strenght of coast-type douglas-fir. *For. Prod. J.*, v.5, n.4, p.226-9, 1955.
- ELDRIDGE, K. Role of Eucalyptus plantation abroad. Research working group 1 Burnie, *Australian forestry council*, pp. 87-88. 1986.
- ELDRIDGE, K.; CROMER, R. N. Adaptation and physiology of Eucalyptus in relation to genetic improvement. In: SIMPOSIO SOBRE SIVICULTRA Y MEJORAMIENTO GENÉTICO DE ESPÉCIES FORESTALES: BUENOS AIRES, CIEF, pp. 1-15. 1987.
- ELLWOOD, E. L., ECKLUND, B. A. Treatments to improve wood permeability as an approach to the drying problems. Proc. Western Dry Kiln Clubs. 13 th Annual Meeting. Medford, Oreg. 1961.
- ELLWOOD, R.W., ERICKSON. Effect of presteaming on seasoning stain and drying rate of redwood. *Forest Prod. J.*, Madison, v.12, n.7, p.328-32, 1962.

- FAO. El eucalipto en la repoblacion forestal. Roma, 1981. 723p.
- FENGEL, D., WEGENER, G. Wood chemistry, ultrastructure reactions walter de gruyter. Berlin, 1984. 612p.
- FERREIRA, M. Escolha da espécie de eucalipto *Circular técnica*, 47. *IPEF*, 29 p. 1979.
- FERREIRA, M. M, KAJEYAMA, P.Y. Melhoramento genético da densidade da madeira e eucalipto. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO (3, 1978, Manaus). *Anais...* São Paulo: SBS, v.2, 1978, p.148-52.
- FERREIRA, M. Melhoramento florestal e Silvicultura intensiva com eucalipto. *Sivicultura*. VIII (29): 5--11. 1983.
- FINDLAY, W. P. K. *Timber: properties and uses*. Londres, Crosby Lockwood Stapeles, 1975. 224p.
- FOELKEL, C. E. B. *Qualidade de madeira: teoria*. Belo Oriente, 5. ed., 1977.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY. *Wood handbook - wood as an engineering material*. Washington: US department of Agriculture, 1987. 466p.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY. *Wood handbook - wood as an engineering material*. Washington: US department of Agriculture, 1955. 528p.
- GALVÃO, A.P.M., JANKOWSKY, I.P. *Secagem racional da madeira*. São Paulo: Nobel, 1985. 111p.
- GERHARDS, C. C. Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: and analyss of imediate effects. *Wood and fibre*, v.14, n.1, p.4-36, 1982.
- GIORDANO, F.G., CURRO, P. Observations concernig unusual methods for reducing damage from Growth Stresses in *eucalypts* sawn timber. In: IUFRO-5 MEETING (1973 Cope Town, RSA). *Proceedings*. Republic of South Africa, 1972. v.2, p.322-5.
- GIORDANO, G., GHISI, G. *Contribution to the study o growth stresses in Eucalyptus*. *Proceedings*. IUFRO-41 Meeting, Melbourne, Australia, 1965. 6p.
- GONZAGA, J.V.; FOELKEL, C.E. B.; BUSNARDO, C.A; GOMIDE, J. L. ; SCHIMIDT, C. Qualidade da madeira e da celulose Kraft branqueada de treze espécies de Eucalyptus. In: CONGRESSO ANUAL DA ABCP, 16º, São Paulo, 1983. P. 7-29.
- GRAHAM, R. Effect of preservative treatment and related condition on wood strenght, Oregon State University, Forest Products Research Center, Project 44A-4, 1958.
- GREENHILL, W.L. Collapse and its removal: Some recent investigations with *Eucalyptus regnans*, CSIRO Aust. Div. For. Prod. Tech. Pap., v.24, n.1-32, 1938.

- GROZDITS, G.A., IFJU, G. Development of tensile strength and related properties in differentiating coniferous xylem. *Wood Science*, v.1, n.3, p.137-47, 1969.
- HANN, R. A. *An investigation of drying of wood at temperatures above 100 degrees centigrade*. Tese. Doutorado (Ph.D) The University of Nort Carolina, 203p., 1965.
- HART, C. A. *The drying of wood*. North Carolina Agric. Ext. Serv., Raleigh, Nc. 1975. 36p.
- HARTLEY, J. Aspects of the high temperature drying - prove juvenile softwood (Unpublished paper). 1975.
- HARTLEY, J., GOUGH, D.K. Future sawnood drying in Australia. FDC, 847:232, 181: (94), p.179-190, 1990.
- HASLETT, A.N., KININMOMTH, J.A. Pretreatments to hasten the drying of *Nothofagus fusca*. *New Zealand J. Forest Sci.*, v.16, n.2, p.237-46, 1986.
- HILDEBRAND, R. *Kiln drying of saw timber*. Germany, R.H.: Maschinenbau Gmbh, 1970. 202p.
- HILLIS, W. E. The role of wood characteristics in high temperature drying J. Inst. *Wood Sci.*: v.7, n.2, p.60-7. 1975.
- HUFFMAN, D. E. High-temperature drying effect on the bending strength of spruce-pine-fir joists. *For. Prod. J.*, v.27, n.3, p.55-7, 1977.
- HUFFMAN, D. E. Kiln drying of aspen studs. *For Prod. J.*, v.22, n.10, p.21-3, 1972.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL. Normas para classificação de madeira serrada de folhosas. Brasília, 1983. 67p.
- IWAKIRI, S. *Classificação de madeiras tropicais através do método mecânico não destrutivo*. Curitiba, 1982. p.91. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- JACOBS, M. R. The fibre tension of woody stems, with special reference to the genus *Eucalyptus*. *Bull. Common. For. bur. Aust.*, n.22, 1938. 37p.
- JACOBS, M.R. *The growth of woody stems*. Canberra, Australia, by authority: L.F. Johnston, Commonwealth Government Printer, 1945. 67p. (Bulletin n° 28).
- JACOBS, M.R... *O que o eucalypto pode fazer pelo Brasil*. Rio de Janeiro, Projeto de Desenvolvimento e Pesquisas Florestal PNUD/FAO/BRA-45, 1973. 23 p (Série Técnica, n. 2).
- JARMUTOWSKA, A., MATEJAK, M. On the properties of pine wood after several years exposure to high temperature. *Holztechnologie*, v.19, n.4, p.206-8, 1978.

- JAYNE, B.A. Models and analyses in the physics of fibrous materials. *For. Prod. J.*, v.16, n.5, p 51 - 59, 1966.
- KASS, A.; WANGAARD, F.; SCHROEDER. Chemical degradation of wood: The relationship between strength retention and pentosan content. *Wood and Fiber* 2 (1): 31-39, 1970.
- KAUMAN, W. G. *Cell collapse in wood*. South Melbourne: CSIRO, Division of Forest Products, 1964, 63p. (Reprint n.566).
- KAUMAN, W. G. Effect of thermal degradation on shrinkage and collapse of wood from 3 Australian species. *For. Prod. J.*, v.11, p.445-52. 1961.
- KEINERT Jr., S., ZAGAL, D.A., INTERAMNENSE, M.T. *Laminação, Produção e Testes de Compensado a partir de Eucalyptus viminalis (LABILL)*. 1992. (não publicado).
- KEYLWERTH, R. High temperature drying installations. *Holz als roh-und werksstoff*, v.10, n.4, p.134-8, 1952.
- KININMONTH, J. A. Permeability and fine structure of certain hardwoods and effects on drying. III, Problems in drying of heartwood, *Holzforschung*. 27: 26-31. 1973.
- KININMONTH, J.A. Effect of steaming on the fine structure of *Nothofagus fusca*. *New Zealand J. Forest Sci.*, v.1, p.129-39. 1971.
- KOEHLER, A. A new hypothesis as to the cause of shakes and rift cracks in green timber. *J. of Forestry*, v.31, n.5, p.551-6. 1933.
- KOEHLER, A., THELEN, R. *The Kiln Drying of Lumber*. McGraw-Hill Book, Co., Inc., New York, N.Y. 1926.
- KOLLMANN, F. F. P. High temperature drying-research application and experience, in Germany. *For. Prod. J.*, (11): 508-515, 1961.
- KOLLMANN, F. F. P.; KUENZI, E. W.; STAMM, A. J. *Principles of wood Science and Technology*. New York, Springer Verlag. 1975, v.2, 703 p.
- KOLLMANN, F. F. P.; SCHNEIDER, A. Der einflub der stromungsgeschwindigkeit auf die heibdompftrocknunft von schmittholz. *Holz als Roh-und werksstoff*, 19: 461-478, 1961.
- KOLLMANN, F.F.P., COTÉ, W.A. *Principles of wood science and technology solid wood*. New York: Springer, v.1, 1968. 592p.
- KOZLIK, C. J. Problems of drying western hemlock heartwood to a uniform final moisture content. *Proc.*, 21st Annual Meeting, Western Dry Kiln Clubs, Washington, Idaho, Montana Seasoning Club, Missoula, Mont. 1970.

- KOZLIK, C. J. Problems of drying western hemlock heartwood to a uniform final moisture content. Proc., Western dry kiln Clubs. 21st, Annual Meeting, Redding, Calif., 1969.
- KOZLIK, C.J. Effect of high-temperature drying softwoods on the mechanical properties of wood. In: PROCEEDING OF THE RES. CONF. ON HIGH-TEMPERATURE DRYING EFFECTS ON MECHANICAL PROPERTIES OF SOFTWOOD LUMBER. USDA, F. P. L., madison, Wisc. 1976.
- KOZLIK, C.J. HAMLIN, L. W. Redcing variability in find moisture content of kiln-dried western hemlock lumber. *Forest prod. J.*, v.22, n.7, p.24-31, 1972.
- KOZLIK, C.J.. Effect of Kiln conditions on the strenght of *Dougl's-fir* and *Western hemlock*. *For. Res. Lab. Oreg. State Univ. Corvallis. Rep D - 9. 32 p.* 1967.
- KUBINSKY, E. Influence of steaming on steaming on the properties of *Quercus rubra L.* *Wood. Holz-forschung*, v.25, p.78-83. 1971.
- KUBLER, H. Role of moisture in hygrothermal recovery of wood. *Wood Science*, v.5, n.3, p.198-204, 1973.
- KUBLER, H. Studies on growth stresses in trees. 2. Longitudinal stresses. *Holz als Rohund Werkstoff*, v.17, n.2, p.44-54, 1959.
- KUBLER, H. Growth Stresses in Trees and Related Wood Properties. *Forest Products Abstracts*, Farnham Royal, v.10, n.3, p.61-119,1987.
- KUBLER, H.; CHEN, T.H. Preservation of crosscut and heating checs in log ends. *Wood Sci. Technol.*; New York, v.9, n.1, p.15-24, 1975.
- LADELL, J. L. High-temperature drying of yellow birch. *For. Prod. J.*, v.6, n.11, p.469-75, 1956.
- LARA PALMA, H. A. *Determinação de parâmetros elásticos e de resistência e a influência da madeira nas propriedades de compensados de Pinus elliottii Engelm. e Pinus taeda L.* Curitiba, 1994, 167p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- LAVERS, G. M. The strength properties of timber. In: THE PRINCES RISBOROUGH LABORATORY OF THE BUILDING RESEARCH ESTABILISHMENT. The strength properties of timber. Lancaster: MTP construction, p. 1-86, 1974.
- LEPAGE, E. S. Química da madeira. In: LEPAGE, E. S., Coord. *Manual de preservação de madeiras*. São Paulo, IPT, 1986. cap. IV, p. 69-96, v. 1.
- LIANG, S.Z. The variability of swelling and shrinkage of vermilion wood and the techniqe of high-temperature drying. *J. Nanjing Technol. Col. For. Prod.* 1:1-15. 1981.
- LIMA, W. P. Impacto ambiental do eucalipto. Edusp. São Paulo, 1993. 301p.

- LISBÔA, C. D. J. *Estudo das tensões de crescimento em toras de Eucalyptus grandis Hill. ex. Maiden*. Curitiba, 1993, 275p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- LISBÔA, C. D. J.; MATOS, J. L. M.; MELO, J. E. *Amostragem e propriedade físico-mecânicas de madeiras Amazônicas*. Brasília, D.F. Instituto Brasileiro do meio ambiente e dos recursos naturais renováveis. 103p. 1993.
- LUTZ, J.F., PANZER, H.R. Potential of Brazil-nut for use as venner. *USDA Forest Service*, Madison. 1969. (Não publicado)
- MACKAY, J.F.G. Influence of steaming on water vapor diffusion in hardwoods, *Wood Sci.*, v.3, p.156-160. 1971.
- MACKAY, J.F.G. Recovery of collapse in *E. delegatensis* by use of anhydrous Ammonia and steam. *Wood and Fiber, Lawrence, Kans.*, v.4, n.3, p.126-9, 1972.
- MACLEAN, J. D. Effect of heating in water on strength properties of wood. *American Wood Preservers' Association Proceedings*, vol. 50, p.253-281, 1954.
- MACLEAN, J. D. Effect of oven heating and hot pressing on strenght properties of wood, *American Wood Preservers' Association Proceedings*, vol. 51, p.227-250, 1955.
- MACLEAN, J. D. Effect of steaming on the strength of wood. *American Wood Preservers' Association Proceedings*, vol. 49, p.81-112, 1953.
- MALAN, F.S. Eucalyptus improvement for lumber production. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, 1995, São Paulo. *Anais...* Piracicaba: IPEF, IPT, 1995, p. 1-20.
- MALAN, F.S. *Studies on the phenotypic variation in growth stress intensity and its association with tree and wood properties of south Africa Grow. Eucalyptus grandis (Hill Ex-Maiden)*. 1984. University of Stellenbosch.
- MARK, R.E. *Cell wall mechames of tracheids*. New Haven, Yale University Press, 1967.
- MATHUR, R. S. Editorial indian forester, 109. 1983.
- MCGINNES, E. A., ROSEN, H. N. Macroscopic and microscopic analyses of color changes of wood pressure steam-dried above atmospheric pressure. *Wood Fiber Sci.*, v.16, p.48-56, 1984.
- MENDES, A. M.; SEVERO, E. T. D. Estudo comparativo entre três tecnicas de secagem natural conduzido na região de Manaus com madeira de *Hura Creptans*. *Boletim informativo*, n. 4. CNPQ/CPPF/INPA. Manaus, Am, 1984.
- MILLETT, M.; GERHARS, C. Accelerated aging, residual weight and flexural properties of wood heated in air at 115°C to 175°; *Wood Science* 4 (4):193-201, 1972.

- MISILO, P. Istraživanje velicine koeficijenta difuzije vlage parene bukovine (investigation on the magnitude of the moisture diffusion coefficient of steamed beech wood.). Pregled naučnoteh. Rad. Inform., Zavod. Techn. drveta, v.8, n.2, p.25-37, 1971.
- MITCHELL, H. L. *Breeding for high-quality wood*. Madison: USDA. Forest Service. Forest Products Laboratory, 1956. 13p. (Research Paper, 2050).
- MOREY, P. R. *O crescimento das árvores*. São Paulo, EDUSP, 1980.
- MÜNCH, E. Statics and dynamics of the cell wall's spiral structure, especially in compression wood and tension wood. *Flora*, v.32, n.357-424, 1938.
- MUÑIZ, G. I. *Caracterização e desenvolvimento de modelos para estimar as propriedades e o comportamento na secagem da madeira de Pimus elliottii Engelm. e Pinus taeda L.* Curitiba, 1983, 236p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- NEUMAN, R. Kiln drying young *Eucalyptus globulus* boards from green. In: WOOD DRYING SIMPOSIUM. (1989): Seattle. Seattle: IUFRO, 1989. P. 107-115.
- NEUMAN, R. J., SAAVEDRA, A. 1992. Check formation during the drying of *Eucalyptus globulus*. *Holz als roh-und werkstoff*, v.50, p.106-10, 1992.
- NEUMAN, R. Kiln drying young *Eucalyptus globulus* boards from green. In: WOOD DRYING SIMPOSIUM. (1985: SEATTLE). Seattle, IUFRO, 1985 p.107-115.
- NICHOLAS, D.D., THOMAS, R. J. Influence of Steaming on ultrastruture of bordered pit membrane in loblolly pine. *Forest Prod. J.*, v.18, n.1, p.57-9, 1968.
- NICHOLSON, J. E. Effect of storage on growth stress in mountain ash logs and trees. *Australian Forestry*, v.36, n.2, p.114-24, 1973.
- NOAK, D. Beziehung swischen den roshstoff-eigenschaften und den anforderung der verwendung. *Holz als Rohund Werkstoff*, v.34, 1976, p.121-6.
- OLIVEIRA, S. T. S. *Caracterização da madeira de eucalipto para construção civil*. São Paulo 1997. 429p. tese (Doutorado em Engenharia). Universidade de São Paulo.
- ORDINARIO, E.G. The effect of presteaming on the drying rates and qualities of-inch thick bagtikan (*Parashorea plicada Blandis*) boards. *Phil. Lbrmn.*, v.4, n.12, p.27-30, 1968.
- PARKER, H. *Simplified design of structural wood*. New York: Willey, 1979. 269p.
- PEREIRA, J.C.D.; HIGA, A.R.; SHIMIZU, J.Y.; HIGA, R.C.V. Comparação da qualidade da madeira de três procedências de *Eucalptus dunnii* Maiden, para fins energéticos. *Boletim de Pesquisas florestal*, Curitiba, (13):09-16, 1986.

- PETRI, L. F. Hochtemperaturtrocknung von birkin, aspen und lindenhaiz in uberhitztem dompfbei atomspheerischen druk. From destract by kuebler in holz als roh-und. Werkstoff, v.22, n.11, 38p. 1963.
- PETTERSEN, R.C. The chemical composition of wood. In: ROWEL, R. M., ed., *The chimestry of solid wood*. Washington, American chemical Society, 1984. cap 2, p. 57-126.
- 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: IPEF, IPT, 1995, p. 50-58.
- POST, I. L. *An investigation of the longitudinal growth stresses in trees*. Syracuse, N.Y., 1979. 108p. Ph.D. thesis, State University of N.Y., College of Environmental Science & Forestry.
- PRATT, G.H. *Timber drying manual*. London: Department of the Environment, 1986. 122p.
- PRYOR, L. D. Biology of *Eucalyptus*. The institute of Biology. *Studies in Biology 61*, London, Edward Arnold. 82 p. 1976.
- PRYOR, L. D., JOHNSON, L. A. S. A classification of the *Eucalyptus*, Austr. Nat. Univ. Press. Camberra. 1971.
- RASMUSSEN, E.F. *Dry Kiln operator's manual*. Agric. Handdb., Madison: USDA, p.1-197, 1961.
- RICE, W. W. Pre-surfacing lumber before drying. Proc. F.P.R.S. Drying lumber of quality and profit, Charlotte, N.C., p.15-7, october 1986.
- RIETZ, R. C., JENSON, J. A. Producing check-free beech for turnings. *For. Prod. J.*, v.18, n.11, p.42-4, 1968.
- ROCCO LAHR, F. A. R. *Sobre a determinação de propriedades de elasticidade de madeira*. São Carlos, 1983, 220p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos. USP.
- ROSEN, H. N. Empirical Model for characterizing wood drying curves. *Wood Science*. v.12, n.4, p.201-206, 1980.
- ROSEN, H. N., LAURIE, S. E. Mechanical properties of conventionally kiln-dried and pressure steam dried yellow-polper and red oak. *For. Prod. J.*, v.33, p.123-34, 1983.
- ROSEN, H.N.; BODKIN, R.E. Development of a schedule for jet drying Yeloow-poplar. *Forest Prod. J.* 31(3):39-44. 1981.

- ROZAS, E. M. *Contribuição ao desenvolvimento tecnologico para utilização de madeira serrada de Eucalyptus grandis* (Hill Ex Maiden) na deração de produtos com maior valor agregado. Curitiba, 1993. 133p, Tese (Mestrado em Engenharia Florestal) Universidade Federal do Paraná.
- ROZAS, E., M., TOMASELLI, I. Secagem de madeira serrada de *Eucalyptus viminalis*. *Ciência Florestal*, Santa Catarina, 1993.
- SALAMON, M. Comparison of kiln schedules for drying spruce. *For. Prod. J.* 23(3) : 45-49. 1973.
- SALAMON, M. High-temperature drying an its effects on wood properties. *For. Prod. J.*, v.19, n.3, p.27-34, 1969.
- SALAMON, M. Quality and strength properties of Douglas-Fir dried at high temperature. *For. Prod. J.* 13(8) : 339-344. 1963.
- SALES, C. Growth stresses: main results obtained on the study of sawe guyana species and consequences for use ends. In: IUFRO WORLD CONGRESS, v.18, 1986, Ljvbljama. *Proceedings*. Blacksburg, UA: IUFRO, 1986. U.S., p.234-48.
- SALUD, E. C. Comparison of the quality and composition of the wood extratives of unsteamed and steamed apitang (*Dipterocarpus grandiflorus Blanco*) *Pterocarpus*, v.2, p.123-34, 1976.
- SANTINI, E. J. Alternativas para o monitoramento e controle do processo de secagem de madeira serrada em estufa. Curitiba, 1996, 197p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais), Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- SANTINI, E. J.; TOMASELLI, I. Colapso na madeira de algumas experiências brasileiras. *FUPEF*, Série Técnica. Curitiba, n.3,p. 1-21, 1980.
- SCHNEIDER, A. Investigations on the convection drying of lumber at extremely high temperature. Part II: drying degrade, changes in sorption, colour and strenght of pine sapwood. *Holz als rohn-und werkstoff*, v.31, p.198-206, 1973.
- SEABRIGHT, D. Wood chemistry - the essential ingredients. *Asian Timber*, v. 14, n. 7, p. 13-34, 1995.
- SEVERO, E. T. D. *Efeito da temperatura e da velocidade do ar na secagem da madeira serrada de Pinus elliottii*. Curitiba, 1989, 109p. tese (mestrado), Universidade Federal do Paraná.
- SHARMA, S.N., BALI, B. L. Effect of presteaming on the drying rates in subsequent seasoning of green and refractory hardwood. *Indian Forest Bull.* N.258, *Forest Res. Inst.*, Dehra Dun, India. 1969.
- SIAU, J. F. *Flow in wood*. Syracuse: Syracuse University Press, 1971. 131p.

- SIAU, J. F. *Flow in wood*. Syracuse: Syracuse University Press, 1984, 131p.
- SIMPSON, W. T. Dry kiln operator's manual. *Agric. handb.*, Madison, n.188, p.1-274, 1991.
- SIMPSON, W.T. Drying wood: a review. Part II. *Drying Technol.*, 2(3):353-368, 1983 -1984.
- SIMPSON, W. T. Effect of presteaming on moisture gradient of Northern Red Oak during drying. *Wood Sci.*, Madison, v.8, p.156-9, 1976.
- SIMPSON, W.T. Effect of steaming on the drying rate of several species of wood. *Wood Sci.*, Madison, v.7, p.247-55, 1975.
- SKAAR, C.. Effect of high temperature on the rate of degradation and reduction of hygroscopicity of wood. In: *Res. conf. on High Temperature Drying Effects on Mechanical Proceedings*. 1976.
- SKAAR, C.J. *Water in Wood*. Syracuse: Syracuse University Press, 1972, 218p.
- SKOLMEN, R. G. Heating Logs To Relieve Growth Stresses. *For. Prod. J.*, Madison, v. 17, p.41-2, 1967.
- SOUZA, V. R.; CARPIM M., BARICHELLO, L. E. Q. Densidade básica entre procedências, classes de diâmetro e posições em *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus Saligna*. IPEF, Piracicaba, n.33, p.65-72, 1986.
- SPURR, S. H., HSING, W. Growth rate and specific gravity in conifers. *J. For.*, v.52, n.3, p.191-2, 1954.
- STAMM, A. J. *Wood and cellulose science*. New York: Ronald Press, 1964. 549p.
- STAMM, A. J. Thermal degradation of wood and cellulose. *Ind. Eng. Chem.*, v.48, n.3, p.413-415, 1956.
- STCP/INDUFOR. Brazilian forest products Industry into the 21st century, Curitiba, 1998, p.33-45.
- STÖHR, H. P. The seasoning of South African Growth *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus Saligna* sawn timber. *South African Forestry J.*, Pretoria, n.102, p. 61-66, 1977.
- STÖHR, H.P., MACKAY, D. Drying schedule evaluation of 25 mm *Eucalyptus grandis*. Pretoria: *National*. Timber Research Institute. 1983. 34p. (Hout/320).
- STURION, T. A. et alii. Variação da densidade básica de madeira de doze espécies de *Eucalyptus* plantados em Uberaba, Minas Gerais. *Boletim de pesquisas florestal*, Curitiba, (14): 28-38, 1987.

- SUCHSLAND, O.; WOODSON, G. E. Fiberboard manufacturing practices in the United States, Madison: Forest Products Research Society, 1991, 263 p.
- SULZBERGER, P. H. The effect of temperature on the strength of wood, plywood and glued joints. *Aust. Aeron. Sec. Consult. Com. Rep. ACA-46*. 44p. 1953.
- THOMAS, M. *Plant Physiology*. CHURCHIL: London. 1937.
- THOMPSON, W. Effect of steaming and kiln drying on the properties of southern pine poles, Part II: chemical properties. *Forest Products J.* 19 (2): 37-42, 1969.
- TIEMANN, H. D. *The kiln drying of lumber a practical and theoretical treatise*. J.B.C. Lippincott. Philadelphia, USA, 316p.
- TOMASELLI, I. Aspectos físicos de secagem de madeira de *Pinus elliottii* Engelm. acima de 100°C. Curitiba, 1981. Tese (Professor Titular), Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- TOMASELLI, I. *The influence of high - temperature drying on physical and mechanical properties of Pinus radiata*. D. Don. University of Melbourne. Tese Doutorado. (Ph.D). 264 p. 1977.
- TOMASELLI, I. Planted forests in Brazil. In: PLANTED FORESTS IN SARAWAK, AN INTERNATIONAL CONFERENCE, 1998, Sarawak, Conference paper... Sarawak: Forest Department Sarawak, Sarawak Timber Association, Sarawak Development institute, 1998, p. 1-14.
- TOMASELLI, I. Secagem a alta temperatura um processo aplicável as condições brasileiras. In: SEMINÁRIO DE UTILIZAÇÃO DE MADEIRAS TROPICAIS DE POVOAMENTOS NATURAIS E ARTIFICIAIS NA INDUSTRIA MADEREIRA MODERNA (1978: Curitiba). Seminário ..., Curitiba. *FUPEF*, 1978. P. 62 - 70.
- TOMAZELLO FILHO, M. *Formação e caracterização da estrutura anatômica da madeira de Eucalyptus*. Piracicaba, ESALQ. 1994. 11p.
- TSOUMIS, G. Science and Technology of wood. In: *MECHANICAL PROPERTIES*. London: Chapman & Hall, 1991, p.160-93.
- TURNBULL, R. F. *Review of current attitudes to growth stress*. Proceedings IUFRO-41 Meeting, Melbourne, Australia, v.3, 1965. 8p.
- VERMAAS, H. F. Drying eucalypts for quality: Material characteristics, pre-drying treatments, drying, methods, schedules and optimization of drying quality. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, 1995, São Paulo. *Anais...* Piracicaba: IPEF, IPT, 1995, p.119-132.
- VERMAAS, H. F. Case for the low temperature kiln drying of *eucalyptus grandis*. *South African Forest J.*, Pretoria, n. 140, p. 72 - 77, 1987.

- WALKER, J. C. F. The drying of timber. In: WALKER, J.C.F. et al. *Primary wood processing: principles and practice*. London: Chapman & Hall, 1993, p.247-84.
- WANGAARD, F. F. *The mechanical properties of wood*. London: Chapman & Hall, 1950. 377p.
- WATANABE, H. A study of the origin of longitudinal growth stresses in tree stem. *Proc. IUFRO sect 41*, Melbourne, Aust. Committee on tree growth stresses. 1965.
- WEIK, B.B., WENGERT, E.M., SCHROEDER, J., BRISBIN, R. Practical drying techniques for yellow-poplar S-D-R fitches. *For. Prod. J.* Madison, v.34, p.39-44, 1984.
- WILSON, T.R.C. Strength-moisture relation for wood. Washington, D.C., *USDA Technical bulletin*, n.282, 1932. 88p.
- WINANDY, J.E.; ROWEL, R.M. The chemistry of wood strength. In: ROWEL R. M., ed. *The chemistry of solid wood*. Washington, American Chemical Society, 1984. cap.5, p.211-56.
- WOOD, L. W., ERICKSON, E. C. O., DOHR, A. W. Strength and related properties of wood floes. ASTM Wood Pole Research Program. Final report. American Society for Testing materials. Philadelphia, Pa, 1960.