

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**EFEITO DA TERMORRETIFICAÇÃO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS,
MECÂNICAS E NA RESISTÊNCIA A FUNGOS DETERIORADORES
DA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden.**

FRED WILLIANS CALONEGO

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp - Campus de
Botucatu, para a obtenção do título de Doutor
em Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU-SP
Junho - 2009

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**EFEITO DA TERMORRETIFICAÇÃO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS,
MECÂNICAS E NA RESISTÊNCIA A FUNGOS DETERIORADORES
DA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden.**

FRED WILLIANS CALONEGO

Orientador: Prof. Dr. Elias Taylor Durgante Severo

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp - Campus de
Botucatu, para a obtenção do título de Doutor
em Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU-SP
Junho – 2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Calonego, Fred Willians, 1977-
C165e Efeito da termorretificação nas propriedades físicas, mecânicas e na resistência a fungos deterioradores da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden / Fred Willians Calonego. - Botucatu : [s.n.], 2009.
xii, 149 f. : il. color., gráfs., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2009
Orientador: Elias Taylor Durgante Severo
Inclui bibliografia

1. Termorretificação da madeira. 2. Madeira - Propriedades físicas. 3. Madeira - Propriedades mecânicas. 4. Fungos xilófagos. 5. *Eucalyptus grandis*. I. Severo, Elias Taylor Durgante. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU**

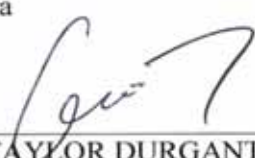
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: EFEITO DA TERMORRETIFICAÇÃO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS,
MECÂNICAS E NA RESISTÊNCIA A FUNGOS DETERIORADORES
DA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden.

ALUNO: FRED WILLIAMS CALONEGO

ORIENTADOR: PROF. DR. ELIAS TAYLOR DURGANTE SEVERO

Aprovado pela Comissão Examinadora



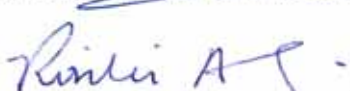
PROF. DR. ELIAS TAYLOR DURGANTE SEVERO



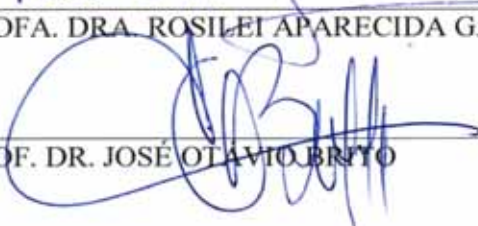
PROF. DR. CLAUDIO ANGELI SANSIGOLO



PROF. DR. ADRIANO WAGNER BALLARIN



PROFA. DRA. ROSILEI APARECIDA GARCIA



PROF. DR. JOSÉ OTÁVIO BRITO

Data da Realização: 24 de junho de 2009.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, saúde e oportunidade de concluir esta etapa;

A toda a minha família, em especial aos meus pais Gledes e Helio por tudo o que me ensinaram e fizeram desde o começo. Aos meus irmãos Jean e Camila pela competição desde a infância. À minha namorada Valéria pela companhia e compreensão nos momentos de dificuldades. Às crianças Beatriz, Lucas e João Pedro que sorrindo me chamam de tio;

Ao Prof. Dr. Elias Taylor Durgante Severo, pela amizade, orientação, sugestões e confiança;

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

Ao Prof. Dr. Zacarias Xavier de Barros e ao Prof. Dr. Marco Antonio Martin Bioggioni, coordenadores do curso de pós-graduação em Agronomia (Energia na Agricultura), pelo respaldo dado durante a realização desse trabalho;

Ao Engenheiro Florestal José Luiz da Silva Maia e toda a sua equipe de colaboradores, da empresa Duratex-S.A., pela doação das toras de *Eucalyptus grandis* usadas na tese;

Ao Engenheiro Agrônomo Mestre Clovis Ribas e toda a sua equipe de colaboradores, do Horto Florestal de Mandurí, do Instituto Florestal do Estado de São Paulo, pela disponibilização em tempo integral da serraria e pelo desdobro das toras usadas na tese;

Ao Srs. Silvio e Cavalari, da marcenaria da Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, e à Sra. Valdelice e aos Srs. Jaime, Milton e João Vasque, da marcenaria da Faculdade de Medicina da UNESP, pelo preparo das tábuas e pela fabricação dos corpos-de-prova da madeira usada no estudo.

Ao Prof. Dr. Sérgio Lázaro de Lima e aos técnicos Noel Batista e José Carlos De Pieri, do Laboratório de Física do Solo da FCA-UNESP, pelas análises físicas do solo usado no ensaio de deterioração de madeiras por fungos;

Ao Prof. Dr. Edson Luiz Furtado e à Engenheira Florestal Juliana Lima, do Laboratório de Patologia Florestal, do Departamento de Produção Vegetal da FCA-UNESP, pelas sugestões e manipulação do fungo usado no ensaio de deterioração de madeiras;

Ao Prof. Dr. Adriano Wagner Ballarin e ao técnico Aílton de Lima Lucas, do Laboratório de Ensaio de Materiais, do Departamento de Engenharia Rural da FCA-UNESP, pela

colaboração nos ensaios de propriedades mecânicas da madeira, mesmo após o expediente de trabalho;

Aos estagiários e alunos de graduação em Engenharia Florestal André Luiz Ferreira, Melany Maria Alonso Pelozzi e Paula Lúcia Martins Rodrigues pelo imprescindível auxílio na coleta dos dados;

Ao pessoal da Seção de Atividades Auxiliares (Transportes) da FCA-UNESP pelas viagens e transporte de carga entre Lençóis Paulista, Mandurí e Botucatu-SP;

Aos professores Cláudio Angeli Sansígolo, Adriano Wagner Ballarin, Rosilei Aparecida Garcia e José Otávio Brito pelos questionamentos e sugestões apresentados durante a defesa de tese;

Ao Prof. Dr. José Eduardo Corrente, do departamento de Bioestatística, do Instituto de Biociências da UNESP, pela execução das análises estatísticas;

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

Ao Sr. Aparecido Agostinho "Dicão" Arruda, funcionário do Depto de Recursos Naturais/Ciências Florestais, pela amizade, pelo preparo da madeira durante muitas das fases do estudo e pela coleta e preparo do solo usado em parte do trabalho.

Em especial, ao Sr. Edson Graciano Brito, funcionário do Depto de Recursos Naturais/Ciências Florestais, pela amizade, pelo apoio moral, pelos inúmeros procedimentos técnicos realizados com afinco (muitas vezes fora do expediente de trabalho) e por ter feito mais do que podia para que pudéssemos cumprir o cronograma;

À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pela concessão da bolsa de estudos, através do processo 05/59074-7, fonte de estímulo e dedicação exclusiva ao trabalho;

Também, agradeço a todos os amigos que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento desse projeto;

E..., como fonte de estímulo aos próximos trabalhos, encerro com a seguinte frase de São Francisco de Assis: "Comece fazendo o que é necessário, depois o que é possível, e de repente você estará fazendo o impossível".

Obrigado.

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XI
RESUMO	1
SUMMARY	3
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	5
2. OBJETIVOS	7
3. REVISÃO DE LITERATURA	8
3.1. Propriedades da madeira	8
3.1.1. Propriedades Físicas	8
3.1.1.1. Massa específica aparente	8
3.1.1.2. Relação água-madeira e instabilidade dimensional	10
3.1.2. Durabilidade biológica	15
3.1.3. Propriedades mecânicas	19
3.2. Processos de termorretificação da madeira	22
3.3. Degradação térmica da madeira	24
3.4. Efeito da termorretificação nas propriedades das madeiras	30
3.4.1. Efeito da termorretificação nas propriedades físicas	30
3.4.2. Efeito da termorretificação na durabilidade biológica	35
3.4.3. Efeito da termorretificação nas propriedades mecânicas	37
3.5. Considerações sobre a revisão de literatura	41
4. MATERIAL E MÉTODOS	43
4.1. Preparo do material	44
4.2. Termorretificação das tábuas	47
4.3. Avaliação da qualidade das tábuas termorretificadas	48
4.4. Obtenção de corpos-de-prova e caracterização das propriedades da madeira termorretificada	50
4.4.1. Propriedades físicas da madeira	52
4.4.2. Resistência da madeira a fungos deterioradores	55

SUMÁRIO

	Pág.
4.4.2.1. Preparo dos corpos-de-prova de madeira e das culturas fúngicas	55
4.4.2.2. Ensaio de apodrecimento acelerado do tipo “agar-block”	56
4.4.2.3. Ensaio de apodrecimento acelerado do tipo “soil-block”	57
4.4.2.4. Avaliação da perda de massa durante os ensaios de apodrecimento	59
4.4.3. Propriedades mecânicas da madeira	60
4.4.3.1. Preparo dos corpos-de-prova de madeira	60
4.4.3.2. Ensaio de compressão paralela às fibras	61
4.4.3.3. Ensaio de flexão estática	64
4.4.3.4. Ensaio de dureza normal às fibras	67
4.5. Análise estatística	68
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
5.1. Efeito da termorreificação nas propriedades físicas da madeira	69
5.1.1. Efeito da termorreificação na qualidade das tábuas	69
5.1.2. Efeito da termorreificação nas massas específicas e nos teores de umidade de equilíbrio da madeira	73
5.1.3. Efeito da termorreificação na instabilidade dimensional da madeira	79
5.2. Efeito da termorreificação na resistência a fungos deterioradores da madeira ...	87
5.3. Efeito da termorreificação nas propriedades mecânicas da madeira	92
6. CONCLUSÕES	101
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
Apêndice 1. Teste preliminar para estabelecer o tempo adotado na termorreificação da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	113
Apêndice 2. Análise de regressão da perda de massa das tábuas de <i>Eucalyptus grandis</i> em função da temperatura de termorreificação	116
Apêndice 3. Análise exploratória dos dados e análise estatística não paramétrica para a variação da espessura das tábuas de <i>Eucalyptus grandis</i> em função da temperatura de termorreificação	118

SUMÁRIO

	Pág.
Apêndice 4. Análise exploratória dos dados para as variáveis das propriedades físicas, mecânicas e resistência da madeira a fungos	120
Apêndice 5. Análise estatística para as variáveis das propriedades físicas da madeira ...	134
Apêndice 6. Análise estatística para as variáveis da resistência da madeira a fungos	141
Apêndice 7. Análise estatística para as variáveis das propriedades mecânicas da madeira	144
Apêndice 8. Teste de Tukey para comparações múltiplas das variáveis classificadas segundo os tratamentos de termorretificação	147

LISTA DE FIGURAS

FIGURA.

1	Curvas de adsorção e de desorção para a madeira (SKAAR, 1972; HAYGREEN e BOWYER, 1996; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).....	11
2	Isoterma higroscópica de adsorção para a madeira de <i>Eucalyptus regnans</i> e seus componentes químicos (SKAAR, 1972).....	12
3	Ilustração de ensaio de compressão paralela às fibras (A) e diagrama de tensão deformação específica (B) (adaptado de HAYGREEN e BOWYER, 1996).....	20
4	Degradação térmica da madeira (MARTON et al., 2003).....	27
5	Efeito imediato da temperatura em três níveis de teores de umidade da madeira sobre: (A) o módulo de elasticidade em flexão estática; (B) o módulo de ruptura em flexão estática; e (C) a resistência à compressão paralela às fibras, relativos à temperatura de 20°C (adaptado de FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).....	38
6	Método de desdobro visando à obtenção de tábuas centrais e perfeitamente orientadas em relação aos anéis de crescimento, baseado em serras de fita dupla e simples.....	44
7	Empilhamento da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden para a sua secagem convencional.....	46
8	Programa de tempo-temperatura adotado para a termorretificação da madeira de <i>E. grandis</i>	48
9	Esquema sobre a posição dos pontos de medição da espessura das tábuas (A) e tábuas de <i>E. grandis</i> com demarcação dos pontos de medição da espessura (B).....	49
10	Aspecto visual de peças de madeira de <i>E. grandis</i> termorretificadas nas diferentes temperaturas adotadas no estudo e demarcação prévia (em vermelho) da região de retirada dos corpos-de-prova.....	50

FIGURA.

11	Modelo de extração dos corpos-de-prova a partir de uma tábua central..	51
12	Medição das dimensões tangencial (A), radial (B) e longitudinal (C) dos corpos-de-prova de <i>E. grandis</i> e verificação da sua massa (D).....	53
13	Placas de Petri no início do ensaio de apodrecimento acelerado do tipo “agar-block”, com as madeiras de <i>E. grandis</i> (A) e após 8 semanas de incubação (B).....	56
14	Início do ensaio de apodrecimento acelerado do tipo “soil-block”, para as madeiras de <i>E. grandis</i> (A) e após 12 semanas de incubação (B).....	59
15	Execução do ensaio de compressão paralela nos corpos-de-prova: (A) detalhe do acoplamento do extensômetro; (B) retirada do extensômetro; (C) ruptura do corpo-de-prova.....	63
16	Tipos de ruptura nos corpos-de-prova após os ensaios de compressão paralela às fibras, segundo a norma ASTM D-143 (1994) (A), e formas de ruptura dos corpos-de-prova de <i>E. grandis</i> após o ensaio (B).....	64
17	Execução do ensaio de flexão estática: (A) vista geral do equipamento; (B) detalhe do cutelo de aplicação de carga; (C) ruptura do corpo-de-prova.....	66
18	Superfícies de ruptura após os ensaios de flexão (A), segundo a norma de ASTM D-143 (1994), e formas de ruptura dos corpos-de-prova de <i>E. grandis</i> após o ensaio (B).....	66
19	Ensaio de dureza normal às fibras (A), e aspecto dos corpos-de-prova de <i>E. grandis</i> após o ensaio (B).....	67
20	Regressão exponencial ajustada para estimar a perda de massa de tábuas de <i>E. grandis</i> em função da temperatura de termorretificação.....	70
21	Efeito da termorretificação nas massas específicas aparentes da madeira de <i>E. grandis</i>	76
22	Efeito da termorretificação no teor de umidade de equilíbrio higroscópico da madeira de <i>E. grandis</i>	77

FIGURA.

23	Efeito da termorretificação nos inchamentos volumétricos e lineares da madeira de <i>E. grandis</i> climatizada a 12,0% de TUE.....	81
24	Efeito da termorretificação nos inchamentos volumétricos e lineares da madeira de <i>E. grandis</i> climatizada a 17,5% de TUE.....	82
25	Efeito da termorretificação nos inchamentos volumétricos e lineares máximos da madeira de <i>E. grandis</i>	83
26	Efeito da termorretificação nos coeficientes de retratibilidades da madeira de <i>E. grandis</i>	86
27	Perda de massa da madeira de <i>E. grandis</i> mediante ao fungo deteriorador <i>P. sanguineus</i> , em função da temperatura de termorretificação.....	90
28	Efeito da termorretificação na rigidez e resistência em compressão paralela às fibras da madeira de <i>E. grandis</i>	94
29	Efeito da termorretificação na rigidez e resistência em flexão estática da madeira de <i>E. grandis</i>	96
30	Efeito da termorretificação na dureza Janka normal às fibras da madeira de <i>E. grandis</i>	99

LISTA DE TABELAS

TABELA.

1	Valores médios das contrações máximas (%) e fator anisotrópico para a madeira de sete espécies de Eucalipto (OLIVEIRA, 1997).....	14
2	Propriedades mecânicas de algumas espécies comerciais importantes (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).....	21
3	Valores médios das propriedades mecânicas, em madeira verde, de sete espécies de Eucalipto (OLIVEIRA, 1997).....	22
4	Variação do PSF e da composição química da madeira de <i>Fagus sylvatica</i> com o tempo e a temperatura de termorretificação (REPELLIN e GUYONNET, 2005).....	33
5	Programa de secagem utilizado para a madeira de <i>E. grandis</i>	46
6	Dimensões dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de caracterização mecânica da madeira de <i>E. grandis</i>	61
7	Equação proposta para determinação da perda de massa das tábuas de <i>E. grandis</i> em função da temperatura de termorretificação.....	70
8	Efeito da temperatura de termorretificação na diminuição da espessura das tábuas de <i>E. grandis</i>	71
9	Efeito da temperatura de termorretificação nas massas específicas aparentes e nos teores de umidade de equilíbrio higroscópicos da madeira de <i>E. grandis</i>	74
10	Efeito da temperatura de termorretificação nos inchamentos volumétricos e lineares e no fator anisotrópico da madeira de <i>E. grandis</i>	79
11	Efeito da temperatura de termorretificação nos coeficientes de retratibilidade da madeira de <i>E. grandis</i>	85
12	Efeito da termorretificação na resistência da madeira de <i>E. grandis</i> ao fungo deteriorador <i>P. sanguineus</i>	89

TABELA.

13	Efeito da temperatura de termorretificação na resistência e na rigidez em compressão paralela às fibras da madeira de <i>E. grandis</i>	93
14	Efeito da temperatura de termorretificação na resistência e na rigidez em flexão estática da madeira de <i>E. grandis</i>	95
15	Efeito da termorretificação no tipo de ruptura dos corpos-de-prova de compressão paralela às fibras e de flexão estática da madeira de <i>E. grandis</i>	98
16	Efeito da temperatura de termorretificação na dureza Janka normal às fibras da madeira de <i>E. grandis</i>	99

RESUMO

A madeira é um dos mais versáteis materiais de construção. Entretanto, considerando as pressões ambientais e a escassez de madeira nativa nas regiões Sul e Sudeste, deve-se utilizar madeiras alternativas. O gênero eucalipto se apresenta como uma solução para esse problema, porém possui limitações, tais como, altos níveis de tensões de crescimento, baixa permeabilidade e problemas de secagem, alta retratibilidade e susceptibilidade a fungos deterioradores. Uma forma comercialmente atrativa de se melhorar a estabilidade dimensional e a durabilidade biológica deste produto é a termorreificação da madeira logo após a sua secagem. Esse trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da termorreificação sob diferentes condições de temperatura na qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. Para tanto, foram usadas tábuas provenientes de toras de *Eucalyptus grandis*, com cerca de 5,9 anos de idade, da empresa Duratex-SA. Cada uma das tábuas foi seccionada de modo a fornecer peças controle e outras destinadas para a termorreificação, com temperaturas finais de 140°C, 160°C, 180°C, 200°C e 220°C. A qualidade da madeira foi determinada pelos seguintes ensaios: (1) perda de massa e variação da espessura das tábuas; (2) propriedades físicas (massa específica básica, a 0%, a 12,0% e a 17,5% de umidade, teor de umidade de equilíbrio, inchamentos volumétricos e lineares, coeficientes de retratibilidade e fator anisotrópico); (3) resistência a fungos deterioradores; e (4) propriedades mecânicas (compressão paralela às fibras, flexão estática e dureza Janka normal às fibras). Os resultados mostraram que: (1) a perda de massa das tábuas de *E. grandis* aumenta exponencialmente entre 0,004% e 5,7%

com o aumento da temperatura de termorreificação de 140°C até 220°C; (2) na região próxima à medula há uma variação na diminuição da espessura das tábuas de até 99,6% com o aumento da temperatura de termorreificação, e próximo à casca de até 18,5%; (3) com o aumento da temperatura de termorreificação houve melhoras estatisticamente significativas nos teores de umidade de equilíbrio, nos inchamentos volumétricos e lineares tangencial, radial e longitudinal e nos seus respectivos coeficientes de retratibilidade de até, respectivamente, 49,3%, 58,8% e 62,7%, 50,0% e 77,4%, e de 26,9%, 6,9% e 30,6% em relação à madeira sem tratamento; (4) as temperaturas de termorreificação entre 140°C e 220°C provocaram, respectivamente, reduções entre 5,1% e 77,4% e entre 3,3% e 82,4% nas perdas de massa do material incubado com *Picnoporus sanguineus*, nos ensaios do tipo “agar-block” e “soil-block”; (5) a termorreificação da madeira com temperaturas superiores a 180°C promoveu decréscimos significativos de 24,0% a 52,3% na resistência em flexão estática (f_M), sem alterar a resistência em compressão paralela (f_{c0}) e os respectivos módulos de elasticidade; (6) madeiras termorreificadas com temperaturas acima de 180°C apresentaram corpos-de-prova com rupturas caracterizadas como frágil, de modo a estar associada com 100% da madeira tratada com 220°C; e (7) o aumento na temperatura entre 180°C e 220°C promoveu decréscimos significativos entre 12,1% e 20,7% na dureza Janka normal às fibras da madeira.

Palavras-chave: Termorreificação da madeira, Propriedades físicas, Resistência a fungos xilófagos, Propriedades mecânicas, *Eucalyptus grandis*.

EFFECT OF RETIFICATION® ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES AND DECAY RESISTANCE OF *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden WOOD. Botucatu, 2009. 149p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: FRED WILLIANS CALONEGO

Adviser: ELIAS TAYLOR DURGANTE SEVERO

SUMMARY

The wood is one of the most versatile building materials, however considering the environmental pressures associated with lack of native wood in the South and Southeast region, alternatives woods must be used. The *Eucalyptus* species are a solution to this problem however they have limitations such high levels of growth stress, high shrinkage, low permeability, drying defects and susceptibility to rot fungi. A commercially attractive way to improve the dimensional stability and durability of these products is this retification® process after its drying. The objective of this work was evaluating the effect of retification®, under different temperatures on the quality of the *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden wood. In order to do it so, were used logs of *Eucalyptus grandis* trees, with 5.9 years of age from company Duratex-SA. Each board was cutting to provide pieces and those designed with control and retified® with temperatures of 140°C, 160°C, 180°C, 200°C and 220°C. The quality of retified® wood was determined by the following tests (1) mass loss and tickness variation of boards; (2) physical properties (densities at 0%, 12.0% and 17.5% of moisture content, equilibrium moisture content, volumetric and linears swelling, shrinkage coeficient and anisotropic factor); (3) decay resitance of wood; and (4) mechanical properties (compression parallel to grain, static bending and Janka hardness perpendicular to grain). The results showed that: (1) the mass loss of *Eucalyptus grandis* boards exponentially increases from 0.004% to 5.7% with an increase of retification® temperature; (2) near pith there is a variation in the boards thickness reduction of up 99.6% with an increase of treatment temperature, while near bark this variation was of up to 18.5%; (3) with increase retification® temperature has an significant improvements on moisture content and volumetric, tangential, radial and longitudinal swelling

in their shrinkage coefficients of up 49.3% and 58.8%, 62.7%, 50.0%, 77.4% and 26.9%, 6.9% and 30.6%, respectively; (4) the retification[®] between 140°C and 220°C had a decreased of mass loss from 5.1% to 77.4% and from 3.3% to 82.4% for agar-block and soil-block tests with *Picnoporus sanguineus* fungus, respectively; (5) the retification[®] with temperatures biggest than 180°C to caused significant decreases from 24.0% to 52.3% in the modulus of rupture in static bending, however no changes were observed on modulus of rupture in compression parallel to grain and neither on modulus of elasticity for both tests; (6) retified[®] woods with temperature up 180°C to presented some samples with fragiles failures, which were of 100% for heat-treated wood at 220°C; and (7) the temperature increased from 180°C to 220°C caused significant decreases from 12.1% to 20.7% in Janka hardness perpendicular to grain.

Keywords: Retification[®]; Physical properties; Decay resistance of wood; Mechanical properties; *Eucalyptus grandis*.

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Devido à sua natureza higroscópica, a madeira retrai ou incha de acordo com a umidade relativa do ar.

A variação dimensional das madeiras pode inviabilizar o uso de certas espécies onde a estabilidade dimensional é um fator importante. Atualmente, a simples opção pelo uso de espécies que apresentam madeiras mais estáveis pode possuir como entraves fatores econômicos e a pouca disponibilidade deste material.

A adoção de madeiras provenientes de espécies de rápido crescimento, como as do gênero *Eucalyptus*, é uma alternativa para o suprimento de produtos de madeira sólida. No Brasil, segundo relatório da SBS (2005), a área reflorestada equivale a 5,6 milhões de hectares e cerca de 60,7% é composta por *Eucalyptus* sp. O aumento da área de floresta plantada no ano de 2005 foi de 553 mil hectares, sendo que o Programa Nacional de Florestas (PNF) estabeleceu uma meta de plantio de 500 mil hectares por ano. Em média 70% do volume total de madeira maciça utilizada na indústria moveleira é proveniente de plantios florestais, principalmente *Pinus*; o gênero *Eucalyptus* vem se consolidando no segmento de camas e salas de jantar e, recentemente, na fabricação de móveis de jardins para a exportação.

Porém, uma das principais desvantagens da madeira do gênero *Eucalyptus* é sua acentuada retratibilidade. Assim, uma forma atrativa de se melhorar a estabilidade dimensional e, conseqüentemente, agregar valor à madeira é o emprego de tratamentos térmicos no material.

A melhoria da estabilidade dimensional da madeira tratada pode ser obtida através da redução da higroscopicidade da madeira pela degradação térmica do seu constituinte mais hidrófilo, que são as hemiceluloses, pela ruptura dos polímeros da lignina e da celulose e pela criação de novas ligações químicas, também chamadas de reticulação.

Com a degradação das hemiceluloses também ocorre uma melhora da durabilidade da madeira à exposição de agentes xilófagos, e, com a perda de massa há um decréscimo na resistência mecânica da madeira tratada termicamente.

Contudo, cerca de 80.000 m³ de madeira sólida termorretificada é comercializada por ano na Europa (TJEERDSMA, 2006), sendo que pelo menos 10 empresas utilizam um dos processos de tratamentos térmicos desenvolvidos e patenteados na Finlândia (ThermoWood[®] Process), na França (Retification[®] e/ou Le Bois Perdure[®]), na Holanda (Plato-Process[®]) e na Alemanha (Oil-Heat-Treatment[®]). Salienta-se que as principais espécies de madeira termorretificadas são as dos gêneros *Aspen* sp, *Betula* sp, *Picea* sp, *Pinus* sp e *Populus* sp.

Desta forma, existe a necessidade da realização de estudos específicos sobre a temperatura e o tempo de termorretificação da madeira do gênero *Eucalyptus* sp para a produção de material com melhores características físicas e resistência aos agentes xilófagos e menores perdas na resistência mecânica.

Assim, devido ao plantio e à disponibilidade de madeira de *Eucalyptus grandis*, suas limitações físicas porém contornáveis através da termorretificação, verifica-se a necessidade do desenvolvimento desta técnica para a consolidação do uso desta madeira pela indústria.

2. OBJETIVOS

O presente estudo teve como objetivo geral avaliar o efeito da termorretificação na qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden.

Os objetivos específicos do trabalho foram avaliar o efeito da termorretificação sobre:

- a perda de massa e a variação em espessura da madeira serrada;
- as propriedades físicas da madeira, tais como massas específicas e inchamentos;
- a resistência da madeira ao fungo deteriorador *Picnoporus sanguineus*;
- as propriedades mecânicas da madeira, tais como compressão paralela às fibras, flexão estática e dureza Janka normal às fibras.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Propriedades da madeira

3.1.1. Propriedades físicas

Dentre as propriedades físicas, as que melhor caracterizam a madeira e, portanto, as mais importantes são: (1) densidade ou massa específica aparente - relação entre a massa e o volume da madeira, em g/cm^3 ou em kg/m^3 ; (2) teor de umidade - quantidade de água presente na madeira em relação ao seu peso seco, expresso em %; (3) retratibilidade - quantificação da instabilidade dimensional, em %, associada ao fenômeno de sorção de água na madeira (SKAAR, 1972, 1988; SIMPSON, 1991; HAYGREEN e BOWYER, 1996; OLIVEIRA, 1997, 2007; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999; SCANAVACA JR. e GARCIA, 2004).

3.1.1.1. Massa específica aparente

A massa específica aparente da madeira é uma das características que melhor expressa a sua qualidade, para o seu uso ou para a sua transformação industrial. Essa propriedade física caracteriza-se por apresentar uma variabilidade entre as espécies, entre os indivíduos de uma mesma espécie e ao longo do mesmo fuste.

Como a madeira é um material higroscópico, a sua massa específica é influenciada pelo seu teor de umidade. As massas específicas aparentes comumente utilizadas para caracterizar fisicamente as madeiras são: (1) massa específica aparente básica - relação entre a massa seca da madeira e o seu volume saturado; (2) massa específica aparente a 0% de umidade - relação entre a massa e o volume da madeira completamente seca; e (3) massa específica aparente a 12% de umidade - relação entre a massa e o volume da madeira a 12% de umidade (HAYGREEN e BOWYER, 1996).

Ribeiro e Zani Filho (1993) estudaram a massa específica básica da madeira de *Eucalyptus*, com idade entre 63 e 80 meses. Os autores classificaram as espécies em grupos, sendo que as madeiras de *E. dunni*, *E. pellita*, e *E. urophylla* foram agrupadas na classe com massa específica acima de $0,510 \text{ g/cm}^3$ e as de *E. grandis* e *E. saligna* na classe abaixo de $0,510 \text{ g/cm}^3$.

Verifica-se em estudo de caracterização da madeira de *Eucalyptus*, com 16 anos de idade, que as espécies *E. paniculata*, *E. citriodora* e *E. cloeziana* apresentaram madeira com massa específica básica estatisticamente iguais e em torno de $0,720$, $0,730$ e $0,690 \text{ g/cm}^3$. A madeira das espécies *E. tereticornis*, *E. pilularis*, *E. urophylla* e *E. grandis* apresentaram massa específica básica menores, estatisticamente diferentes e na ordem de $0,630$, $0,580$, $0,520$ e $0,460 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. O mesmo comportamento foi observado para as massas específicas aparente a 12% de umidade, sendo que as madeiras das espécies estudadas, apresentaram, respectivamente, valores de $0,920$, $0,890$, $0,850$, $0,790$, $0,730$, $0,670$ e $0,550 \text{ g/cm}^3$ (OLIVEIRA, 1997).

Zobel e Buijtenen (1989) e Haygreen e Bowyer (1996) também mostraram que a massa específica aumenta no sentido radial, até se apresentar de forma constante na madeira adulta. Porém, nas folhosas, o comportamento da massa específica da base para o topo do fuste é peculiar para cada uma das espécies.

Abuter (1989) estudando algumas propriedades físicas da madeira juvenil de *Eucalyptus globulus* verificou que a massa específica básica aumenta da medula à periferia do fuste, na ordem de $0,560$ para $0,720 \text{ g/cm}^3$. Oliveira e Silva (2003) verificaram que as massas específicas básicas da madeira de *Eucalyptus saligna* apresentam-se na ordem de $0,390$, $0,430$, $0,500$ e $0,550 \text{ g/cm}^3$, respectivamente, em quatro posições equidistantes, da medula em direção à casca.

Ribeiro e Zani Filho (1993), ainda observaram um aumento de 9,8% e 8,0% nas massas específicas básicas das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii* com o aumento da idade das árvores de 63 para 100 meses.

3.1.1.2. Relação água-madeira e instabilidade dimensional

Para entender como a água interfere na estabilidade dimensional da madeira é necessário conhecer as condições em que ela ocorre nas células lenhosas. Os tipos de água existentes na madeira são classificados da seguinte forma: (1) água livre - localizada nos lumes celulares, espaços intercelulares e aberturas de pontuações; e (2) água higroscópica - encontra-se adsorvida pelas paredes celulares, por pontes de hidrogênio presentes nos polímeros da madeira (GALVÃO e JANKOWSKY, 1988; SIMPSON, 1991; HAYGREEN e BOWYER, 1996, FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).

Segundo Skaar (1972, 1988), Haygreen e Bowyer (1996) e Forest Products Laboratory (1999), os polímeros de celulose possuem duas regiões: (1) cristalina - os grupos hidroxilas (OH) da celulose estão interligados e, portanto, não há sítios livres para a adsorção de água; e (2) amorfa - os grupos OH não estão interligados e encontram-se disponíveis para adsorver as moléculas de água.

Na secagem, a primeira água a ser removida é aquela contida nas cavidades celulares. Quando toda a água livre foi removida da madeira e a parede celular está saturada de água, define-se, então, o ponto de saturação das fibras (PSF) (SKAAR, 1972, 1988; SIMPSON, 1991; HAYGREEN e BOWYER, 1996). Simpson (1991) afirma que para as espécies, em geral, o PSF está estabelecido em 30% de umidade.

Abaixo do PSF começa a perda de água higroscópica até o teor de umidade em que a madeira entra em equilíbrio com as condições atmosféricas. Este ponto é denominado de teor de umidade de equilíbrio da madeira (TUE), e os principais fatores que o influenciam são: espécie, temperatura ambiente, umidade relativa do ar e histórico de exposição (GALVÃO e JANKOWSKY, 1988; SKAAR, 1988).

Quando uma peça de madeira, no PSF, é exposta à umidade relativa do ar decrescente, ela assumirá um TUE cada vez menor, formando uma curva de dessorção

sigmoidal. Quando essa mesma peça de madeira, depois de completamente seca, é exposta em umidade relativa do ar crescente, ela assumirá um TUE cada vez maior, cuja curva de adsorção também é uma sigmóide (SKAAR, 1972, 1988; GALVÃO e JANKOWSKY, 1988; HAYGREEN e BOWYER, 1996; OLIVEIRA, 1997, 2007; DEL MENEZZI, 2004).

No entanto, a Figura 1 mostra que, a curva de adsorção se posiciona abaixo da curva de desorção. Esta diferença é denominada de histerese e implica que a madeira se comporta diferentemente quando em contato com a água e quando essa é retirada (GALVÃO e JANKOWSKY, 1988; SKAAR, 1988; HAYGREEN e BOWYER, 1996; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999; DEL MENEZZI, 2004).

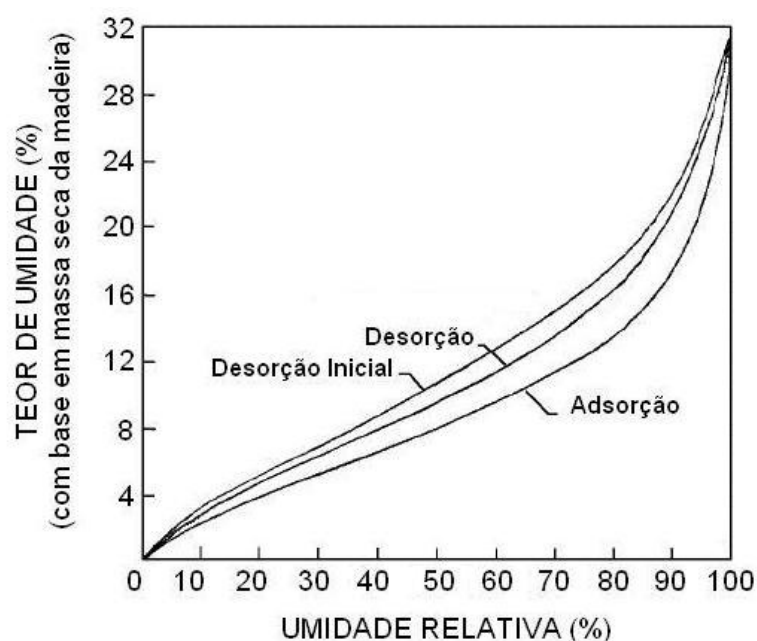


Figura 1. Curvas de adsorção e de desorção para a madeira (SKAAR, 1972; HAYGREEN e BOWYER, 1996; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).

As curvas de desorção e de adsorção de umidade pelas madeiras de *Albizia chinensis*, *Gmelina arbore*, *Erythrina variegata* e *Lannea coromandelica* evidenciam a característica de histerese. Durante a adsorção, as pontes de hidrogênio entre as moléculas de celulose são quebradas e substituídas por pontes de hidrogênio entre moléculas de celulose e de água, resultando no inchamento da madeira. Entretanto, na desorção as pontes de hidrogênio entre água e celulose são quebradas antes mesmo que toda a água livre seja evaporada, devido ao gradiente de umidade que se forma durante a secagem da peça de

madeira (CHAUHAN e AGGARWAL, 2004). Almeida e Hernández (2006) confirmam o fenômeno, ao mostrarem que, embora os PSF das madeiras de *Fagus grandifolia*, de *Broximum alicastrum* e de *Casiniana domestica* sejam 31%, 24% e 25%, as contrações já começam em teores de umidade de 40,2%, 43,0% e 56,0%, respectivamente.

Para Galvão e Jankowsky (1988), a causa mais provável dessa histerese seria o rearranjo das moléculas dos polímeros da madeira durante a secagem inicial, quando os grupos hidroxílicos seriam deslocados para uma distância menor entre si, estabelecendo pontes de hidrogênio e ficando indisponíveis para atrair e reter moléculas de água. Numa posterior adsorção, parte dessas hidroxilas continuaria a “satisfazer-se mutuamente” e, um menor número de sítios de adsorção estaria disponível.

Segundo Skaar (1972), Galvão e Jankowsky (1988) e Oliveira (1997, 2007), a forma das curvas de sorção de água na madeira são semelhantes para todas as espécies, entretanto a variação dos valores absolutos da higroscopicidade é função dos teores de celulose, lignina, hemiceluloses e extrativos totais. Verifica-se, na Figura 2, que as hemiceluloses são os constituintes químicos que mais contribuem com a adsorção de água pela madeira e que a lignina é um dos componentes mais hidrófobos.

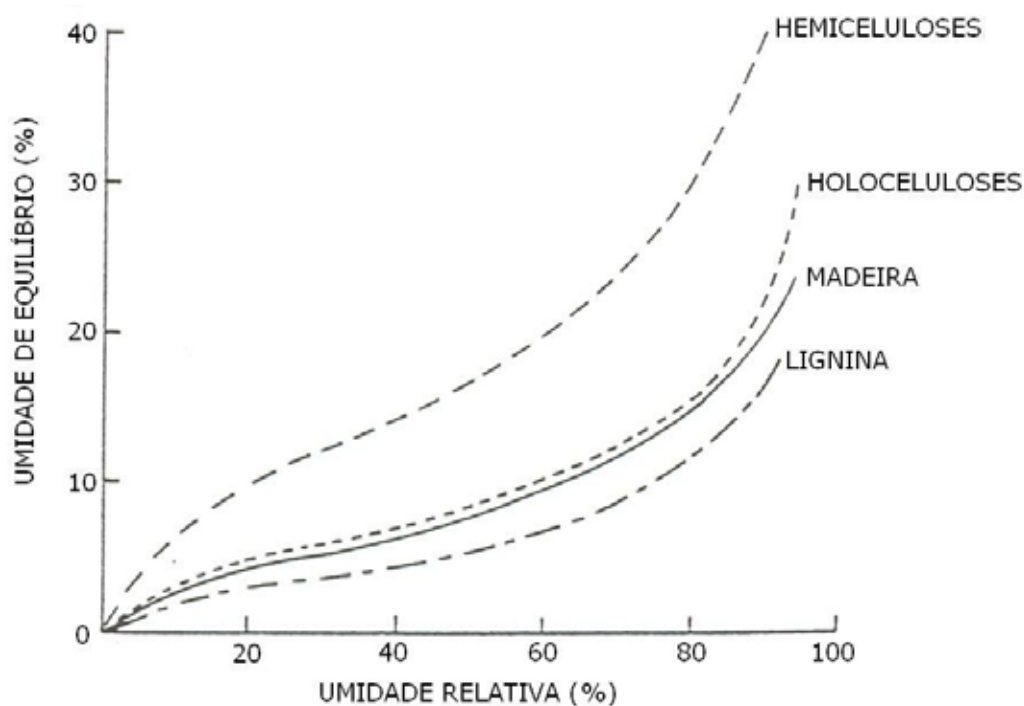


Figura 2. Isoterma higroscópica de adsorção para a madeira de *Eucalyptus regnans* e seus componentes químicos (SKAAR, 1972).

Quando a madeira perde água higroscópica, ela contrai devido à aproximação das cadeias de celulose e de hemiceluloses, ao passo que o seu inchamento é caracterizado pela adsorção de água. A contração e o inchamento apresentam-se diferenciados nos três planos anatômicos da madeira, sendo que nos planos tangencial, radial e longitudinal estão entre 3,50% e 15,00%, 2,40% e 11,00%, e 0,10% e 1,00%, respectivamente, e, originam a instabilidade dimensional (HAYGREEN e BOWYER, 1996; OLIVEIRA e SILVA, 2003; CHAUHAN e AGGARWAL, 2004; DEL MENEZZI, 2004).

Como as microfibrilas da camada S2 da parede secundária formam ângulos menores que 30° com o eixo longitudinal e, a maioria das células da madeira está disposta paralelamente à grã, as mudanças na direção longitudinal das microfibrilas é pequena com a remoção de água. Assim, a madeira pouco contrai na direção longitudinal e de modo considerável nos planos transversais (SKAAR, 1988; SIMPSON, 1991; HAYGREEN e BOWYER, 1996).

A madeira de *Fagus grandifolia* apresenta, respectivamente, os seguintes valores médios para as contrações volumétrica e lineares tangencial e radial máximas: 13,00%, 9,50% e 4,00%. As mesmas propriedades físicas apresentam-se na ordem de 8,00%, 5,70% e 2,90% para a madeira de *Broximum alicastrum* e, respectivamente, em torno de 8,10%, 5,00% e 3,20% para a de *Casiniana domestica* (ALMEIDA e HERNÁNDEZ, 2006).

Para a madeira adulta de *Pinus taeda*, com 37 anos de idade, os respectivos valores das contrações volumétricas e lineares tangencial, radial e longitudinal máximas foram 14,20%, 7,89%, 6,43% e 0,47%. Na madeira juvenil da mesma espécie, esses valores foram de 12,26%, 7,42%, 4,84% e 0,41%, respectivamente (LARA PALMA e BALLARIN, 2003).

Rezende (2003), no estudo das mesmas propriedades físicas para a madeira proveniente de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* com 8 anos, encontrou valores de 10,63%, 5,79%, 4,39% e 0,64%, para as contrações volumétricas e lineares tangencial, radial e longitudinal máximas.

Skaar (1972, 1988), Haygreen e Bowyer (1996) e Forest Products Laboratory (1999) salientam que um parâmetro tão importante quanto a retratibilidade é o seu

Fator Anisotrópico (FA), razão entre as retrações tangencial e radial. E, que sendo próximo de um revela uma madeira com maior estabilidade dimensional.

Entretanto, as madeiras do gênero *Eucalyptus* caracterizam-se por apresentar valores bastante elevados quando comparados com outras madeiras de mesma faixa de massa específica (OLIVEIRA, 1997, 2007; SILVA e OLIVEIRA, 2003).

Trugilho et al. (1997) verificaram que as madeiras da espécie *Eucalyptus grandis* e do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* apresentaram contrações volumétricas máximas na ordem de 15,86% e 20,86%.

A madeira de *Eucalyptus urophylla*, com 19 anos de idade, apresentou os seguintes valores para as contrações volumétrica e lineares tangencial, radial e longitudinal máximas: 19,77%, 12,49%, 7,18% e 0,11% (SCANAVACA JR. e GARCIA, 2004).

Em estudo semelhante, Silva e Oliveira (2003) verificaram que a madeira de *Eucalyptus saligna*, com 16 anos de idade, apresentou valores médios para as contrações volumétrica e lineares tangencial e radial máximas na ordem de 26,00%, 14,83% e 7,67%, respectivamente.

Oliveira (1997) confirma em seu estudo de caracterização da madeira de várias espécies de *Eucalyptus*, com 16 anos de idade, que este gênero possui espécies com alta instabilidade dimensional. A Tabela 1 mostra as contrações das madeiras estudadas pelo autor.

Tabela 1. Valores médios das contrações máximas (%) e fator anisotrópico para a madeira de sete espécies de Eucalipto (OLIVEIRA, 1997).

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

Conhecidas as causas da instabilidade dimensional da madeira, as seguintes técnicas são propostas para amenizar o problema: laminação cruzada, revestimento, alteração química, preenchimento e tratamentos térmicos (SKAAR, 1988). Entre estes métodos, a termorreificação é uma técnica que vem sendo empregada por vários autores para melhorar a estabilidade dimensional e aumentar a durabilidade biológica das madeiras (MILITZ e TJEERDSMA, 2001; RAPP e SAILER, 2001; SYRJÄNEN, 2001; VERNOS, 2001; BEKHTA e NIEMZ, 2003; JUODEIKIENĖ e MINELGA, 2003; WEILAND e GUYONNET, 2003; ROUSSET et al., 2004; WIKBERG e MAUNU, 2004; HAKKOU et al., 2005a, 2005b).

3.1.2. Durabilidade biológica

A durabilidade biológica ou natural da madeira é a capacidade inerente da espécie em resistir à ação dos agentes degradadores, incluindo os agentes físicos, os químicos e os biológicos (GOMES e FERREIRA, 2002; PAES, 2002).

A madeira é degradada biologicamente porque os organismos reconhecem os polímeros naturais da parede celular como fonte de nutrição e, os metabolizam em unidades digeríveis através da ação de sistemas enzimáticos específicos (OLIVEIRA et al., 1986).

Os fungos são organismos que necessitam de compostos orgânicos como fonte de alimento. Aqueles que utilizam os componentes químicos da madeira são conhecidos como fungos xilófagos (OLIVEIRA et al., 1986; LELIS et al., 2001) e são os principais e mais importantes agentes biodeterioradores das madeiras existentes no mundo (OLIVEIRA, 1997).

Os fatores que facilitam a deterioração da madeira por fungos são os teores de umidade do material acima de 25%, a temperatura entre 20°C e 35°C e os baixos teores de extrativos totais presentes na madeira (OLIVEIRA et al., 1986; LELIS et al., 2001). Para Forest Products Laboratory (1999) as condições ótimas para o desenvolvimento dos fungos compreendem temperaturas entre 10°C e 35°C e madeira com teores de umidade em torno de 20% a 30%.

Oliveira et al. (1986), Oliveira (1997), Forest Products Laboratory (1999) e Lelis et al. (2001) citam que os fungos xilófagos são reunidos, em função do tipo de ataque à madeira, nos seguintes grupos: (1) Fungos Emboloradores e/ou Manchadores - responsáveis por alterações na superfície da madeira e popularmente conhecidos como bolor e/ou por manchas profundas no alburno das madeiras devido à presença de hifas pigmentadas ou de pigmentos liberados pelos fungos. As propriedades mecânicas das madeiras atacadas por esses fungos são pouco alteradas, pois esses organismos não possuem complexos enzimáticos capazes de degradar os polímeros da madeira e apenas utilizam as substâncias de fácil assimilação (açúcares simples, proteínas e gorduras) encontradas nos lumes celulares; e (2) Fungos Apodrecedores - responsáveis por profundas alterações nas propriedades físicas e mecânicas das madeiras, devido às progressivas deteriorações das moléculas que constituem as suas paredes celulares. Os fungos apodrecedores são agrupados conforme o tipo de deterioração da madeira: (2.1) Fungos de Podridão Branca - tornam a madeira esbranquiçada devido, principalmente, à degradação da lignina; (2.2) Fungos de Podridão Parda - causam a coloração pardo-escura devido à degradação da celulose e das hemiceluloses da madeira; e (2.3) Fungos de Podridão Mole - amolecem as superfícies das madeiras, com altos teores de umidade e quando se encontram em baixa disponibilidade de oxigênio, devido à degradação das hemiceluloses e da celulose.

Assim, a durabilidade biológica apresenta-se como uma das propriedades de maior importância para a caracterização da madeira como material de construção (OLIVEIRA, 1997) e, é de suma importância para que se possa recomendar um emprego mais adequado do material, evitar gastos desnecessários com reposição de peças deterioradas e reduzir os impactos sobre as florestas naturais remanescentes (PAES et al., 2004).

Gomes e Ferreira (2002) estudaram a influência das condições ambientais sobre a durabilidade natural de algumas madeiras tropicais. A madeira de *Licaria mahuba* (maúba) apresentou 89% de resistência aos agentes xilófagos após 6 anos em campo de apodrecimento, em terra firme e a pleno sol, e apenas 20% de resistência biológica no mesmo período e na mata sombreada. Entretanto, nas respectivas condições ambientais, a madeira de *Manikara huberi* (maçaranduba) apresentou comportamento inverso, sendo que a sua resistência aos agentes xilófagos foi de 17% e 83%, respectivamente.

Jesus et al. (1998) concluíram que, também, há uma grande variabilidade na durabilidade natural das espécies de madeira mediante aos organismos xilófagos. Os autores avaliaram a durabilidade biológica da madeira de 46 (quarenta e seis) espécies florestais nativas da região amazônica e verificaram que 50,0% do número dessas espécies são classificadas como altamente duráveis, pois 60,0% de suas estacas apresentaram deterioração intensa somente após 8 anos em ensaio de campo de apodrecimento. Nas classes de madeiras não duráveis (àquelas que resistem menos de 2 anos), de moderadamente duráveis (resistência de 2 a 5 anos) e de duráveis (5 a 8 anos de resistência natural) enquadraram, respectivamente, 13,1%, 21,7% e 15,2% das espécies.

Paes et al. (2004) avaliaram a resistência natural, em condições de laboratório, da madeira de 9 (nove) espécies do semi-árido brasileiro e concluíram que fungos xilófagos não atacam as diferentes madeiras com a mesma intensidade. O alburno de *Schinopsis brasiliensis* (Brauna) foi o lenho mais deteriorado pelos fungos *Postia placenta* e *Neolentinus lepideus*, com, respectivamente, cerca de 35,96% e 38,26% de perda de massa. Nas mesmas condições, a madeira que teve o alburno menos deteriorado foi a *Senna siamea* (Cássia), com perda de massa de 1,87% e 2,76%. Os corpos-de-prova retirados do cerne interno (próximo à medula), do cerne intermediário e do cerne externo (próximo ao alburno) da madeira de *Aspidosperma pyrifolium* (Pereiro) foram os que apresentaram a menor resistência significativa ao fungo *Postia placenta*, com perdas de massa na ordem de 37,54%, 34,23% e 21,07%, respectivamente. Os cernes que apresentaram maior resistência à ação do mesmo fungo foram os da madeira de *Tabebuia impetiginosa* (Ipê), respectivamente, com perda de massa de 0,44%, 1,13% e 0,49%.

As madeiras com alta resistência natural devem esta característica à presença, em seu cerne, de substâncias de natureza fenólica com propriedades fungicidas e inseticidas. Entretanto, os extrativos não se distribuem homogeneamente pelo fuste, sendo que a sua maior concentração e, conseqüentemente, a maior resistência natural ocorre nos lenhos das partes externas do cerne e próximos à base da árvore. No alburno, devido aos baixos teores de extrativos totais a resistência natural desse tipo de lenho é baixa (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999; OLIVEIRA et al., 1986; OLIVEIRA, 1997; PAES, 2002, 2004).

Guilley et al. (2004) concluíram que há uma variação de 10,5% na resistência da madeira no sentido da medula à casca e que a resistência da madeira diminui do

cerne externo para o interno. Segundo os autores, 65,8% dos corpos-de-prova do cerne externo e 62,7% do cerne interno de *Quercus petraea*, quando expostos ao fungo *Coriolus versicolor*, apresentaram perda de massa inferior a 15,00% e foram classificados como muito durável.

Paes (2002) avaliou o efeito do tipo de lenho na resistência natural da madeira de *Corymbia maculata* aos fungos xilófagos, em condições de laboratório ($27\pm 1^\circ\text{C}$ e $65\%\pm 5\%$ por 12 semanas). Segundo o autor, a madeira de alburno foi, significativamente, a mais deteriorada pelos fungos *Postia placenta*, *Neolentinus lepideus* e *Polyporus fumosus*, e respectivamente, apresentou perda de massa na ordem de 20,62%, 25,46% e 13,83%. Os corpos-de-prova retirados do cerne interno, do cerne intermediário e do cerne externo foram classificados como altamente resistentes pois apresentaram perda de massa inferior a 10%. Entretanto, a parte mais externa do cerne foi o lenho que apresentou maior resistência significativa mediante a ação dos fungos *Postia placenta*, *Neolentinus lepideus* e *Polyporus fumosus*, com, respectivamente, perdas de massa na ordem de 5,12%, 4,19% e 4,81%.

Contudo, Abreu et al. (2007) ao caracterizarem a resistência natural da madeira de *Eucalyptus* sp concluíram que o material inoculado com *Pycnoporus cinnabarinus* apresentou perda de massa de 22,57% e 28,10%, após 8 e 16 semanas de incubação.

Costa et al. (2005) estudaram o estado de sanidade das madeiras de *Pinus elliottii*, de *Eucalyptus grandis* e de *Eucalyptus saligna* e concluíram que os moirões da conífera são totalmente deteriorados durante os 3 primeiros anos e que os das folhosas resistem no máximo por 4 anos, em campo de apodrecimento. Como os moirões impregnados quimicamente sob pressão apresentaram valores de estado de sanidade acima de 9,0 (sadios ou levemente atacados por agentes xilófagos) após 10 anos em contato direto com o solo, os autores concluíram que esse tratamento químico é o mais eficiente para aumentar a resistência biológica das madeiras de rápido crescimento.

Porém, Oliveira et al. (1986) salientam que há três linhas de ação para impedir, ou pelo menos atenuar, a ação dos agentes deterioradores da madeira: (1) usar madeira com elevada resistência biológica; (2) incorporar produtos químicos, conhecidos como preservativos, na madeira; ou (3) promover alterações químicas permanentes na estrutura dos componentes poliméricos da madeira com o intuito de impedir o reconhecimento do substrato pelos fungos.

3.1.3. Propriedades mecânicas

A realização de um ensaio de uma determinada propriedade mecânica é condicionado ao uso final do produto e aos interesses científicos e econômicos.

Os principais ensaios realizados para fazer a caracterização mecânica da madeira são: compressão paralela e normal às fibras, cisalhamento paralelo às fibras, flexão estática, dureza paralela e normal às fibras e tração paralela e normal às fibras; sendo os quatros primeiros considerados de primeira importância (BODIG e JAYNE, 1982; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).

Nos ensaios de caracterização da madeira, através da tensão que é aplicada em um corpo-de-prova e a correspondente deformação específica associada a ela, determina-se o diagrama tensão deformação específica como ilustra o esquema da Figura 3B. Quando a tensão aplicada supera o limite elástico do material passam a ocorrer deformações plásticas, que se prolongam até a ruptura do material (BODIG e JAYNE, 1982; HAYGREEN e BOWYER, 1996; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).

A tensão é definida como a força distribuída por unidade de área e é expressa por pascal (N/m^2) ou por psi (lb/in.^2). A deformação é a variação da dimensão considerada por unidade de comprimento e, portanto, é adimensional. Percebe-se, com o auxílio da Figura 3A, que a aplicação de uma força de 8000 libras num corpo-de-prova de compressão paralela às fibras, com área de contato de 4 polegadas quadradas, gera uma tensão de 2000 psi. A tensão atua ao longo do corpo-de-prova e promove uma deformação de 0,0072 polegada ao longo de suas 6,000 polegadas de comprimento inicial, gerando uma deformação resultante de $0,0072/6,000$ que é equivalente a 0,0012 polegada/polegada. No limite de proporcionalidade, ainda há uma relação linear entre a tensão e a deformação específica resultante (HAYGREEN e BOWYER, 1996).

Abaixo do limite de proporcionalidade, a razão entre tensão e deformação específica é dada pela inclinação da reta e, apresenta-se, como um valor constante chamado de módulo de elasticidade (MOE). A determinação do MOE é feita na região de comportamento elástico do material, tanto nos ensaios de flexão como nos de compressão ou nos de tração (KOLLMANN e CÔTÉ, 1968; BODIG e JAYNE, 1982; HAYGREEN e BOWYER, 1996).

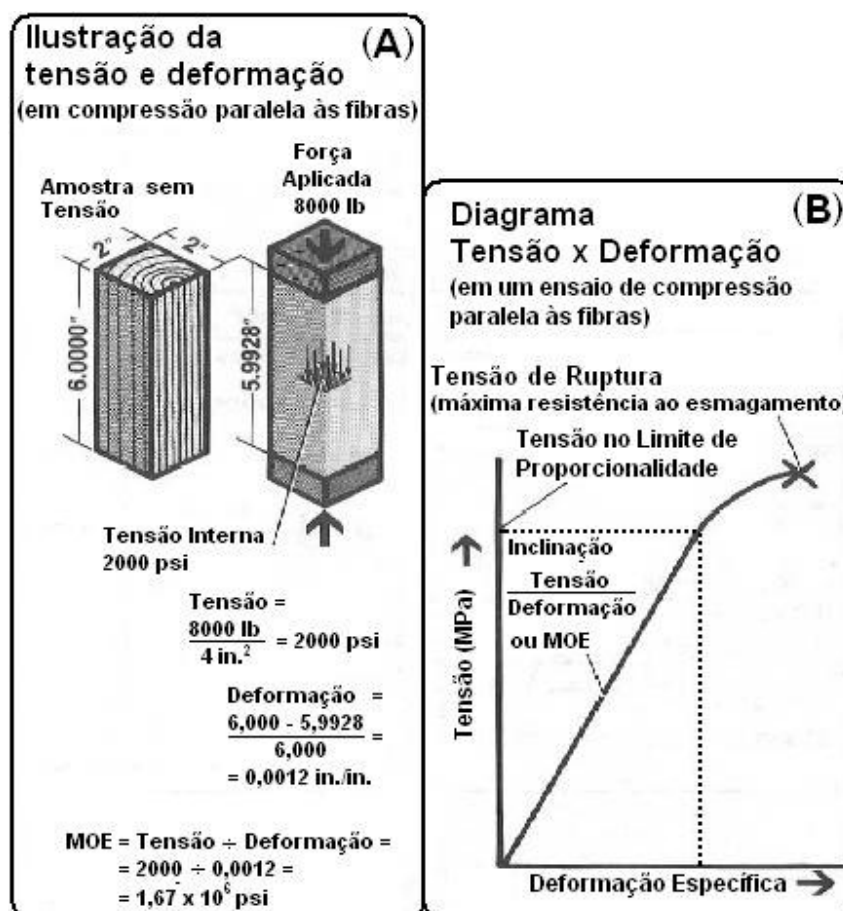


Figura 3. Ilustração de ensaio de compressão paralela às fibras (A) e diagrama de tensão deformação específica (B) (adaptado de HAYGREEN e BOWYER, 1996).

Quando se mede a máxima tensão que a madeira suporta (na ruptura) determina-se a sua resistência mecânica, que no caso particular do ensaio de flexão é denominada de módulo de ruptura (MOR). Os valores de resistência mecânica são utilizados para a obtenção das tensões admissíveis para as diversas formas de utilização da madeira (BODIG e JAYNE, 1982; HAYGREEN e BOWYER, 1999; OLIVEIRA, 2007).

Os valores do MOE e do MOR variam em função da espécie, do teor de umidade em que se encontra a madeira e da massa específica do material. Segundo Haygreen e Bowyer (1996), o MOE em flexão das madeiras varia entre 3500 MPa e 19300 MPa.

Na Tabela 2, verificam-se as influências da massa específica e da umidade sobre os valores de algumas propriedades mecânicas, de algumas espécies comerciais importantes (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999; OLIVEIRA, 2007).

Tabela 2. Propriedades mecânicas de algumas espécies comerciais importantes (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).

Espécie	Umidade (%)	ρ_b (g/cm ³)	Flexão Estática (MPa)		Resistência em Compressão Paralela às Fibras (MPa)
			MOR	MOE	
<i>Pinus caribaea</i>	verde	0,68	77,2	13000	33,8
	12%		115,1	15400	58,9
<i>Pinus oocarpa</i>	verde	0,55	55,2	12000	25,4
	12%		102,7	15500	53,0
<i>Pinus radiata</i>	verde	0,42	42,1	8100	19,2
	12%		80,7	10200	41,9
<i>Araucaria angustifolia</i>	verde	0,46	49,6	9300	27,6
	12%		93,1	11100	52,8
<i>Aspidosperma sp.</i>	verde	0,66	75,2	8900	38,2
	12%		83,4	10500	54,6
<i>Tabebuia sp.</i>	verde	0,92	155,8	20100	71,4
	12%		175,1	21600	89,7
<i>Eucalyptus marginata</i>	verde	0,67	68,3	10200	35,8
	12%		111,7	13000	61,2
<i>Eucalyptus diversicolor</i>	verde	0,82	77,2	13400	37,6
	12%		139,0	17900	74,5

sendo: ρ_b - massa específica aparente básica; MOR - módulo de ruptura; MOE - módulo de elasticidade.

Oliveira (1997) confirma em seu estudo de caracterização da madeira de várias espécies de *Eucalyptus*, com 16 anos de idade, que as espécies com alta massa específica são as que apresentam as maiores resistências mecânicas (Tabela 3).

Tabela 3. Valores médios das propriedades mecânicas, em madeira verde, de sete espécies de Eucalipto (OLIVEIRA, 1997).

Espécie	ρ_b (g/cm ³)	Flexão Estática (MPa)		Resistência em Compressão Paralela às Fibras (MPa)
		MOR	MOE	
<i>Corymbia citriodora</i>	0,72	96,0	12511	49,0
<i>E. paniculata</i>	0,72	95,0	12485	49,0
<i>E. cloeziana</i>	0,69	90,0	12017	46,0
<i>E. tereticornis</i>	0,63	79,0	11104	42,0
<i>E. pilularis</i>	0,55	67,0	9968	36,0
<i>E. urophylla</i>	0,52	60,0	9398	34,0
<i>E. grandis</i>	0,46	52,0	8584	30,0

sendo: ρ_b - massa específica aparente básica; MOR - módulo de ruptura; MOE - módulo de elasticidade.

Dentre as propriedades de resistência da madeira, a dureza também tem se destacado por ser uma importante ferramenta na caracterização de espécies florestais. Com base nos seus valores e de outras propriedades pode-se verificar a capacidade de resistência de cada material (BODIG e JAYNE, 1982; HAYGREEN e BOWYER, 1996; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).

Dickson et al. (2003) ao caracterizarem a madeira de *Eucalyptus dunnii*, com 9 e 25 anos de idade, verificaram que os valores de dureza Janka aumentam com a idade da árvore e apresentam-se em torno de 45,2 MPa e 63,0 MPa, respectivamente.

3.2. Processos de termorretificação da madeira

Muitos processos de termorretificação da madeira são descritos na literatura. Em geral, eles apresentam em comum o fato da madeira ser exposta a temperaturas próximas à 200°C durante várias horas (WASKETT e SELMES, 2001; RAPP, 2001; ROUSSET et al., 2004; METSÄ-KORTELAJINEN et al., 2005).

Segundo Homan et al. (2000), Rapp (2001), Waskett e Selmes (2001), Alén et al. (2002), Momohara et al. (2003), Rousset et al. (2004) e Metsä-Kortelainen et al.

(2005), atualmente os tratamentos térmicos utilizados comercialmente na Europa com o objetivo de melhorar a estabilidade dimensional e aumentar a resistência biológica da madeira, são: “ThermoWood® Process” (na Finlândia), “Retification®” e “Le Bois Perdure®” (ambos na França), “Plato-Process®” (na Holanda) e “Oil-Heat-Treatment®” (na Alemanha). As principais diferenças entre esses tratamentos são: temperatura máxima aplicada, uso ou não de atmosfera inerte com nitrogênio ou com vapor, uso de óleos e/ou se o processo é adequado para a madeira seca ou úmida.

Syrjänen (2001), Jämsä e Viitaniemi (2001) e Metsä-Kortelainen et al. (2005) afirmam que, o “ThermoWood® Process” é baseado no aquecimento a altas temperaturas (150°C a 250°C) utilizando-se vapor de água como gás protetor. O processo consiste de três fases: (1) período de aumento de temperatura - utiliza-se uma temperatura preliminar de 100°C, que pode perdurar por até 48 horas, até o início da fase 2. A secagem do material pode ser inserida neste período e o teor de umidade da madeira não deve ser inferior a 10%; (2) aquecimento - utiliza-se uma temperatura constante (entre 150°C e 240°C) durante 0,5 a 4 horas, em função da espécie de madeira e da qualidade desejada do produto; e (3) resfriamento e estabilização - decréscimo da temperatura até a temperatura ambiente, fase que dura aproximadamente 24 horas.

Vernois (2001) e Metsä-Kortelainen et al. (2005) afirmam que, na França existem dois processos comerciais de tratamentos térmicos da madeira: (1) “Retification®” - consiste em colocar a madeira previamente seca (12% de umidade) sob temperatura de 210°C a 240°C, em atmosfera com alta concentração de nitrogênio e apenas 2% de oxigênio; e (2) “Le Bois Perdure®” - consiste em secar artificialmente a madeira verde e em seguida aquecer com até 230°C de temperatura, sob atmosfera com vapor.

Entretanto, Homan et al. (2000) e Militz e Tjeerdsma (2001) ao caracterizarem o “Plato-Process®” afirmam que neste processo deve ser utilizada madeira verde, pois a abundância de água na parede celular provoca o aumento da reatividade dos componentes químicos da madeira. Os autores afirmam que o processo é composto de três fases: (1) hidrotermólise da madeira - aquecimento da madeira verde entre 160°C e 190°C, durante 4 a 5 horas, para que ocorra a despolimerização das hemiceluloses por hidrólise ácida e, formação do furfural, composto monomérico e hidrofóbico; (2) secagem convencional da madeira tratada por 3 a 5 dias, até que a madeira atinja 10% de umidade; e (3) cura da madeira

modificada - aquecimento da madeira, sob 170°C a 190°C por 14 a 16 horas, para que ocorra a (re)condensação dos componentes em um polímero complexo e modificado (reticulação).

Boonstra e Tjeerdsma (2006) estudaram o efeito dos estágios de hidrotermólise, entre 165°C e 185°C por 30 minutos, e de cura, entre 170°C e 180°C por 4 horas, sobre a composição química da madeira de *Picea abies*, *Pinus sylvestris* e *Pinus radiata*. Os autores confirmaram que durante a primeira fase ocorre a produção de ácido acético, que catalisa a reação de despolimerização das hemiceluloses e produz monômeros de furfural, e, na segunda fase ocorre a degradação da região amorfa da celulose e das hemiceluloses e as reações de condensação e reticulação da lignina, responsáveis pela redução da higroscopicidade da madeira.

Já, Rapp e Sailer (2001) explicam que no “Oil-Heat-Treatment[®]”, o óleo aquecido entre 180°C e 220°C circula, durante 2 a 4 horas, em torno de cargas de madeira acondicionadas no interior de uma autoclave sem a aplicação de pressão. Os mesmos autores afirmam que o ponto de ebulição de muitos óleos e resinas é maior do que a temperatura requerida para tratar termicamente a madeira e isso permite a opção de tratar a madeira através do banho em óleo quente.

Em escala laboratorial, a termorretificação da madeira é realizada por alguns pesquisadores em estufa elétrica, na qual a madeira é submetida ao ar aquecido com temperaturas entre 100°C e 200°C durante um período que varia de 2 a 24 horas, para que ocorra a degradação das hemiceluloses e a condensação dos componentes em um polímero complexo e modificado (BEKHTA e NIEMZ, 2003; JUODEIKIENĖ e MINELGA, 2003; POPPER et al., 2005; BRITO et al., 2006).

3.3. Degradação térmica da madeira

O aquecimento da madeira em altas temperaturas ocasiona a degradação de alguns de seus componentes químicos, o que, consequentemente, altera o seu desempenho (STAMM, 1956; HAYGREEN e BOWYER, 1996; SCHNIEWIND, 1989; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999; HOMAN et al., 2000; WASKETT e SELMES, 2001).

A degradação da madeira apresenta comportamento diferenciado conforme as condições do processo utilizado. Essa degradação e, conseqüentemente, as mudanças nas propriedades que caracterizam a madeira (cor, umidade de equilíbrio, retração e inchamento, durabilidade biológica e propriedades mecânicas) estão relacionadas com fatores inerentes à madeira: espécie, teor de umidade e dimensão das peças; e ao processo: temperatura, tempo de exposição, gradiente de temperatura e condições da atmosfera do tratamento (STAMM, 1956; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999; HOMAN et al., 2000; ZAMAN et al., 2000; JÄMSÄ e VIITANIEMI, 2001; MILITZ e TJEERDSMA, 2001; RAPP, 2001; RAPP e SAILER, 2001; SYRJÄNEN, 2001; VERNOS, 2001; WASKETT e SELMES, 2001; DEL MENEZZI, 2004; ROUSSET et al., 2004; ALÉN et al., 2005; HAKKOU et al., 2005a, 2005b).

Quando a superfície da madeira é aquecida por mecanismos de irradiação e/ou convecção de calor originam-se zonas isotérmicas, com a forma definida pela superfície exposta ao aquecimento. Quanto maior for o teor de umidade da peça de madeira maior será a quantidade de calor necessária para elevar a sua temperatura, devido ao consumo de energia durante a evaporação da água. Contudo, a água aumenta a condutividade térmica da madeira, aumentando, conseqüentemente, o fluxo de calor pela região úmida. No processo de degradação térmica da madeira, inicialmente, o avanço da isoterma T_0 (temperatura pouco acima da temperatura inicial da madeira) cria uma região cuja temperatura está compreendida entre T_0 e 200°C. Nesta região ocorre a liberação e o fluxo de vapor de água e de traços de gás carbônico e de ácidos acético e fórmico. Enquanto a isoterma T_0 avançar, haverá um fluxo efluente de vapor de água que expulsa o ar e cria um ambiente sem oxigênio, impedindo a reação de combustão, e permitindo a ocorrência das reações de pirólise. Mantido o aquecimento externo, a temperatura da superfície da peça de madeira eleva-se até 280°C, formando uma nova isoterma entre 200°C e 280°C, e deslocando a isoterma T_0 -200°C para o interior da peça. Na isoterma 200-280°C ocorre a pirólise suave da madeira, de caráter endotérmico, com a liberação de vapor de água, dióxido de carbono e de ácidos acético e fórmico juntamente com os produtos originados da isoterma T_0 -200°C. Se a temperatura da madeira eleva-se acima de 280°C ocorrerá o surgimento de novas isotermas. A partir de 320°C ocorre a degradação da lignina e da celulose, com caráter exotérmico e, conseqüentemente,

através da combustão dos produtos gerados na pirólise e formação de carvão vegetal (OLIVEIRA et al., 1986; BRITO, et al., 2006).

Durante a termorretificação ocorre a formação de ácidos carbônicos, principalmente dos ácidos acético e fórmico, devido, respectivamente, à ruptura dos grupos acetilas das hemiceluloses e à degradação das hexoses (MILITZ e TJEERDSMA, 2001; WASKETT e SELMES, 2001; TJEERDSMA e MILITZ, 2005; SUNDQVIST et al., 2006). A Figura 4 mostra que estes ácidos catalisam as reações de desacetilação dos carboidratos, formando estruturas monoméricas e oligoméricas. Com a ruptura das unidades de pentoses e de hexoses dos açúcares monoméricos, formam-se, respectivamente, os aldeídos furfural e hidroximetilfurfural (MILITZ e TJEERDSMA, 2001; MARTON et al., 2003; TJEERDSMA e MILITZ, 2005). Posteriormente, ainda sob condições de altas temperaturas, ocorre a ruptura de algumas ligações da lignina resultando em aumento da concentração de grupos fenólicos, que reagem com os grupos aldeídos (monômeros de furfural e de hidroximetilfurfural) formando um complexo polimérico modificado. A extensão dessas reações é suave, mas elas promovem uma reticulação entre a lignina e os polímeros resultantes da degradação térmica e, conseqüentemente, reduz a higroscopicidade das celulosas e melhora a estabilidade dimensional da madeira (BHUIYAN et al., 2000; HOMAN et al., 2000; MILITZ e TJEERDSMA, 2001; WASKETT e SELMES, 2001; YILGOR et al., 2001; ROUSSET et al., 2004; SCHWANNINGER et al., 2004; WIKBERG e MAUNU, 2004; HAKKOU et al., 2005b; REPELLIN e GUYONNET, 2005; BOONSTRA e TJEERDSMA, 2006).

Lepage (1986) salienta que as folhosas são termodegradadas mais facilmente do que as coníferas, desde que expostas numa mesma condição de temperatura. Dentre as razões para explicar essa diferença destacam-se: (1) o componente hemicelulósico majoritário nas folhosas são as xilanas, que correspondem por 15 a 30% das massas secas das madeiras e são facilmente hidrolizadas em meio ácido, e, nas coníferas, as hemiceluloses, são constituídas quase que essencialmente por unidades de Galactoses e Glucomanas, que correspondem por 20% da massa seca desse tipo de madeira e suas ligações são dificilmente quebradas por ácidos; (2) as folhosas possuem maior quantidade de grupos acetila em suas hemiceluloses, do que as coníferas; e (3) as coníferas possuem maiores teores de lignina e menores de hemiceluloses do que as folhosas.

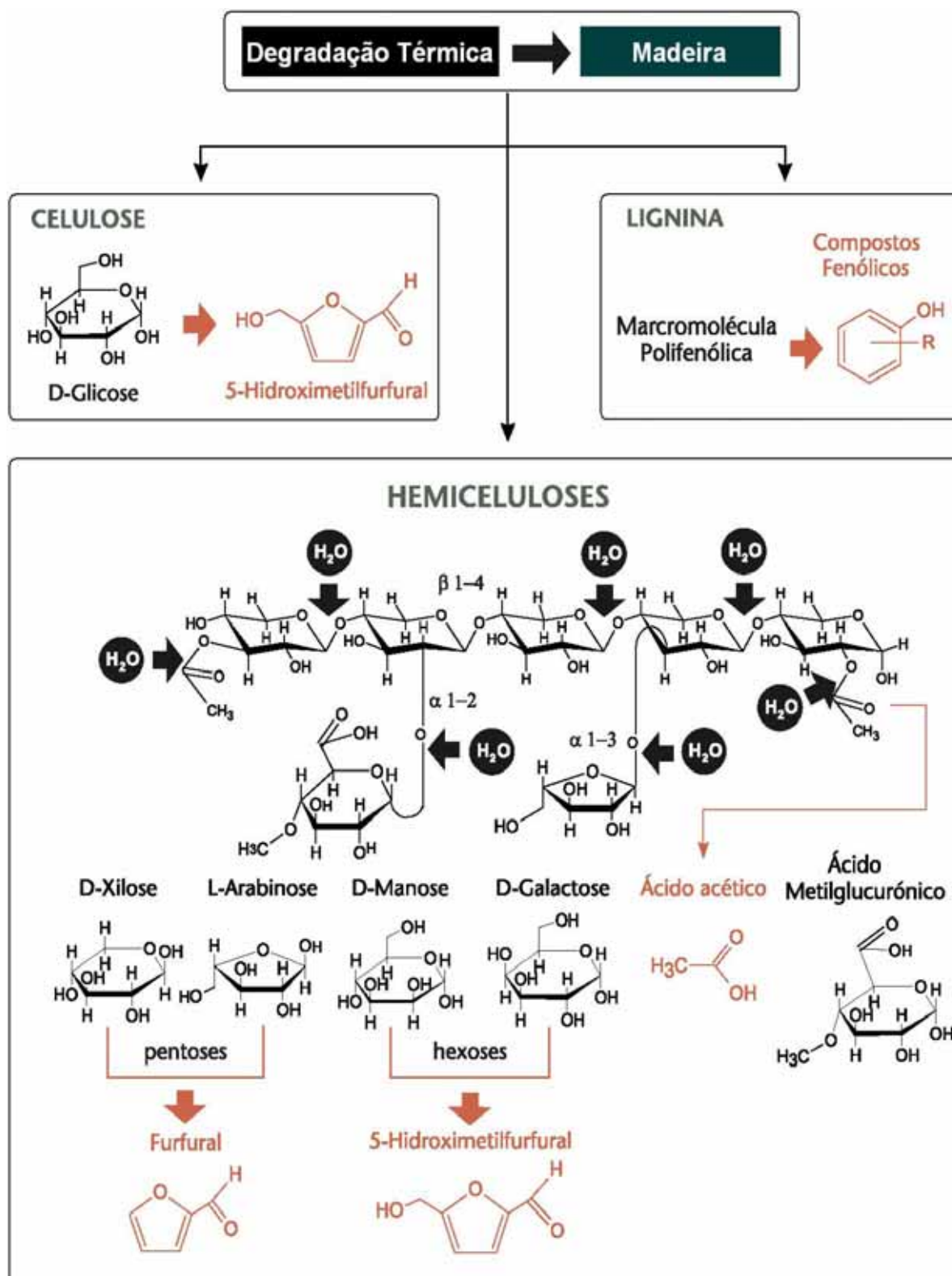


Figura 4. Degradação térmica da madeira (MARTON et al., 2003).

Esteves et al. (2007) estudaram o efeito da termorretificação entre 190°C e 210°C nas madeiras de *Pinus pinaster* e de *Eucalyptus globulus* e concluíram que a folhosa apresentou perda de massa, melhora no teor de umidade de equilíbrio e na estabilidade dimensional e reduções no MOR e no MOE em flexão, na ordem de 14,5%, 61,0%, 90,0%, 50,0% e 15,0%, respectivamente. A conífera estudada foi menos influenciada pelo tratamento, devido à sua composição química, sendo que as respectivas variáveis foram reduzidas em cerca de 7,3%, 46,0%, 57,0%, 40,0% e 5,0%.

O lenho de compressão, eventualmente encontrado em coníferas, e o lenho juvenil presente tanto nas folhosas quanto nas coníferas, são caracterizados pelo alto teor de lignina quando comparados com a madeira normal e adulta e, portanto, apresentam claramente um efeito adverso à modificação química provocada pelos tratamentos térmicos. As perdas de massa provocadas pela termorretificação tanto no lenho de compressão quanto no juvenil são, respectivamente, reduzidas em 38% e em 40% quando comparadas com as perdas de massa no lenho normal e adulto (PAPADOPOULOS, 2006).

Entretanto, com a determinação da composição química dos produtos voláteis coletados por um condensador acoplado na saída dos gases do termorretificador, regulado com temperaturas entre 180°C e 225°C durante 2 a 8 horas, ficou evidente a degradação das hemiceluloses da madeira de *Picea abies*. Constata-se que o aumento do tempo e da temperatura do tratamento promove o aumento da percentagem do ácido acético e diminui a percentagem do ácido fórmico no total de ácidos orgânicos produzidos. Após 2,9 horas e a 180°C, os ácidos acético e fórmico correspondem a 67,3% e 24,6% do total dos gases produzidos; e após 6,8 horas do início da termorretificação e a 225°C, os mesmos ácidos correspondem a 76,1% e 12,2% do produto volatilizado (ALÉN et al., 2002).

A madeira de *Betula pubescens* termorretificada com temperaturas entre 160°C e 200°C, durante 1 a 4 horas, apresenta sua máxima concentração de ácidos acético e fórmico na ordem de 7,2% e 1,1%, com base em massa seca do material, no tratamento à 180°C durante 4 horas. O declínio dos teores dos ácidos nas madeiras tratadas à 200°C indica que eles já catalisaram as reações antes da temperatura máxima adotada neste experimento (SUNDQVIST et al., 2006).

Tjeerdsma e Militz (2005) verificaram o efeito de várias temperaturas de termorretificação sobre a desacetilação da madeira de *Fagus sylvatica* e concluíram que a

ausência dos ácidos carbônicos no espectro da madeira tratada termicamente ocorre em temperaturas próximas à 185°C.

Repellin e Guyonnet (2005) mostraram que, durante o processo de “Retification[®]” de *Fagus sylvatica*, a hidrólise ácida promove a despolimerização das hemiceluloses e, conseqüentemente, o decréscimo dos 20,6% e 12,1% dos teores de xilose e de ácido glucorônico presentes na madeira controle para, cerca de 18,5% e 11,3% na madeira retificada termicamente à 200°C durante 1 hora e/ou para 11,2% e 7,9% na madeira retificada durante 3 horas, com a mesma temperatura.

Devido à degradação das hemiceluloses, há um incremento proporcional no teor de lignina na ordem de 26,0% para 28,0%, de 20,5% para 26,6% e de 25,3% para 29,9%, respectivamente, nas madeiras de *Pinus pinaster*, *Fagus sylvatica* e *Picea abies* termorretificadas com temperaturas próximas à 200°C (KAMDEM et al., 2002).

Ishiguri et al. (2005) constataram que o aquecimento de toras à 75°C durante 200 horas provocou aumento no grau de cristalização da celulose e decréscimo significativo no teor das hemiceluloses. Os teores de hemiceluloses das toras controle e das tratadas termicamente foram 31,1% e 26,5% para *Cryptomeria japonica*, 29,1% e 24,6% para *Larix kaempferi*, 28,0% e 23,7% para *Chamaecyparis obtusa*, 31,5% e 23,9% para *Pinus densiflora*, 29,7% e 25,6% para *Picea glehnii* e 33,1% e 26,6% para *Abies sachaliensis*.

Verifica-se com a diminuição de 9,26%, 7,69%, 7,69% e 4,84% nos teores de arabinose, galactose, ramanose e manose que houve degradação das hemiceluloses com a vaporização de tábuas de *Fagus orientalis* à 80°C, por 100 horas. Assim, o tratamento gerou um incremento proporcional de 22,97% para 23,90% no teor de lignina da madeira (YILGOR et al., 2001).

Entretanto, Unsal e Ayrilmis (2005) afirmam que há pouca informação sobre o efeito dos tratamentos térmicos nas propriedades tecnológicas da madeira de *Eucalyptus*, principalmente sobre as propriedades físicas e mecânicas.

Assim, a termorretificação em Eucalipto pode apresentar-se como uma solução para o problema da alta contração e inchamento da madeira. Para tanto, estudos sobre o tempo e a temperatura devem ser realizados para verificar a influência destes tratamentos sobre as propriedades mecânicas da madeira, com o intuito de adequar o uso destas espécies em aplicações estruturais (SANTOS, 2000).

3.4. Efeito da termorreificação nas propriedades das madeiras

3.4.1. Efeito da termorreificação nas propriedades físicas

Syrjänen (2001) afirma que a propriedade mais importante da madeira tratada termicamente quando comparada com a não tratada é a redução do seu teor de umidade de equilíbrio higroscópico e a, consequente, melhora na contração e no inchamento do material.

Weiland e Guyonnet (2003), Rousset et al. (2004) e Wikberg e Maunu (2004) afirmam que a madeira termorreificada é menos higroscópica e apresenta melhora na estabilidade dimensional devido à degradação das hemiceluloses, à ruptura dos grupos hidroxílicos livres da região amorfa da celulose e à reticulação dos polímeros que compõem a madeira durante o seu tratamento.

Segundo Unsal e Ayrilmis (2005), após o aquecimento da madeira de *Eucalyptus camaldulensis*, entre 120°C e 180°C, durante 2 a 10 horas, houve um decréscimo na sua massa específica a 12% de umidade com o aumento da temperatura e do tempo de exposição ao tratamento. A madeira tratada por 10 horas com 150°C e 180°C apresentou, respectivamente, reduções de 7,1% e 10,0% na propriedade física estudada.

Madeiras de *Pinus sylvestris* e de *Picea abies* submetidas ao processo “ThermoWood®” com 170°C, 190°C, 210°C e 230°C, por 3 horas, apresentaram relação direta entre a perda de massa e o aumento da temperatura. O alburno de *Pinus* quando submetido a tais temperaturas, apresentou, respectivamente, perda de massa na ordem 1,8%, 4,1%, 6,7% e 11,8% e o cerne reduções equivalentes a 5,4%, 5,9%, 6,9% e 11,0%. Para o alburno de *Picea*, as perdas de massa foram de 1,8%, 3,3%, 6,6% e 10% quando submetidas a 170°C, 190°C, 210°C e 230°C e, no cerne, as respectivas reduções apresentaram-se em torno de 3,6%, 5,3%, 6,9% e 11,4% (METSÄ-KORTELAJINEN et al., 2005).

Alén et al. (2002) e Sundqvist et al. (2006), em seus respectivos estudos, concluíram que a madeira de *Picea abies* e a de *Betula pubescens* tratadas pelo processo “ThermoWood®” com temperaturas entre 180°C e 225°C, durante 2 a 8 horas, e entre 160°C e 200°C, durante 1 a 4 horas, apresentaram maior perda de massa com o aumento do tempo de exposição e da temperatura do tratamento.

As madeiras de *Picea abies* termorretificadas por 4 horas, com temperaturas de 180°C e 225°C, apresentaram perda de massa de 1,5% e 10,8%; enquanto que as tratadas com as mesmas temperaturas, durante 6 horas, apresentaram perda de massa de 1,7% e 12,5% (ALÉN et al., 2002). As madeiras de *Betula pubescens* tratadas por 2,5 horas, com temperaturas de 160°C e 200°C, apresentaram perda de massa de 20% e 48% (SUNDQVIST et al., 2006).

Hakkou et al. (2005b) salientaram que a madeira de *Fagus sylvatica* termorretificada durante 8 horas, sob temperatura de 180°C, apresentou perda de massa em torno de 7%. Com o aumento da temperatura, houve um aumento progressivo da perda de massa até um valor máximo de 35% na madeira tratada à 260°C.

Hakkou et al. (2005a) estudaram o efeito da temperatura, entre 40°C e 260°C, durante 8 horas, na perda de massa das madeiras das folhosas *Fagus sylvatica* e *Populus nigra* e das coníferas *Pinus sylvestris* e *Abies Alba* tratadas pelo processo “Retification®”. Os autores concluíram que a perda de massa tornou-se significativamente apreciável a partir dos 180-200°C para as folhosas e, já ocorreu, a partir de 50°C nas coníferas. No primeiro grupo de madeiras, a degradação das hemiceluloses é o principal responsável pela perda de massa, e, no segundo grupo, os extrativos voláteis também interferem neste fenômeno pois são degradados em baixas temperaturas.

Contudo, as madeiras de *Pinus* sp., *Picea abies* e *Betula pendula* quando submetidas ao tratamento térmico apresentaram reduções de 50% nos teores de umidade de equilíbrio higroscópico, devido à diminuição dos sítios de adsorção (região amorfa) da parede celular e, conseqüentemente, uma melhora na estabilidade dimensional em torno de 50% a 90% (JÄMSÄ e VIITANIEMI, 2001).

Hakkou et al. (2005a) verificaram, através da medição do ângulo de contato entre a superfície dos corpos-de-prova e a água, que as madeiras das coníferas *Pinus sylvestris* e *Abies alba* e das folhosas *Fagus sylvatica* e *Populus nigra* quando termorretificadas, durante 8 horas, tornaram-se hidrofóbicas após a exposição em temperaturas de 160°C, 120°C, 150°C e 120°C, respectivamente.

Em outro estudo, Hakkou et al. (2005b) salientaram que a madeira de *Fagus sylvatica* submetidas ao processo “Retification®”, durante 8 horas, sob temperatura de 120°C é considerada hidrofílica, e torna-se hidrofóbica quando submetida em temperaturas de

160°C. Assim, segundo os autores, as temperaturas utilizadas nos tratamentos térmicos (200°C) são maiores do que as necessárias para modificar o caráter hidrofílico das madeiras.

Rousset et al. (2004) verificaram que o tratamento “Retification[®]” a 200°C, durante 1 hora, diminuiu significativamente a higroscopicidade da madeira de *Populus robusta* entre 40% e 60%. Contudo, o tratamento não alterou a permeabilidade da madeira pois não gerou rachaduras internas e não afetou a morfologia dos poros.

Wikberg e Maunu (2004) caracterizaram o alburno das madeiras de uma conífera e de quatro folhosas com um espectrofotômetro, e, concluíram que a termorretificação entre 160°C e 195°C pelo processo “ThermoWood[®]”, durante 2 a 3 horas, promoveu um aumento na região cristalina da celulose de 54% para 65% na conífera *Picea abies*, e de respectivamente, 41% para 52%, de 48% para 54% e de 54% para 65% nas folhosas *Betula pendula*, *Populus tremula* e *Quercus robur*.

Conclusões semelhantes foram encontradas por Ishiguri et al. (2003) que, após aquecerem toras de *Cryptomeria japonica* à 80°C de temperatura, verificaram um aumento no grau de cristalinidade da celulose a partir de 40 horas de aquecimento e, concomitantemente, um decréscimo no teor de umidade de equilíbrio da madeira.

Bhuiyan et al. (2000) afirmam que o aumento da cristalização da celulose e da espessura da região cristalina desse polímero aumenta a elasticidade da madeira e diminui a sua instabilidade dimensional. Segundo os autores, a xilose e a manose que não foram degradadas com a termorretificação são capazes de aumentar a cristalização da celulose, contribuindo com o aumento da cristalinidade e da espessura da região cristalina do polímero.

Bhuiyan et al. (2001) concluíram que após a primeira das 8 horas de termorretificação à 200°C ocorreu a máxima cristalização da celulose da madeira de *Fagus crenata*. Entretanto, em tratamentos intermitentes, a celulose não atingiu a sua máxima cristalinidade, pois nesse tipo de aquecimento há uma interrupção temporária nas reações térmicas devido ao fornecimento insuficiente de energia, o que dificulta a modificação deste polímero.

Assim, Rapp e Sailer (2001) verificaram que as madeiras de *Pinus sylvestris* e de *Picea abies* tratadas durante 4 horas, com temperatura de 220°C pelo processo “Oil-Heat-Treatment[®]”, apresentaram uma redução do PSF inicial de 29% para 14% e uma melhora em torno de 40% nas suas retratibilidades.

Reppelin e Guyonnet (2005) ao estudarem o efeito do processo “Retification®” na madeira de *Fagus sylvatica* concluíram, como mostra a Tabela 4, que a modificação química que o tratamento induz na madeira é responsável pela variação do seu PSF. Segundo os autores, o decréscimo de xilose e de ácido glucorônico, com o incremento do tempo de exposição à 220°C, mostra que as hemiceluloses são degradadas e, conseqüentemente, há uma redução no PSF e nos inchamentos da madeira.

Tabela 4. Variação do PSF e da composição química da madeira de *Fagus sylvatica* com o tempo e a temperatura de termoretificação (REPELLIN e GUYONNET, 2005).

Termorretificação		Teores de:					PSF (%)
Temperatura (°C)	Tempo (min)	Lignina Klason (%)	Celulose (%)		Hemiceluloses (%)		
			Glucose	Celobiose	Xilose	Ác. Glucorônico	
Controle		24,3	33,4	2,3	20,6	12,1	32,9
220	5	23,8	35,1	2,7	17,4	9,4	28,0
220	60	26,6	34,6	3,9	14,6	10,0	23,2
220	180	29,7	38,8	4,4	7,2	10,1	15,8

As madeiras termoretificadas em torno de 200°C além de apresentarem menor higroscopicidade do que as não tratadas, se estabilizam em torno de 4% a 5% de umidade de equilíbrio, em vez de 10% a 12% (VERNOIS, 2001).

Militz e Tjeerdsma (2001) estudando o efeito do tratamento térmico “Plato-Process®”, com hidrotermólise a 165°C e cura a 180°C, concluíram que o tratamento reduziu em 45% a higroscopicidade da madeira de *Fagus sylvatica* e que houve redução no inchamento tangencial e radial da madeira de *Pinus sylvestris*, respectivamente, na ordem de 33% e 41%.

Weiland e Guyonnet (2003) mostram que, o tratamento térmico “Retification®” com temperaturas entre 230°C e 260°C promoveu reduções no inchamento volumétrico máximo da madeira de *Pinus pinaster* de 13,22% para 9,90% e na de *Fagus sylvatica* de 22,89% para 14,56%.

Bekhta e Niemz (2003) verificaram o efeito do aquecimento a 200°C durante um período de 2 a 24 horas, em madeira de *Picea abies*, e concluíram que a madeira não tratada e as tratadas por 2, 4, 8 e 24 horas quando expostas em 65% de umidade relativa, apresentaram, respectivamente, teores de umidade de 12,2%, 9,2%, 8,8%, 8,2%, e 7,5%. O

autor verificou que a madeira tratada por 24 horas é mais estável dimensionalmente do que as demais, sendo que as contrações lineares tangenciais máximas apresentaram-se na ordem de 2,8%, 3,0%, 3,2%, 2,9%, e 2,2%, respectivamente, para a madeira não tratada e para as tratadas por 2, 4, 8 e 24 horas.

Juodeikienė e Minelga (2003) estudando o efeito do aquecimento entre 60°C e 120°C durante 24 a 96 horas, concluíram que o tratamento com maiores tempo e temperatura proporcionou diminuição da higroscopicidade da madeira de *Pinus* sp. e um aumento na sua estabilidade dimensional. A madeira não tratada apresentou teores de umidade de equilíbrio higroscópico (TUE) de 8,44% e 13,30%, respectivamente, quando exposta em ambientes interno e externo. As tratadas à 60°C durante 24 horas apresentaram 7,78% e 12,36%, e as tratadas à 120°C por 96 horas apresentaram 5,92% e 10,86% de TUE nos ambientes interno e externo. Os autores ainda verificaram que, a madeira não tratada apresentou variação nas dimensões radial e tangencial de 1,550 e 2,835 mm, a tratada com 60°C durante 24 horas apresentou variações dimensionais de 1,490 e 2,800 mm e a tratada com 120°C por 96 horas apresentou variações em torno de 1,350 e 2,635 mm.

Silva e Trugilho (2003) estudando o efeito da temperatura, entre 200°C e 900°C, sobre o comportamento dimensional do cerne da madeira de Jatobá (*Hymenaea courbaril* L.) concluíram que cada incremento em 100°C provoca reduções de 2,55%, 4,24% e 8,36%, respectivamente, nas dimensões lineares longitudinal e transversal e no volume da madeira. Para o alburno tais reduções apresentaram-se na ordem de 2,64%, 5,02% e 9,15%.

Brito et al. (2006) estudaram o efeito da termorreificação entre 120°C e 200°C na madeira de *Eucalyptus grandis* e concluíram que o material tratado na condição mais severa apresentou contração volumétrica máxima 25% significativamente menor do que no material sem tratamento, e que nas demais temperaturas não houve melhora na estabilidade dimensional da madeira.

Vital e Della Lucia (1982) estudaram o efeito do aquecimento da madeira de *Eucalyptus saligna* entre 105°C e 155°C, durante 10 a 160 horas, e concluíram que a exposição da madeira nas maiores temperaturas durante o maior número de horas proporcionou a diminuição do teor de umidade de equilíbrio higroscópico e dos inchamentos tangenciais, radiais e volumétricos. Os autores atribuem tais resultados à formação de

polímeros de furfural menos higroscópicos que as hemiceluloses e ao aumento da proporção cristalina das celulosas quando submetidas às elevadas temperaturas.

3.4.2. Efeito da termorretificação na durabilidade biológica

Para aumentar a durabilidade biológica da madeira são impregnados produtos tóxicos em seu interior. A emissão de ingredientes ativos é muito baixa durante a fixação de produtos preservativos na madeira, mas, em geral, esta técnica é vista de forma pouco amigável. Então, o aumento da durabilidade da madeira conferida por sua modificação térmica, em geral, é mais aceitável (HOMAN et al., 2000).

O tratamento térmico altera a composição química da madeira e promove a indisponibilidade de alimentos (hemiceluloses) aos fungos, reduz o teor de umidade de equilíbrio, promove a criação de novas moléculas livres que atuam como fungicidas, além de reticular a rede de lignina dificultando o reconhecimento do substrato pelos fungos (VERNOIS, 2001; WEILAND e GUYONNET, 2003).

Hakkou et al. (2006) verificaram quais dessas hipóteses são significativas para aumentar a durabilidade da madeira termorretificada. Para tanto, estudaram o efeito do tratamento “Retification[®]” com temperaturas de 20°C a 280°C, durante 8 horas, na madeira de *Fagus sylvatica*, e, concluíram que, o tratamento térmico aumenta a durabilidade da madeira quando exposta ao fungo *Coriolus versicolor* devido à degradação das hemiceluloses e à reticulação das ligações da lignina.

Madeiras de *Pinus pinaster* sem tratamento e quando submetidas ao processo “Retification[®]” entre 230°C e 260°C e, posteriormente, expostas ao fungo *Poria placenta* por 16 semanas em teste de laboratório, apresentaram, respectivamente, perda de massa de 17,13% e 9,76%; enquanto que a madeira de *Fagus sylvatica* apresentou perda de massa de 22,92% e 5,94% (WEILAND e GUYONNET, 2003).

Militz e Tjeerdsma (2001) verificaram que as madeiras de *Pinus radiata*, *Pinus sylvestris*, *Pseudotsuga menziesii* e *Picea abies* quando expostas aos fungos *Coriolus versicolor* e *Coniophora puteana* apresentaram, respectivamente, perda de massa na

ordem de 9% e 26%, de 4% e 12%, de 1% e 9%, e de 12% e 19%. Quando termorretificadas pelo “Plato-Process[®]” e expostas aos mesmos agentes xilófagos apresentaram perda de massa sempre inferior a 4%.

Rapp e Sailer (2001) verificaram que as madeiras de *Pinus sylvestris* e de *Picea abies* depois de expostas ao fungo *Coniophora puteana* apresentaram, respectivamente, perda de massa de 48,0% e 40,0%. Madeiras das mesmas espécies quando aquecidas com temperaturas entre 180°C e 220°C, durante 4,5 horas, e, ao serem expostas aos mesmos agentes xilófagos apresentaram perdas de massa de 11,0% e 5,5%. Já, as tratadas pelo “Oil-Heat-Treatment[®]”, nas mesmas temperaturas e durante o mesmo tempo, apresentaram 2,0% e 0,0% de perda de massa devido à degradação causada por esses fungos.

Momohara et al. (2003) trataram termicamente, entre 105°C e 150°C e durante 6 a 72 horas, o cerne de madeira de *Cryptomeria japonica* e concluíram que quanto maior o tempo e a temperatura do tratamento melhor foi a resistência da madeira ao fungo *Fomitopsis palustris*. A condição mínima para que a termorretificação melhorasse significativamente a resistência da madeira ao fungo foi 135°C, durante 24 horas. A perda de massa, mediante ao ataque do fungo durante 8 semanas em condições de laboratório, foi de 30% para a madeira controle e de 10% para a madeira tratada à 150°C, durante 24 horas.

Entretanto, Doi et al. (2005) estudaram a influência da vaporização (95°C) preliminar à secagem a alta temperatura (120°C e 130°C) na durabilidade da madeira de *Larix leptolepis* exposta ao fungo *Fomitopsis palustris*, durante 90 dias à 26°C e no escuro. Os autores verificaram que, as perdas de massa do material seco ao ar e do seco a 130°C foram estatisticamente iguais e na ordem de 5,0% e 10,0%, e que o material seco a 120°C apresentou perda de massa significativamente diferente e na ordem de 14,0%. Para os autores, as temperaturas de 120°C promoveram a degradação das hemiceluloses e a geração de compostos de baixa massa molecular (fragmentos de açúcares), que são altamente atrativos aos fungos, e só quando aquecidos em temperaturas superiores é que serão reticulados com a lignina e indisponibilizados para os agentes xilófagos.

A condensação ou reticulação da lignina confere, também, melhor estabilidade mediante as reações fotoquímicas do polímero e, conseqüentemente, uma menor taxa de fotodegradação da madeira. Ayadi et al. (2003) concluíram que as madeiras de *Fraxinus* sp, *Fagus sylvatica*, *Pinus pinaster* e *Populus* sp tratadas durante 2 horas à 240°C

apresentaram, respectivamente, 5, 2, 3 e 2 vezes menores alterações na cor quando comparadas com a madeira controle, após os ensaios de intemperismo.

3.4.3. Efeito da termorretificação nas propriedades mecânicas

A redução da resistência mecânica da madeira depende da sua umidade, da espécie da madeira e do tempo e da temperatura de aquecimento (BODIG e JAYNE, 1982; THIAM et al., 2002; HAYGREEN e BOWYER, 1996; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).

Em geral, as propriedades mecânicas da madeira decrescem com o aquecimento e aumentam com o resfriamento (BODIG e JAYNE, 1982; HAYGREEN e BOWYER, 1996; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999). A Figura 5 mostra as relações entre as propriedades mecânicas da madeira e a temperatura. Segundo esses autores, o aumento da temperatura tem um efeito reversível nas propriedades mecânicas devido às mudanças transitórias ao nível interno de energia, e/ou outro efeito irreversível devido à reorganização estrutural permanente em função da degradação da substância madeira.

Os efeitos imediatos sobre as propriedades mecânicas são reversíveis em temperaturas abaixo de 100°C, sendo que a propriedade mecânica retornará ao valor inicial desde que o retorno para a temperatura original seja rápido (HAYGREEN e BOWYER, 1996; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).

Moraes et al. (2005) ao estudarem a resistência ao embutimento ou engastamento da madeira de *Pinus sylvestris*, exposta durante 120 minutos entre 20°C e 240°C, concluíram que o aumento da temperatura diminui a resistência mecânica devido aos comportamentos dos polímeros da madeira, da sua degradação térmica e do seu teor de umidade. O decréscimo na resistência ocorreu de forma reversível na madeira úmida e com a sua temperatura abaixo de 100°C, devido à transição vítrea da lignina e ao, consequente, aumento na sua ductibilidade. Os corpos-de-prova à 80°C apresentaram redução máxima relativa de 30% em relação àqueles ensaiados à 20°C; e na madeira completamente seca a perda irreversível da sua resistência mecânica é associada à transição vítrea de todos os polímeros da madeira e principalmente às suas degradações em altas temperaturas.

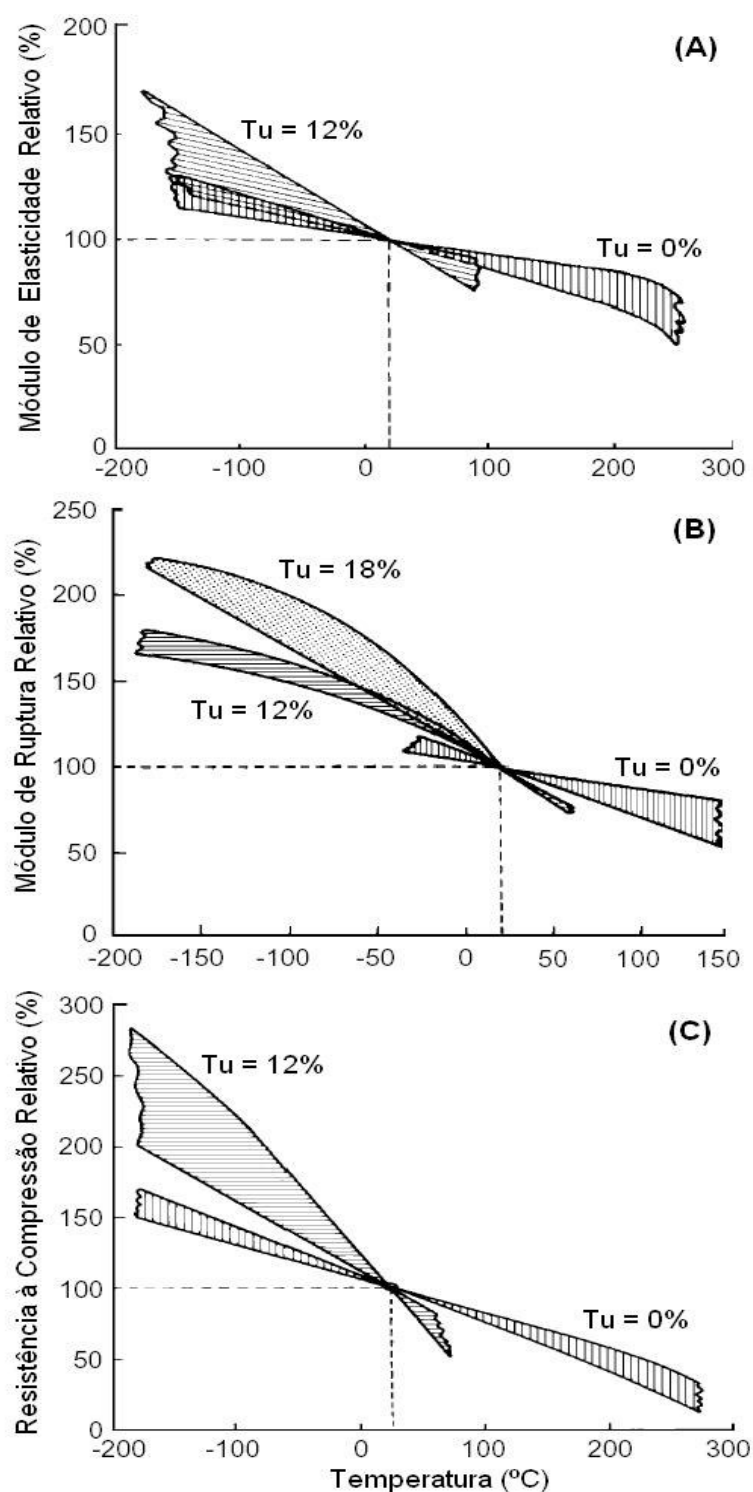


Figura 5. Efeito imediato da temperatura em três níveis de teores de umidade da madeira sobre: (A) o módulo de elasticidade em flexão estática; (B) o módulo de ruptura em flexão estática; e (C) a resistência à compressão paralela às fibras, relativos à temperatura de 20°C (adaptado de FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).

Thiam et al. (2002) compararam o efeito da secagem convencional, com temperatura máxima de 82°C, e da secagem à alta temperatura, com 116°C, sobre a resistência mecânica da madeira de *Tsuga heterophylla* e, concluíram que houve: uma redução não significativa de 1,2% no MOE em flexão entre as madeiras secas em estufa convencional (8547 MPa) e as secas em alta temperatura (8447 MPa); uma redução não significativa de 4,7% no MOR em flexão entre as madeiras secas em estufa convencional (38,12 MPa) e as sob alta temperatura (36,34 MPa); e uma redução significativa de 6,4% na resistência ao cisalhamento entre a madeira seca em estufa convencional (9,58 MPa) e a seca em alta temperatura (8,97 MPa).

Entretanto, Severo e Tomaselli (2000) estudando a vaporização à 100°C de temperatura, respectivamente, por 20 e 3 horas, em toras e em madeira serrada de *Eucalyptus dunni*, concluíram que o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras e o esforço no limite proporcional em compressão perpendicular às fibras não sofreram alterações com os tratamentos térmicos, enquanto que as resistências máximas à compressão paralela às fibras e ao cisalhamento (radial e tangencial) diminuíram significativamente.

Yilgor et al. (2001) verificaram que tábuas de *Fagus orientalis* vaporizadas à 80°C de temperatura, durante 100 horas, apresentaram uma redução permanente em torno de 16,5% e de 13,2% na rigidez e na resistência em compressão paralela às fibras.

Kärelampi et al. (2003) no estudo sobre o efeito da vaporização, entre 101°C e 131°C por 30 minutos, nas propriedades mecânicas do cerne de *Picea abies* constataram que essas foram inferiores quando comparadas com às da madeira sem tratamento, principalmente a compressão paralela às fibras, em torno de 40%.

Vital et al. (1983) estudaram o efeito do aquecimento entre 105°C e 155°C, durante 10 a 160 horas, sobre as propriedades mecânicas da madeira de *Eucalyptus saligna* e concluíram que a exposição da madeira em temperaturas maiores, durante um maior número de horas, proporciona reduções permanentes na rigidez e na resistência em compressão paralela às fibras e na resistência ao cisalhamento.

Quando a madeira é aquecida em temperaturas elevadas ocorre a decomposição dos seus componentes químicos (HAYGREEN e BOWYER, 1996). Este efeito permanente ocorre devido à degradação da substância madeira, principalmente com a despolimerização das hemiceluloses e a formação de monômeros de furfural, resultando em

perda de massa e de resistência mecânica (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999; THIAM et al., 2002). Aliado à perda de massa, as propriedades mecânicas da madeira reduzem, em geral, em torno de 30% devido aos tratamentos térmicos (HOMAN et. al, 2000; WASKETT e SELMES, 2001).

Brischke et. al (2004) comparando diversos métodos de resistência à abrasão das madeiras de *Abies alba* e de *Picea abies* verificaram que esta variável foi significativamente reduzida devido ao tratamento térmico em óleo aquecido, com 180°C a 220°C, durante 4 horas.

Rapp e Sailer (2001) verificaram a influência do ar aquecido entre 180°C e 220°C, e do tratamento “Oil-Heat-Treatment[®]” nas mesmas temperaturas, sobre as propriedades da madeira de *Pinus sylvestris*. Para os autores, a madeira termorretificada em óleo apresentou 51% do valor da resistência ao impacto da madeira sem tratamento; e a madeira tratada em ar aquecido apresentou 37% desta propriedade quando comparada com os valores do material controle.

Bekhta e Niemz (2003) concluíram que o aquecimento da madeira de *Picea abies* à 200°C, durante 2 a 24 horas, proporcionou reduções de 44% a 55% nas curvas de resistência em flexão da madeira, e que os respectivos módulos de elasticidade foram reduzidos de 4% a 9%.

Kamdern et al. (2002) mostraram que as madeiras de *Fagus sylvatica* e *Picea abies* termorretificadas pelo processo “Retification[®]” com temperaturas superiores a 200°C, durante 1 a 24 horas, apresentaram reduções de 20% a 11% na rigidez e de 40% a 8% na resistência em flexão.

Em estudo semelhante, Sundqvist et al. (2006) verificaram que as madeiras de *Betula pubescens* tratadas durante 4 horas pelo “ThermoWood[®]”, com temperaturas de 160°C, 180°C e 200°C, apresentaram rigidez em flexão na ordem de 19000, 8000 e 3000 MPa e que as suas respectivas resistências foram de 125, 92 e 9 MPa.

Militz e Tjeerdsma (2001) afirmam que o tratamento térmico “Plato-Process[®]” promoveu reduções de cerca de 5% a 18% na resistência mecânica das madeiras de *Fagus sylvatica*, *Betula pendula*, *Pseudotsuga menziesii*, *Pinus sylvestris* e *Pinus radiata*. Os módulos de rupturas em flexão estática das madeiras não tratadas e das tratadas termicamente

apresentaram-se, respectivamente, na ordem de 94 e 91 MPa, 87 e 78 MPa, 83 e 73 MPa, 90 e 74 MPa, e 72 e 60 MPa.

Weiland e Guyonnet (2003) mostraram que a madeira controle de *Pinus pinaster* apresenta resistência em compressão paralela às fibras de 99,7 MPa e que a tratada com temperaturas de 230°C a 260°C, pelo processo “Retification[®]”, apresenta valor de 92,1 MPa, o que equivale a uma redução de 8,0%. A resistência da madeira de *Fagus sylvatica* diminuiu em 6,1% com o tratamento e, portanto, variou de 113,7 para 106,8 Mpa.

Segundo Unsal e Ayrilmis (2005), após o aquecimento da madeira de *Eucalyptus camaldulensis*, durante 2 a 10 horas sob 120°C a 180°C, houve um decréscimo na resistência à compressão paralela às fibras com o aumento da temperatura e do tempo de exposição ao tratamento. As madeiras tratadas por 10 horas com 150°C e 180°C apresentaram, respectivamente, 16,5% e 19,0% menor resistência do que a madeira controle.

Entretanto, Johansson e Morén (2006) verificaram a influência da termorreificação realizada através do processo “ThermoWood[®]” na madeira de *Betula pendula*, e observaram uma redução de 43% no módulo de elasticidade da madeira tratada com 200°C por 3 horas em relação à não tratada. Os autores salientam que uma redução de 1°C na temperatura equivale a um aumento de 50 minutos no tratamento.

3.5. Considerações sobre a revisão de literatura

A termorreificação é um método de modificação térmica da madeira com temperaturas próximas a 200°C, normalmente aplicada durante um período de 2 a 24 horas. Inúmeros trabalhos mostram que esse tratamento é usado para melhorar a estabilidade dimensional e a durabilidade biológica das madeiras devido à degradação térmica do seu constituinte mais hidrófilo, que são as hemiceluloses, e as novas interações químicas entre os polímeros da lignina e de celulose e os produtos gerados da degradação térmica.

Os estudos sobre o efeito da termorreificação nas propriedades mecânicas da madeira mostram que há um decréscimo na sua resistência mecânica em função da perda de massa provocada pelos tratamentos térmicos. Entretanto, os artigos são contraditórios com relação ao efeito da termorreificação na rigidez da madeira. Alguns

autores afirmam que há um aumento da espessura da região cristalina da celulose, que é capaz de impedir a diminuição da rigidez do material devido à perda de massa, e, outros mostram que a perda de massa acentuada, provocada pela termorretificação, é suficiente para reduzir o módulo de elasticidade das madeiras.

Contudo, os principais processos comerciais de termorretificação de madeiras foram desenvolvidos e patenteados na Finlândia (ThermoWood® Process), na França (Retification® e/ou Le Bois Perdure®), na Holanda (Plato-Process®) e na Alemanha (Oil-Heat-Treatment®) e as principais espécies de madeira termorretificadas e caracterizadas tecnologicamente foram as dos gêneros *Aspen* sp, *Betula* sp, *Picea* sp, *Pinus* sp e *Populus* sp.

Nota-se, porém, que os artigos científicos não apresentam detalhes dos programas de termorretificação utilizados para as madeiras estudadas e, que apenas os trabalhos de Unsal e Ayırmis (2005), Brito et al. (2006) e Esteves et al. (2007) mostram resultados pontuais sobre o efeito da termorretificação na madeira do gênero *Eucalyptus* sp, sem detalhar o processo de termorretificação adotado.

Desta forma, com base nas sugestões de Santos (2000) e Unsal e Ayırmis (2005) constata-se que o desenvolvimento de um processo de termorretificação e a realização de estudos específicos sobre o seu efeito na qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* é importante para a consolidação do uso desta madeira pela indústria.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O material utilizado no presente estudo era proveniente de 40 (quarenta) toras, com 6 (seis) metros de comprimento, obtidas de 40 (quarenta) árvores de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden com 5,9 anos de idade e cujo plantio, por sementes, foi realizado em 2001.

O material foi proveniente da Fazenda Rio Claro, que apresenta posições geográficas de 22°27'S e 48°57'W, pertence à empresa Duratex-SA, e está localizada no município de Lençóis Paulista-SP.

A altitude do local apresenta-se em torno de 570 m e o clima foi caracterizado como tropical de altitude. A área em estudo, com 11,51 hectares, apresentava solo classificado em Latossolo Vermelho Amarelo, com fase argilosa, possuía espaçamento inicial de 2,0m x 3,0m e não passou por desbaste seletivo antes da coleta do material.

O material coletado foi composto pelas toras da base de árvores selecionadas ao acaso no talhão. Assim, obteve-se toras com diâmetro médio entre 20 e 22 cm, que é o material com dimensão mínima necessária para ao aproveitamento pelas serrarias na produção de madeira sólida.

4.1. Preparo do material

As toras com 6 (seis) metros de comprimento foram seccionadas ao meio, com uma motosserra, para se adequarem às dimensões máximas de trabalho da serraria. A serraria utilizada pertence ao Instituto Florestal do Estado de São Paulo - Seção de Mandurí, localizada no município de Mandurí-SP.

Durante o processamento da madeira, cada tora foi desdobrada de maneira a obter apenas as pranchas centrais, perfeitamente orientadas com relação aos anéis de crescimento e com espessura final de 34 mm, conforme sistema de corte apresentado na Figura 6.

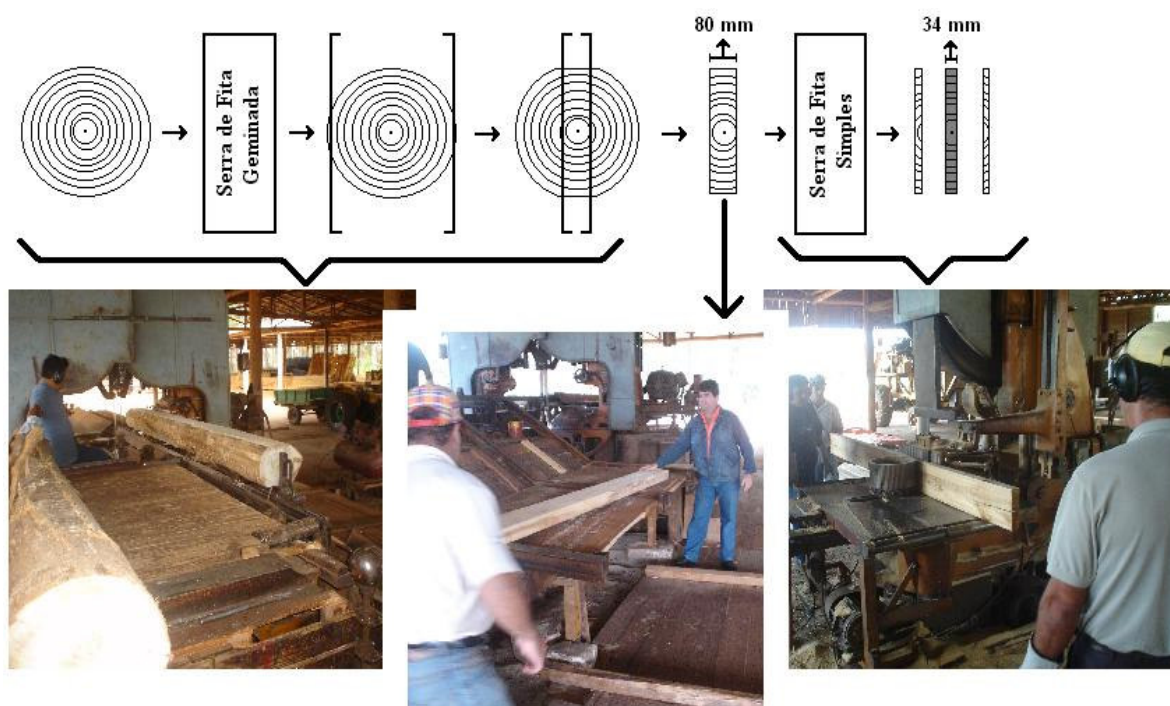


Figura 6. Método de desdobro visando à obtenção de tábuas centrais e perfeitamente orientadas em relação aos anéis de crescimento, baseado em serras de fita dupla e simples.

Inicialmente, as toras foram desdobradas em pranchas centrais com 80 mm de espessura, em uma serra de fita dupla com as seguintes características: diâmetro dos volantes: 1,10 m; largura dos volantes: 11,5 cm; dimensão da polia do motor: 27 cm; dimensão da polia do volante: 38 cm; RPM do motor: 1170 rpm; potência do motor: 22 Kw =

29,9 Hp; altura de corte máximo da serra: 35,36 cm; espessura da lâmina de serra: 1,3 mm e largura de corte da serra: 3,2 mm.

Posteriormente, as tábuas com 34 mm de espessura foram obtidas em uma reserra de fita com as seguintes características: diâmetro dos volantes: 1,10 m; largura dos volantes: 11,5 cm; dimensão da polia do motor: 27 cm; dimensão da polia do volante: 38 cm; RPM do motor: 1175 rpm; potência do motor: 18,5 Kw = 25,15 Hp; espessura da lâmina de serra: 1,2 mm e largura de corte da serra: 3,2 mm.

Todas as tábuas foram transportadas ao Laboratório de Secagem e Preservação de Madeiras, pertencente a FCA-UNESP de Botucatu-SP e secas em estufa piloto de secagem convencional, com capacidade para aproximadamente 2,5m³ de madeira serrada.

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

As tábuas de *Eucalyptus grandis* com 34 mm de espessura foram empilhadas de modo gradeado, conforme mostra a Figura 7. O sistema de empilhamento foi realizado através de um carrinho transportador que permite a construção de uma pilha de madeira com largura máxima de 1,18 m. A largura da pilha foi determinada em função do número de tabuas a serem secas.

Durante a secagem, foi utilizado um programa de secagem com temperatura inicial de 40°C e potencial de secagem (relação Umidade da madeira/Teor de umidade de equilíbrio) próximo a 2,0, com o intuito de minimizar o surgimento de defeitos, como mostra a Tabela 5 e conforme sugerido por Andrade (2000) e Santos (2002).



Figura 7. Empilhamento da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden para a sua secagem convencional.

Tabela 5. Programa de secagem utilizado para a madeira de *E. grandis*.

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

sendo: Ts - temperatura do bulbo seco, °C; Tu - temperatura do bulbo úmido, °C; UR - umidade relativa, %; TUE - teor de umidade de equilíbrio, %; PS - potencial de secagem.

Após a secagem das tábuas, com teores de umidade médios de 10%, elas foram transportadas para a marcenaria da FCA-UNESP de Botucatu-SP e tiveram as suas espessuras aplainadas numa dimensão nominal de 32 mm.

4.2. Termorreificação das tábuas

As tábuas centrais (àquelas que continham a medula) foram cortadas em peças menores com 0,60 m de comprimento, sendo que foram descartadas as regiões com rachaduras e nós e o material contido até 30 cm das extremidades.

De cada uma das tábuas retiraram-se 6 (seis) peças com 0,60 m de comprimento, sendo que uma das peças foi mantida em seu estado original (controle) e as restantes foram destinadas para as termorreificações.

Cada peça, com teor de umidade de 10,0%, teve os seus topos selados com borracha de silicone vermelho (resistente a temperaturas de até 316°C) e foi empilhada de modo gradeado em uma estufa elétrica, através do uso de separadores vazados de aço.

A estufa elétrica utilizada como termorreificador apresenta dimensões internas de 1,00 m x 0,70 m x 1,50 m para a largura, a profundidade e a altura, respectivamente. O equipamento é dotado de um sistema de aquecimento baseado em resistências elétricas, perfeitamente distribuídas nas paredes laterais, que permite o alcance de uma temperatura máxima de 300°C e de um sistema de gerenciamento do processo composto por um controlador programável de tempo e de temperatura. O transporte de calor das paredes da estufa para a superfície das tábuas ocorreu via irradiação de calor.

Contudo, o material foi aquecido com uma temperatura inicial de 100°C por 14 horas, com o intuito de diminuir o seu teor de umidade para cerca de 3% e evitar possíveis problemas de expansão de vapor de água e rompimento das paredes celulares. Após esse período, as cargas de madeira foram submetidas a uma taxa de elevação de temperatura de 1,34°C/min, em função das recomendações de Rousset et al. (2004), Alén et al. (2002) e Sundquist et al. (2006), até um conjunto de temperaturas finais de 140°C, 160°C, 180°C, 200°C e/ou 220°C.

A carga de madeira permaneceu na temperatura final desejada durante um período de 2,5 horas, levando-se em consideração a afirmação dada por Bhuiyan et al.

(2001) de que após a primeira hora de termorretificação é que ocorre a máxima cristalização da celulose e aos testes preliminares (apêndice 1) que indicaram presença de rachaduras internas em toda a carga de madeira de *Eucalyptus grandis* termorretificada com temperaturas de 3 horas ou mais. O programa de termorretificação adotado no estudo é mostrado no esquema da Figura 8.

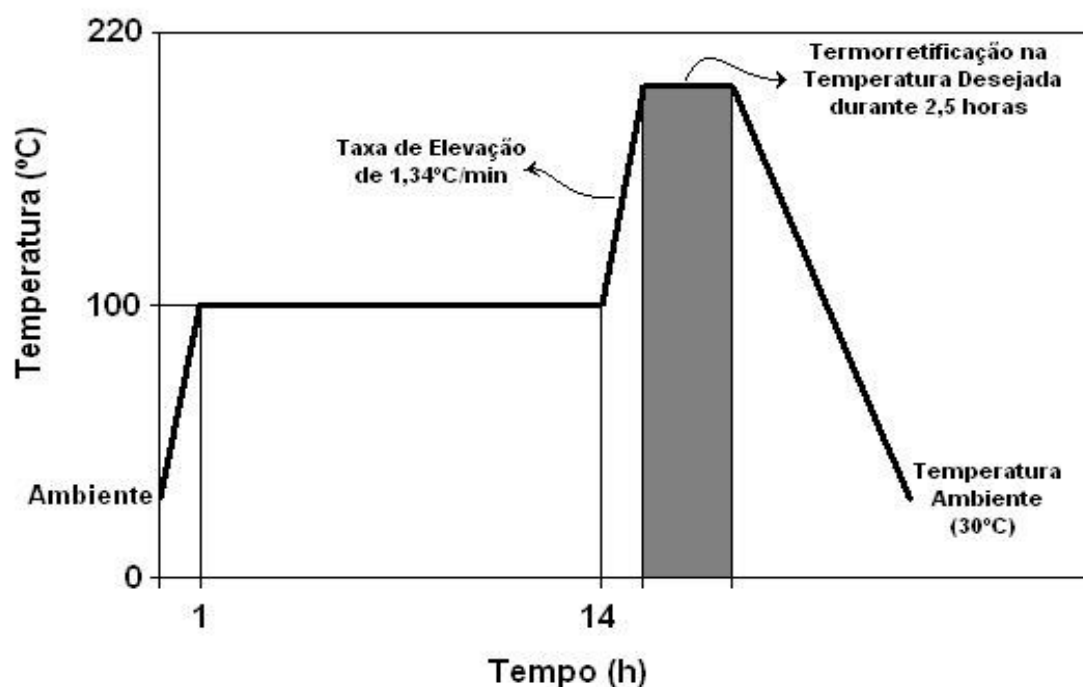


Figura 8. Programa de tempo-temperatura adotado para a termorretificação da madeira de *E. grandis*.

Após os tratamentos de termorretificações, a estufa foi desligada e as peças de madeira permaneceram no seu interior em resfriamento natural até atingirem a temperatura de 30°C.

4.3. Avaliação da qualidade das tábuas termorretificadas

A avaliação das tábuas após os tratamentos de termorretificação indicou que não houve nenhum tipo de empenamento e/ou de rachaduras superficiais ou de

topo. Assim, ao término dos tratamentos, a qualidade da madeira foi determinada por análise de perda de massa e da variação em espessura das tábuas de *Eucalyptus grandis*.

Como mostra a Figura 9, todas as tábuas tiveram as suas espessuras mensuradas em pontos pré-determinados, tanto na região próxima à medula quanto na periferia do fuste, antes e após os tratamentos térmicos. Algumas das tábuas de cada tratamento foram selecionadas para a determinação da perda de massa com a termorretificação.

As medições das espessuras e a pesagem das tábuas foram realizadas com micrômetro e balança, cujas respectivas precisões eram de 0,001mm e 0,01g.

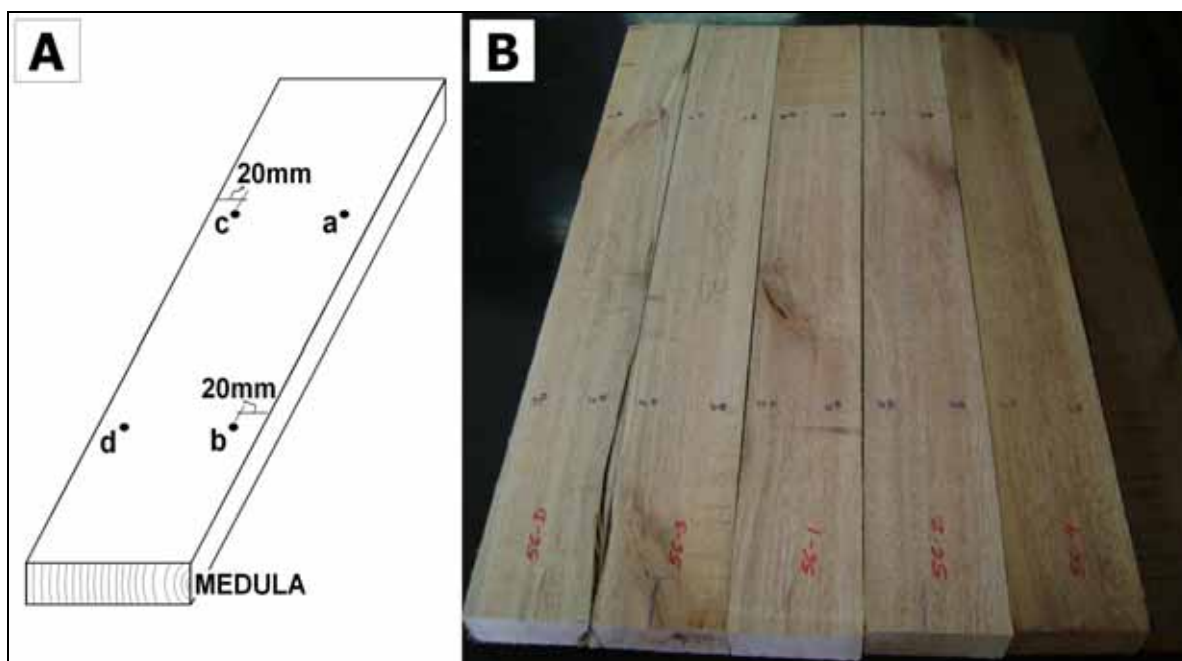


Figura 9. Esquema sobre a posição dos pontos de medição da espessura das tábuas (A) e tábuas de *E. grandis* com demarcação dos pontos de medição da espessura (B).

A Figura 10 permite a visualização de um lote de peças de *Eucalyptus grandis* termorretificadas com as várias temperaturas empregadas no estudo.



Figura 10. Aspecto visual de peças de madeira de *E. grandis* termorretificadas nas diferentes temperaturas adotadas no estudo e demarcação prévia (em vermelho) da região de retirada dos corpos-de-prova.

4.4. Obtenção de corpos-de-prova e caracterização das propriedades da madeira termorretificada

Após as termorretificações da madeira de *Eucalyptus grandis*, todas as peças foram demarcadas a cerca de 40 mm da medula, com o intuito de permitir a obtenção de corpos-de-prova perfeitamente orientados. A partir desse ponto, o material foi subdividido em corpos-de-prova nas marcenarias das Faculdades de Ciências Agronômicas e de Medicina da UNESP de Botucatu-SP. O modelo utilizado para a extração dos corpos-de-prova adotados nas caracterizações tecnológicas da madeira de *Eucalyptus grandis* é mostrado na Figura 11.

Durante esta etapa retirou-se uma subamostra por peça de madeira a partir da região pré-determinada, com uma serra circular. Em seguida, utilizou-se uma desempenadeira, para esquadrear as peças de madeira e uma desengrossadeira, para padronizar as dimensões das espessuras radial e tangencial. Por fim, utilizou-se a serra circular, para a padronização do comprimento dos corpos-de-prova na direção longitudinal.

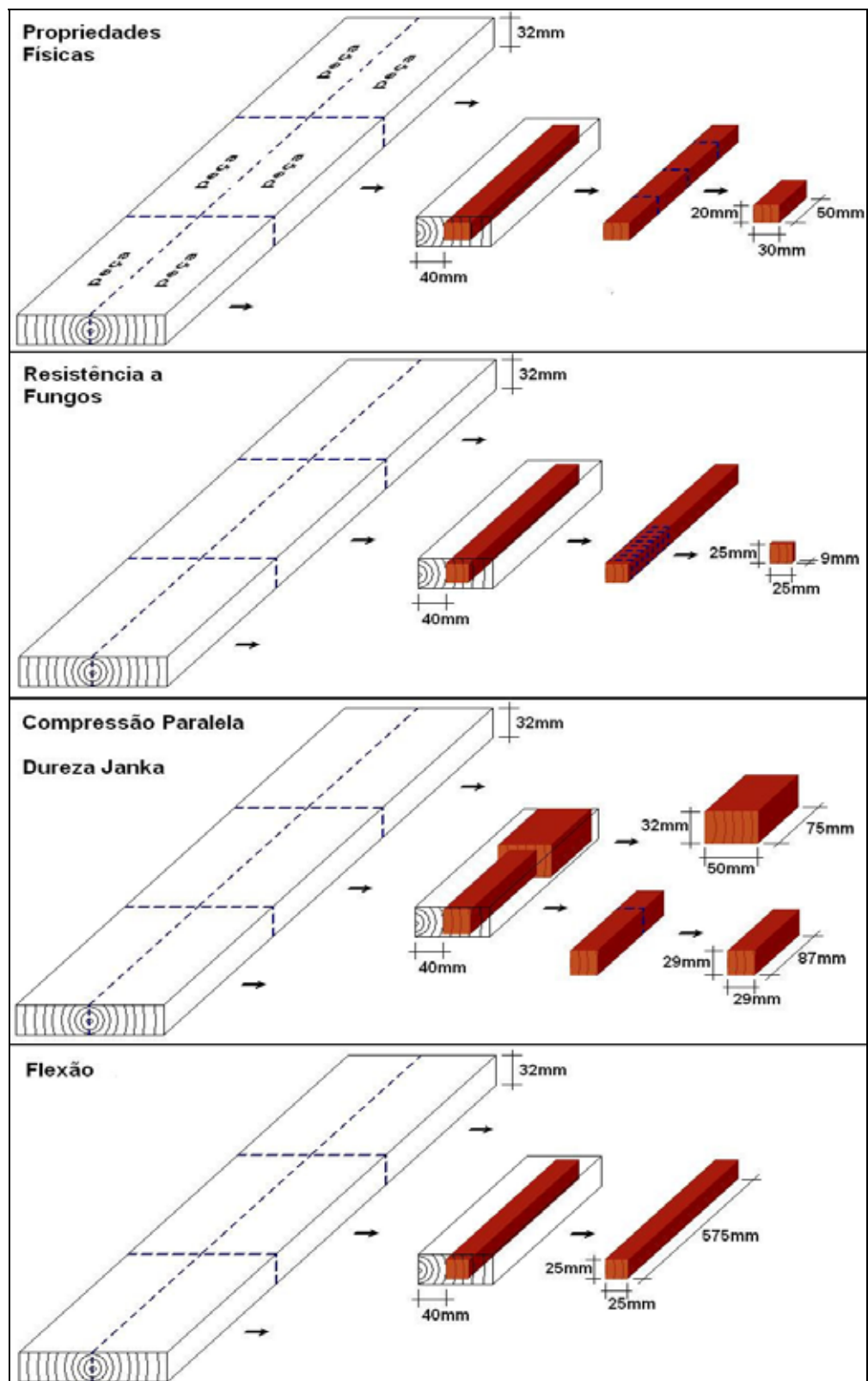


Figura 11. Modelo de extração dos corpos-de-prova a partir de uma tábua central.

4.4.1. Propriedades físicas da madeira

O material preparado para a caracterização física da madeira de *Eucalyptus grandis* foi composto por 14 (quatorze) peças por tratamento, com 0,60 m de comprimento, provenientes de tábuas centrais de 14 (quatorze) árvores.

De cada uma das peças foram retirados corpos-de-prova perfeitamente orientados em função dos três planos anatômicos (radial, tangencial e longitudinal), a partir de aproximadamente 40 mm da medula e com dimensões de 20,0 mm x 30,0 mm x 50,0 mm, sendo a maior aresta lateral orientada na direção longitudinal e a menor na direção tangencial, conforme a norma ABNT NBR 7190 (ABNT, 1997).

Os corpos-de-prova de cada um dos tratamentos foram colocados em estufa elétrica pré-regulada com temperatura inicial de 35°C. A temperatura foi gradativamente aumentada até atingir 103±2°C, e, os corpos-de-prova mantidos nesta condição até que atingissem peso constante.

Em seguida, todos os corpos-de-prova foram colocados na câmara climática do Laboratório de Secagem e Preservação de Madeiras da FCA-UNESP de Botucatu, regulada com 12,0% de teor de umidade de equilíbrio (21°C de temperatura e 65% de umidade relativa do ar), até que atingissem a umidade de equilíbrio higroscópico correspondente. Posteriormente, a câmara foi novamente regulada com 17,5% de teor de umidade de equilíbrio (23°C de temperatura e 83% de umidade relativa do ar) e os corpos-de-prova foram ali mantidos até que atingissem uma nova umidade de equilíbrio higroscópico. Logo após, todo o material foi submerso em água até que ocorresse a completa saturação das fibras da madeira.

Como mostra a Figura 12, os corpos-de-prova foram submetidos a sucessivas sessões de pesagens com balança de precisão de 0,01g e as suas dimensões mensuradas com o auxílio de micrômetros com 0,001mm de precisão, na condição seca e após cada mudança nas condições de umidade equilíbrio higroscópico.

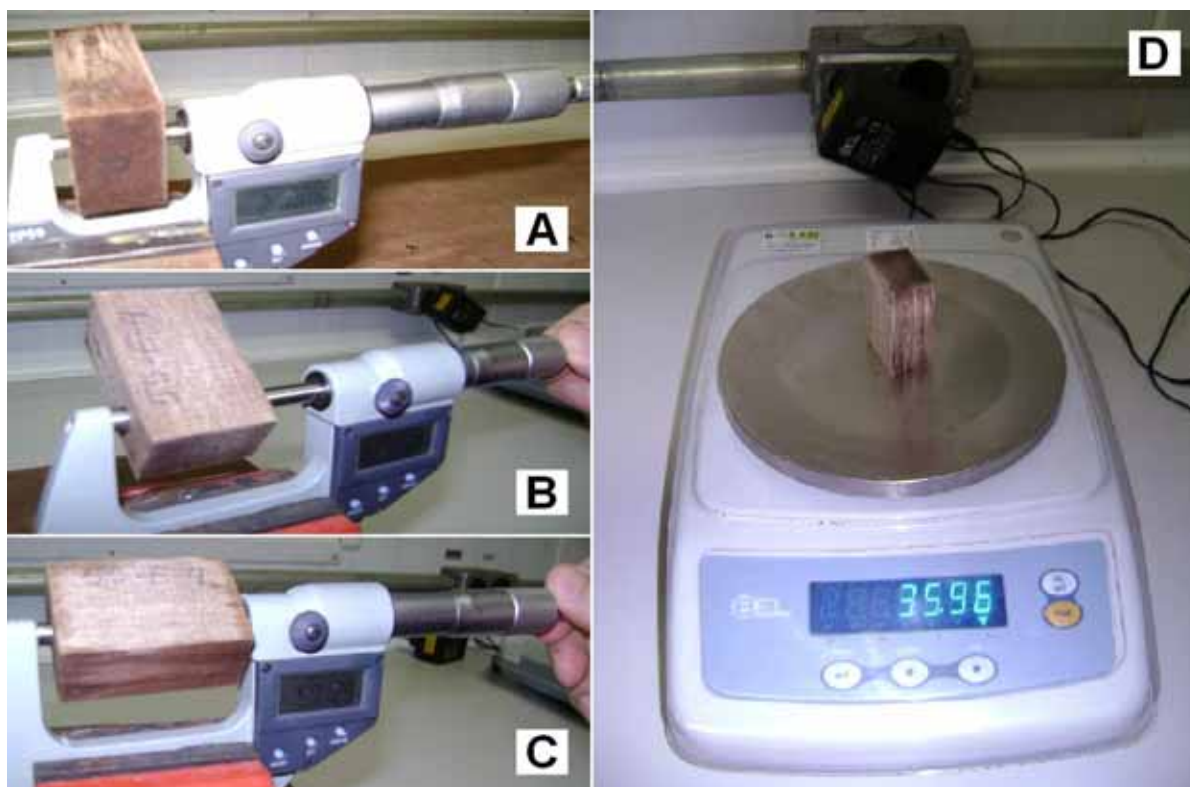


Figura 12. Medição das dimensões tangencial (A), radial (B) e longitudinal (C) dos corpos-de-prova de *E. grandis* e verificação da sua massa (D).

Com estes valores foram determinados os inchamentos lineares e o volumétrico, e os respectivos coeficientes de retratibilidades da madeira controle e das termorretrificadas entre 140°C e 220°C, através da aplicação das equações (1), (2) e (3).

$$\alpha_L = \frac{D_U - D_0}{D_0} * 100 \quad (1)$$

$$\alpha_V = \frac{V_U - V_0}{V_0} * 100 \quad (2)$$

$$Q = \frac{\Delta \alpha_L}{\Delta_U} = \frac{(D_U - D_0) * M_0}{D_0 * (M_U - M_0)} \quad (3)$$

sendo:

α_L - inchamento linear, %;

α_V - inchamento volumétrico, %;

Q - coeficiente de retratibilidade, adimensional;

D_U - dimensão linear na condição de umidade desejada, cm;

D_0 - dimensão linear na condição seca a $103\pm 2^\circ\text{C}$, cm;

V_U - volume na condição de umidade desejada, cm^3 ;

V_0 - volume na condição seca a $103\pm 2^\circ\text{C}$, cm^3 ;

M_U - massa na condição de umidade desejada, g;

M_0 - massa na condição seca a $103\pm 2^\circ\text{C}$, g.

Através das equações (4), (5), (6) e (7) foi possível determinar as massas específicas aparentes e os teores de umidade com base em massa seca dos corpos-de-prova.

$$\rho_b = \frac{M_0}{V_v} \quad (4)$$

$$\rho_0 = \frac{M_0}{V_0} \quad (5)$$

$$\rho_U = \frac{M_U}{V_U} \quad (6)$$

$$U\% = \frac{M_U - M_0}{M_0} * 100 \quad (7)$$

sendo:

ρ_b - massa específica aparente básica, g/cm^3 ;

ρ_0 - massa específica aparente a 0% de umidade, g/cm^3 ;

ρ_U - massa específica aparente no teor de umidade desejado, g/cm^3 ;

$U\%$ - teor de umidade da madeira com base em massa seca, %;

M_0 - massa seca a $103\pm 2^\circ\text{C}$ dos corpos-de-prova, g;

M_u - massa úmida dos corpos-de-prova, g;

V_v - volume saturado dos corpos-de-prova, cm^3 ;

V_0 - volume dos corpos-de-prova a 0% de umidade, cm^3 ;

V_u - volume dos corpos-de-prova no teor de umidade desejado, cm^3 .

4.4.2. Resistência da madeira a fungos deterioradores

4.4.2.1. Preparo dos corpos-de-prova de madeira e das culturas fúngicas

O material usado nos ensaios de apodrecimento acelerado da madeira foi composto de um lote de 7 (sete) peças de *Eucalyptus grandis* por tratamento, com 0,60 m de comprimento, provenientes de tábuas centrais de 7 (sete) árvores.

De cada uma das peças, foram retirados corpos-de-prova perfeitamente orientados em função dos três planos anatômicos (radial, tangencial e longitudinal), a partir de aproximadamente 40 mm da medula, de modo a conter a parte mais externa do cerne. As suas dimensões apresentavam-se em torno de 25,0 mm x 25,0 mm x 9,0 mm, sendo a menor na direção longitudinal, conforme preconiza a norma ASTM D-2017 (1994).

Todos os corpos-de-prova controle e os termorretificados foram lixados e secos em estufa elétrica, com ventilação forçada e pré-regulada a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ até atingirem peso constante. Posteriormente, os corpos-de-prova foram pesados em balança com precisão de 0,01g para a determinação de sua massa inicial (M_1), conforme preconiza a norma ASTM D-1413 (1994).

Para proporcionar a deterioração da madeira foram empregadas culturas puras de fungo *Picnoporus sanguineus*, coletado em tocos de árvores de *Eucalyptus grandis* de povoamentos florestais provenientes da Fazenda Morro do Ouro, pertencente à empresa Duratex-SA e localizada no município de Agudos-SP, em março de 2008.

O fungo foi identificado, isolado e preservado em matrizes primárias em placas de Petri com meio de cultura composto por batata-dextrose-agar (2% de malte Agar e 1% de peptose) e acondicionado em câmara escura pré-regulada com temperatura de 25°C , no Laboratório de Patologia Florestal do Departamento de Produção Vegetal da FCA-UNESP de Botucatu-SP.

Neste estudo, foram realizados dois ensaios acelerados para a avaliação do efeito da termorretificação na durabilidade natural da madeira de *Eucalyptus grandis*. O primeiro deles, denominado “agar-block” foi adaptado a partir de descrições feitas por Monteiro e Freitas (1997), Fernandes et al. (2005) e Abreu et al. (2007). O segundo

método, conhecido internacionalmente como “soil-block” foi executado segundo adaptações das normas americanas ASTM D-1413 (1994) e ASTM D-2017 (1994).

Embora a norma ASTM D-2017 (1994) estabeleça um total de 6 (seis) corpos-de-prova para caracterizar a resistência biológica da madeira, foram utilizados 21 (vinte e um) corpos-de-prova obtidos de 7 (sete) tábuas para caracterizar cada um dos tratamentos (sendo um controle e os outros cinco termorretrificados), totalizando 126 (cento e vinte e seis) corpos-de-prova por ensaio.

4.4.2.2. Ensaio de apodrecimento acelerado do tipo “agar-block”

Foram preparadas 126 (cento e vinte e seis) placas de Petri com meio de cultura à base de batata-dextrose-agar (2% de malte Agar e 1% de peptose). Cada placa recebeu um inóculo central com 1 cm² da cultura pura do fungo deteriorador *Picnoporus sanguineus*. Os procedimentos foram realizados no interior de uma câmara de fluxo laminar para evitar a contaminação do material.

Após 7 (sete) dias da inoculação, nas condições estabelecidas pela norma ASTM D-2017 (1994), os corpos-de-prova previamente identificados foram colocados nas placas de Petri. Foi colocado 1 (um) corpo-de-prova por placa, em contato direto com o meio de cultura e com a zona limite de crescimento do fungo. O aspecto das placas de Petri, no início do ensaio e após o período de incubação, pode ser verificado na Figura 13.

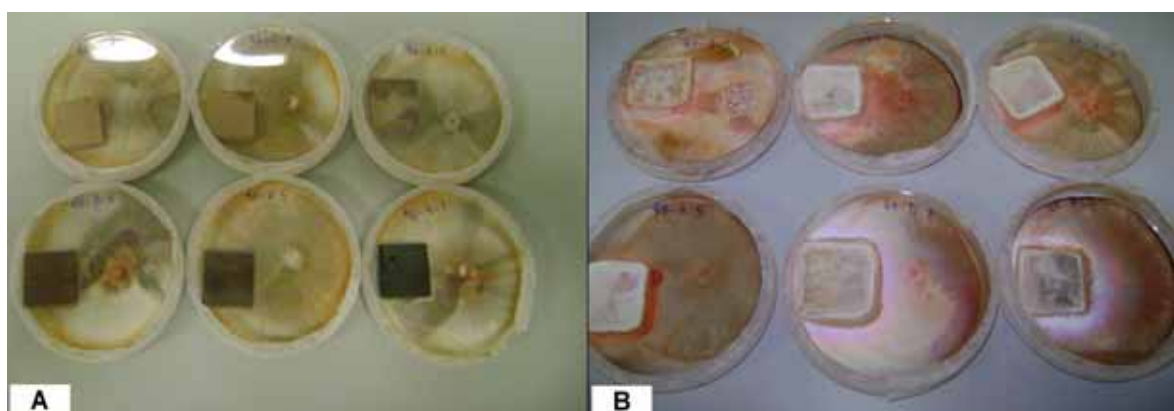


Figura 13. Placas de Petri no início do ensaio de apodrecimento acelerado do tipo “agar-block”, com as madeiras de *E. grandis* (A) e após 8 semanas de incubação (B).

As placas, previamente identificadas, foram incubadas em estufa do tipo B.O.D (baixa demanda de oxigênio), no escuro para favorecer o crescimento vegetativo do fungo e pré-regulada com $26,7 \pm 1^\circ\text{C}$ e $70 \pm 4\%$ de umidade relativa, segundo a norma ASTM D-2017 (1994), durante 8 semanas, conforme sugerido por Monteiro e Freitas (1997), Fernandes et al. (2005) e Abreu et al. (2007).

4.4.2.3. Ensaio de apodrecimento acelerado do tipo “soil-block”

Para o teste de apodrecimento do tipo “soil-block” foram utilizados 42 (quarenta e dois) frascos de vidro, com tampa rosqueável e com capacidade de 725 mL de volume interno. Dentro de cada frasco foram colocados: o solo argiloso, a água e a lâmina alimentadora de *Pinus* sp, na ordem e como descrito na norma ASTM D-2017 (1994).

O solo utilizado como substrato foi o latossolo roxo, coletado de horizonte B, com textura argilosa e capacidade de retenção de água de 29%, proveniente da Fazenda Experimental Edgárdia, pertencente a FCA-UNESP de Botucatu-SP.

Posteriormente, o solo foi analisado no Laboratório de Física do Solo da FCA da UNESP de Botucatu-SP e o seu pH foi corrigido para 6,31 utilizando-se calcário dolomítico com PRNT 91,5%, na proporção de 400 g para 100 kg de solo. O solo foi peneirado com peneira de 4 mm de abertura para a eliminação de impurezas e a quebra de torrões.

A quantidade de água adicionada nos frascos foi obtida com base na equação (8).

$$Q_{H_2O} = [1,30 * (A - B)] * [M_{SOLO} / (100 + B)] \quad (8)$$

sendo:

Q_{H_2O} - quantidade de água a ser adicionada, g;

A - capacidade de retenção de água do solo, %;

B - teor de umidade do solo seco ao ar (estocado), %;

M_{SOLO} - massa de solo seco ao ar a ser adicionada no frasco, g.

O teor de umidade inicial do solo foi obtido por meio da porcentagem de massa perdida após a secagem em estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$. Foram secas três porções de 50 g do solo a ser utilizado no teste acelerado, obtendo-se um teor de umidade médio de 13,0%.

Em cada frasco, foram adicionados 300 g de solo e 55 mL de água destilada. Cada frasco recebeu uma placa suporte de madeira de alburno de *Pinus* sp, com maior proporção de lenho inicial, nas dimensões de 0,3 x 5,0 x 5,0 cm. Essa placa suporte, denominada alimentador, foi colocada sobre o solo no interior do frasco, servindo de substrato para o desenvolvimento do fungo *Picnoporus sanguineus*.

Após o preparo dos frascos, estes foram autoclavados a $121\pm 1^{\circ}\text{C}$ e pressão de uma atmosfera durante uma hora, com o objetivo de evitar a contaminação por fungos indesejáveis.

O alimentador recebeu 1 (um) inóculo central com 1cm^2 da cultura pura do fungo deteriorador *Picnoporus sanguineus*. Os procedimentos foram realizados em uma câmara de fluxo laminar para evitar a contaminação do material.

Após 14 (quatorze) dias da inoculação dos frascos é que o fungo incubado em B.O.D, pré-regulada nas condições estabelecidas pela norma ASTM D-2017 (1994), colonizou toda a extensão superficial de cada alimentador.

Posteriormente, um conjunto composto por 3 (três) corpos-de-prova dos mesmos tratamentos, previamente identificados e esterilizados nas condições estabelecidas pela norma ASTM D-2017 (1994) foram colocados no interior do frasco, sobre o suporte alimentador, conforme pode ser verificado na Figura 14A.

Os frascos, previamente identificados, foram incubados em estufa do tipo B.O.D (baixa demanda de oxigênio), no escuro para favorecer o crescimento vegetativo do fungo e pré-regulada nas condições preconizadas pela norma ASTM D-2017 (1994). O material permaneceu nessas condições durante 12 semanas, conforme sugerido pela norma ASTM D-1413 (1994) e apresentou o aspecto mostrado na Figura 14B.



Figura 14. Início do ensaio de apodrecimento acelerado do tipo “soil-block”, para as madeiras de *E. grandis* (A) e após 12 semanas de incubação (B).

4.4.2.4. Avaliação da perda de massa durante os ensaios de apodrecimento

Passado os períodos de incubação, os corpos-de-prova dos ensaios “agar-block” e “soil-block” foram removidos das placas de Petri e/ou dos frascos e limpos sob água corrente, através da remoção dos micélios do fungo com uma escova.

Em seguida, os corpos-de-prova foram novamente acondicionados em estufa elétrica, com ventilação forçada e pré-regulada a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ até atingirem a sua nova massa completamente seca. Posteriormente, os corpos-de-prova foram pesados em balança com precisão de 0,01g para a determinação de sua massa final (M_F), conforme preconiza a norma ASTM D-1413 (1994).

Para cada corpo-de-prova, a avaliação da perda de massa foi calculada pela diferença entre a sua massa inicial (M_I) e a sua massa final (M_F), na mesma condição de pesagem antes e após a exposição ao fungo deteriorador e pela aplicação da equação (9).

$$PM \% = \frac{M_I - M_F}{M_I} * 100 \quad (9)$$

sendo:

PM - perda de massa dos corpos-de-prova submetidos aos ensaios de apodrecimento, %;

M_I - massa inicial dos corpos-de-prova, g;

M_F - massa dos corpos-de-prova após a sua deterioração, g.

Os valores de perda de massa estabeleceram uma medida de susceptibilidade relativa ao apodrecimento ou, inversamente, da resistência ao apodrecimento das amostras de madeira controle e das termorretificadas de *Eucalyptus grandis*.

4.4.3. Propriedades mecânicas da madeira

4.4.3.1. Preparo dos corpos-de-prova de madeira

Para cada um dos ensaios de caracterização mecânica da madeira, o material utilizado foi composto por 19 (dezenove) peças de *Eucalyptus grandis* por tratamento, provenientes de tábuas centrais de 19 (dezenove) árvores. Cada uma das tábuas foi subdividida em peças controle e termorretificadas a 140°C, 160°C, 180°C, 200°C e 220°C.

Embora a norma ABNT NBR 7190 (ABNT, 1997) estabeleça que o número necessário para se realizar a caracterização mecânica da madeira seja 12 (doze) corpos-de-prova, foram utilizados 19 (dezenove) por tratamento.

Foram utilizados corpos-de-prova perfeitamente orientados em função dos três planos anatômicos (radial, tangencial e longitudinal), retirados a partir de aproximadamente 40 mm da medula. Para os ensaios de compressão paralela às fibras, de

flexão estática e de dureza Janka normal às fibras utilizou-se corpos-de-prova com as dimensões mostradas na Tabela 6.

Tabela 6. Dimensões dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de caracterização mecânica da madeira de *E. grandis*.

Ensaio	Dimensões dos corpos-de-prova (mm)		
	Espessura	Largura	Comprimento
Compressão Paralela às Fibras	29	29	87
Flexão Estática	25	25	575
Dureza Janka Normal às Fibras	32	50	75

Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios servo-controlada, da marca EMIC DL 10.000 MF e com capacidade de carga de 100 kN, do Laboratório de Ensaio de Materiais do Departamento de Engenharia Rural da FCA-UNESP de Botucatu-SP.

4.4.3.2. Ensaio de compressão paralela às fibras

A resistência à compressão paralela às fibras ($f_{wc,0}$ ou f_{c0}) foi determinada pela máxima tensão de compressão que pode atuar em um corpo-de-prova com seção nominal quadrada de 2,9 cm de lado e 8,7 cm de comprimento, como mostra a equação (10).

$$f_{c0} = \frac{f_{c0,m\acute{a}x}}{A_c} \quad (10)$$

sendo:

f_{c0} - resistência à compressão paralela às fibras da madeira, N/m² ou Pa;

$f_{c0,m\acute{a}x}$ - máxima força de compressão aplicada ao corpo-de-prova durante o ensaio, N;

A_c - área inicial da seção transversal comprimida, m².

Foram obedecidas as prescrições normativas da ABNT NBR 7190 (ABNT, 1997), na qual para a caracterização da resistência à compressão de um lote de peças delgadas, permite-se empregar corpos-de-prova com seção transversal quadrada, com lado igual à espessura do elemento delgado, com pelo menos 1,8 cm, e comprimento igual a três vezes o lado da seção transversal.

A rigidez da madeira foi determinada pelo seu módulo de elasticidade (E_{c0}) obtidos através da aplicação de regressão linear simples no trecho linear do diagrama tensão deformação específica, como mostra a equação (11).

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\epsilon_{50\%} - \epsilon_{10\%}} \quad (11)$$

sendo:

E_{c0} - rigidez da madeira à compressão paralela, N/m² ou Pa;

$\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ - tensões de compressão correspondentes a 10% e 50% da resistência f_{c0} ;

$\epsilon_{10\%}$ e $\epsilon_{50\%}$ - deformações específicas medidas no corpo-de-prova.

As deformações específicas foram avaliadas com um extensômetro, com sensibilidade de 0,001 mm, acoplado na madeira e no computador de controle da máquina de ensaio, conforme mostra a Figura 15.

Após os ensaios de compressão paralela às fibras, os corpos-de-prova das madeiras de *Eucalyptus grandis* com e sem termorretrificação tiveram as suas formas de ruptura classificadas conforme o preconizado pela norma ASTM D-143 (1994), e como mostra a Figura 16A, em: esmagamento, fenda em cunha, cisalhamento, fendilhamento, compressão e cisalhamento paralelo, e/ou fibrilação ou rolamento. Podem ser verificados na Figura 16B os tipos de ruptura dos corpos-de-prova de um lote de madeira de *Eucalyptus grandis*.

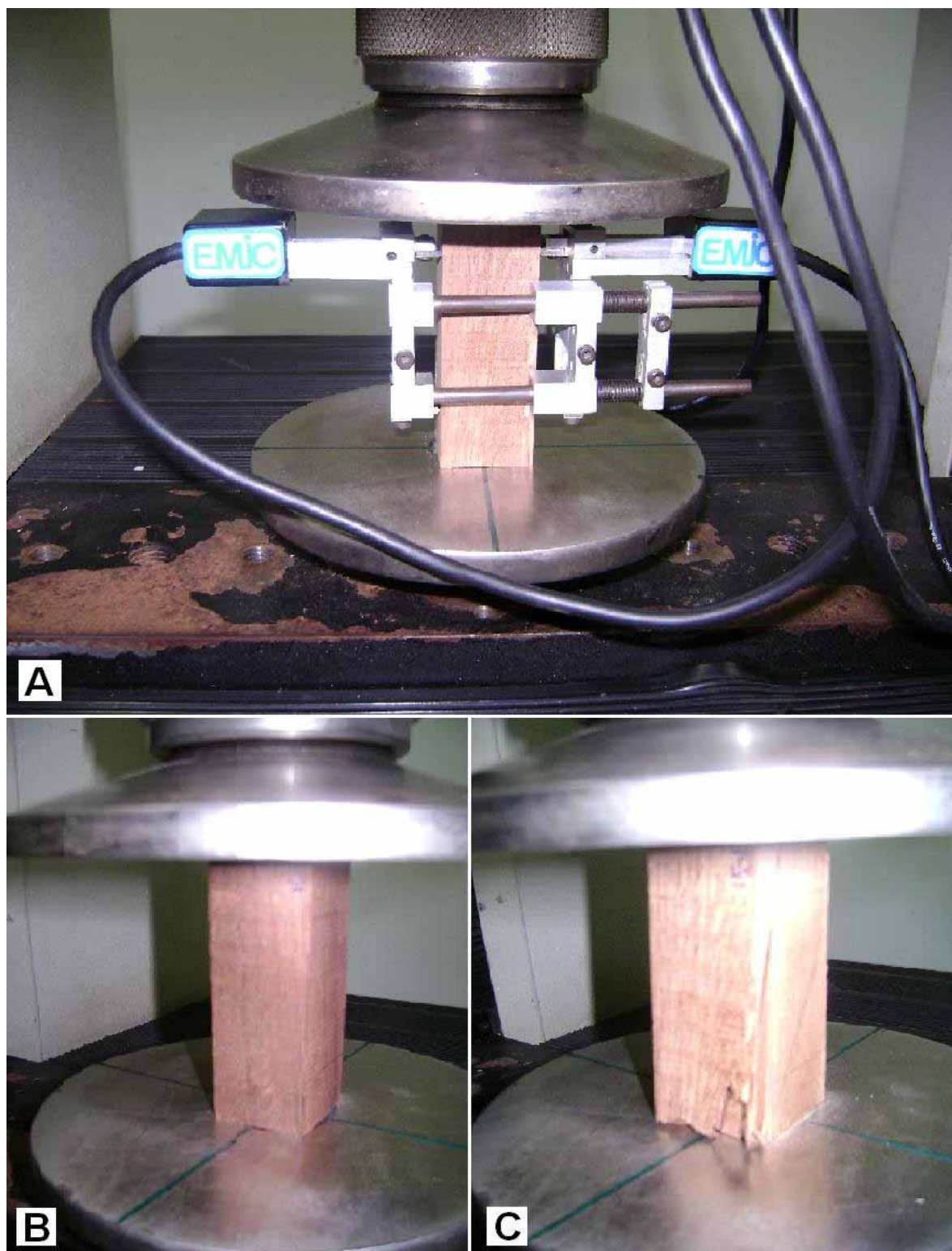


Figura 15. Execução do ensaio de compressão paralela nos corpos-de-prova: (A) detalhe do acoplamento do extensômetro; (B) retirada do extensômetro; (C) ruptura do corpo-de-prova.

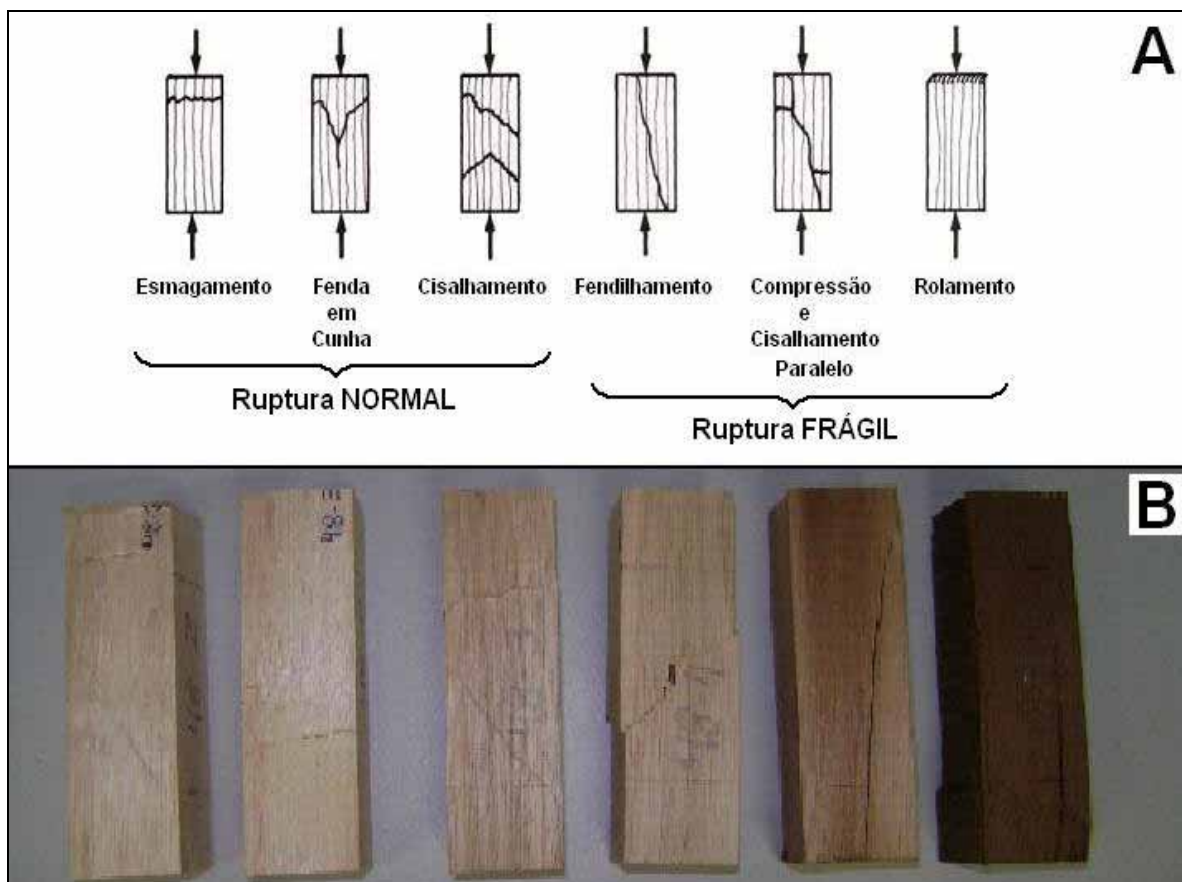


Figura 16. Tipos de ruptura nos corpos-de-prova após os ensaios de compressão paralela às fibras, segundo a norma ASTM D-143 (1994) (A), e formas de ruptura dos corpos-de-prova de *E. grandis* após o ensaio (B).

4.4.3.3. Ensaio de flexão estática

A resistência da madeira à flexão (f_{WM} ou f_M) foi determinada pela máxima tensão que pode atuar em um corpo-de-prova, com seção nominal quadrada de 2,5 cm de lado e 57,5 cm de comprimento, no ensaio de flexão simples, e é explicada pela equação (12).

A rigidez da madeira à flexão foi caracterizada pelo seu módulo de elasticidade (E_{M0}) determinado pela inclinação da reta do trecho linear do diagrama tensão deformação, como mostra a equação (13).

$$f_M = \frac{3P * L}{2b * h^2} \quad (12)$$

$$E_{M0} = \frac{(F_{M,50\%} - F_{M,10\%}) * L^3}{4(v_{50\%} - v_{10\%}) * b * h^3} \quad (13)$$

sendo:

f_M - módulo de resistência à flexão estática, N/m^2 ou Pa;

E_{M0} - módulo de elasticidade à flexão estática, N/m^2 ou Pa;

P - força aplicada no instante da ruptura, N;

L - vão livre do corpo-de-prova, dimensão nominal de 0,525 m;

b - base da seção transversal, dimensão nominal de 0,025 m;

h - altura da seção transversal, dimensão nominal de 0,025 m;

$F_{M,10\%}$ e $F_{M,50\%}$ - cargas correspondentes a 10% e 50% da carga máxima estimada, aplicada ao corpo-de-prova, N;

$v_{10\%}$ e $v_{50\%}$ - deslocamentos no meio do vão correspondentes a 10% e 50% da carga máxima estimada, m.

Quanto às dimensões dos corpos-de-prova utilizados no ensaio de flexão, também, foi adotado o preconizado por Rocco (1983) que fixa a relação entre vão e altura do corpo-de-prova igual a 21 e o comprimento nominal do corpo-de-prova igual 23 vezes a sua altura.

A execução do ensaio de flexão estática, o aspecto do deslocamento máximo no meio do vão do corpo-de-prova e o momento da sua ruptura podem ser melhores visualizados na Figura 17.

Os tipos de superfície de ruptura nos corpos-de-prova de flexão denominados tração simples, tração desviada, tração com desfibramento, tração com ruptura, compressão e cisalhamento horizontal, também foram verificados após os ensaios. As superfícies de ruptura foram estabelecidas conforme o preconizado pela norma ASTM D-143 (1994) e podem ser melhores evidenciadas na Figura 18.

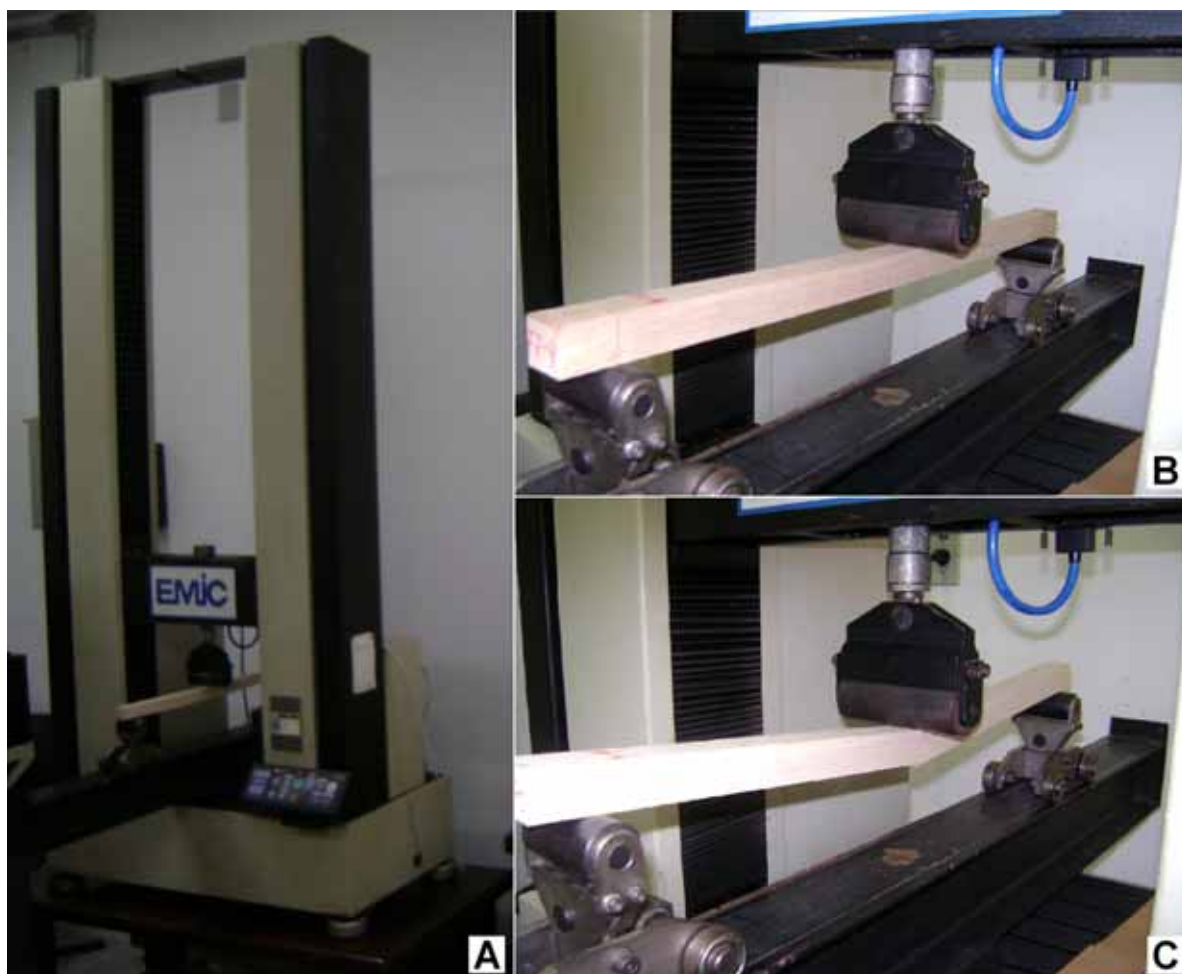


Figura 17. Execução do ensaio de flexão estática: (A) vista geral do equipamento; (B) detalhe do cutelo de aplicação de carga; (C) ruptura do corpo-de-prova.

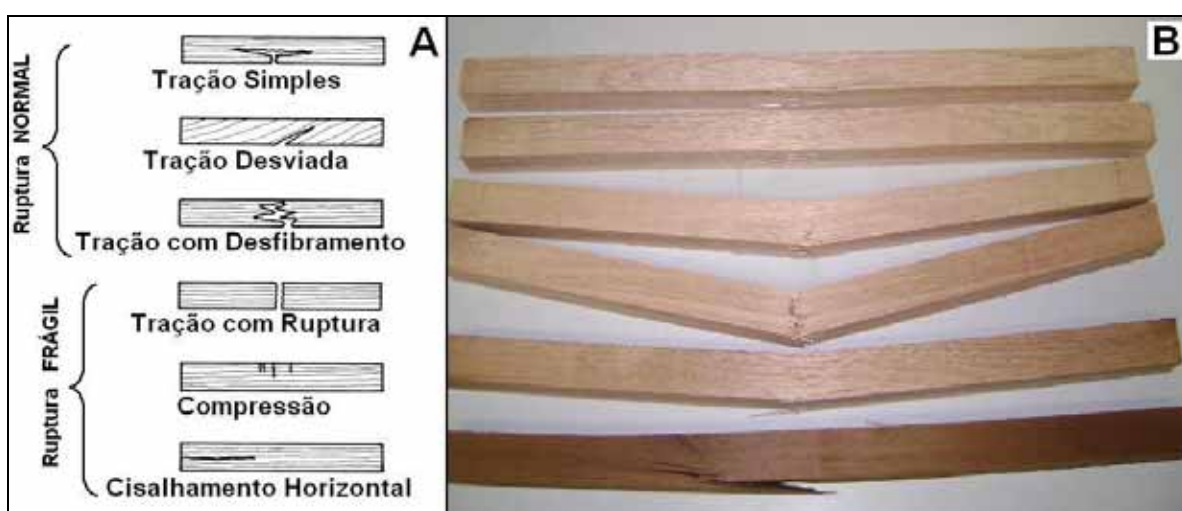


Figura 18. Superfícies de ruptura após os ensaios de flexão (A), segundo a norma de ASTM D-143 (1994), e formas de ruptura dos corpos-de-prova de *E. grandis* após o ensaio (B).

4.4.3.4. Ensaio de dureza normal às fibras

A dureza normal às fibras da madeira (f_{wH90} ou f_{H90}), proposta por Janka, foi determinada convencionalmente pela tensão que atuante na face paralela às fibras do corpo-de-prova prismático produz a penetração de uma semi-esfera de aço de 1 cm^2 , na profundidade igual ao seu raio e é determinada pela equação (14)

$$f_{H90} = \frac{f_{\text{máx}}}{A_{SD}} \quad (14)$$

sendo:

f_{H0} - dureza Janka normal às fibras, N/m^2 ou Pa;

$f_{\text{máx}}$ - máxima força aplicada ao corpo-de-prova necessária à penetração de uma semi-esfera de seção diametral com 1 cm^2 de área na profundidade igual ao seu raio, N;

A_{SD} - área da seção diametral da esfera, igual a 1 cm^2 .

O ensaio de dureza normal às fibras, as dimensões e o aspecto dos corpos-de-prova da madeira controle e das termorretificadas de *E. grandis* são verificados na Tabela 6 e na Figura 19.

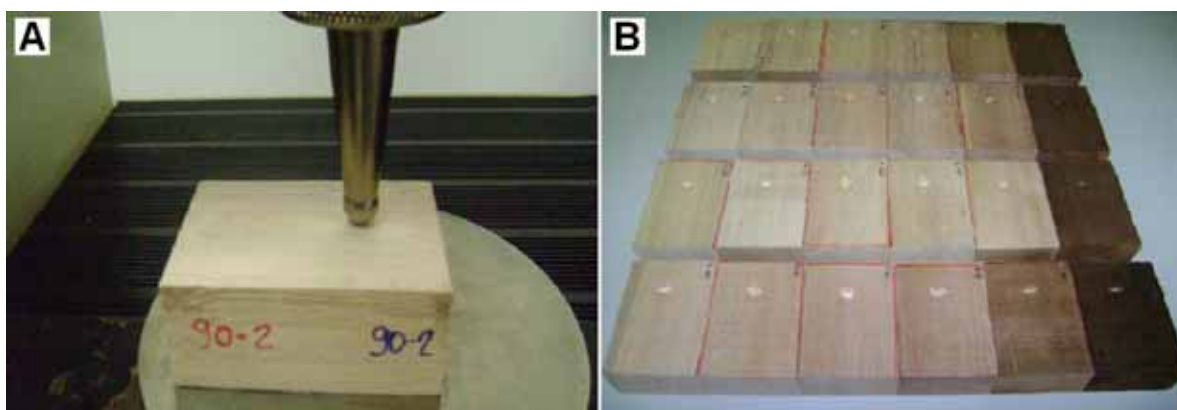


Figura 19. Ensaio de dureza normal às fibras (A), e aspecto dos corpos-de-prova de *E. grandis* após o ensaio (B).

Logo após os ensaios de caracterização mecânica das madeiras de *E. grandis* foram realizadas avaliações sistemáticas da umidade dos corpos-de-prova, no Laboratório de Secagem e Preservação de Madeiras da FCA-UNESP de Botucatu-SP, através

das medições das massas úmidas e secas a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ com uma balança de precisão de 0,01 g e capacidade de 3000 g.

4.5. Análise estatística

Para a determinação da perda de massa das tábuas de *Eucalyptus grandis*, em função da temperatura do tratamento de termorreificação, foi realizada uma análise de regressão exponencial crescente em função da tendência observada dos pares de dados. O modelo se baseou na variabilidade da perda de massa para cada temperatura.

Para a variação da espessura das tábuas após a termorreificação, foi aplicado um modelo não paramétrico segundo um delineamento inteiramente casualizado, levando em consideração o tratamento térmico e a aplicação do teste de Dunn para comparações múltiplas.

Para as variáveis das propriedades físicas e mecânicas e para a resistência biológica da madeira foram adotados métodos de análise paramétrica para análise de variância (ANOVA), com o delineamento do experimento em blocos ao acaso levando-se em consideração o tratamento de termorreificação e o uso do teste de Tukey para as comparações de médias.

O nível de significância adotado em todos os testes foi de 5% de probabilidade.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Efeito da termorreificação nas propriedades físicas da madeira

5.1.1. Efeito da termorreificação na qualidade das tábuas

Para cada uma das temperaturas empregadas na termorreificação da madeira de *Eucalyptus grandis* determinou-se a perda de massa das tábuas durante os respectivos tratamentos térmicos.

Em seguida, com os valores da percentagem de perda de massa e com as temperaturas adotadas na termorreificação da madeira, aplicou-se o modelo de regressão em função da tendência observada dos pares de dados. Como mostra a Figura 20, optou-se pela escolha de um modelo exponencial crescente ($Y = A_1 * e^{(X/T_1)+Y_0}$).

A Figura 20 mostra os resultados obtidos pelo modelo ajustado para se calcular a perda de massa das tábuas de *Eucalyptus grandis* em função das diferentes temperaturas de termorreificação. Neste caso, o coeficiente de determinação (R^2) e o valor de “p” foram, 92,75% e <0,0001.

Os coeficientes do modelo de regressão apresentaram-se significativos, justificando suas presenças no modelo. Através da dispersão dos erros e dos intervalos de confiança e de previsão conclui-se que o modelo ajustado e descrito anteriormente representa os conjuntos dos dados estudados.

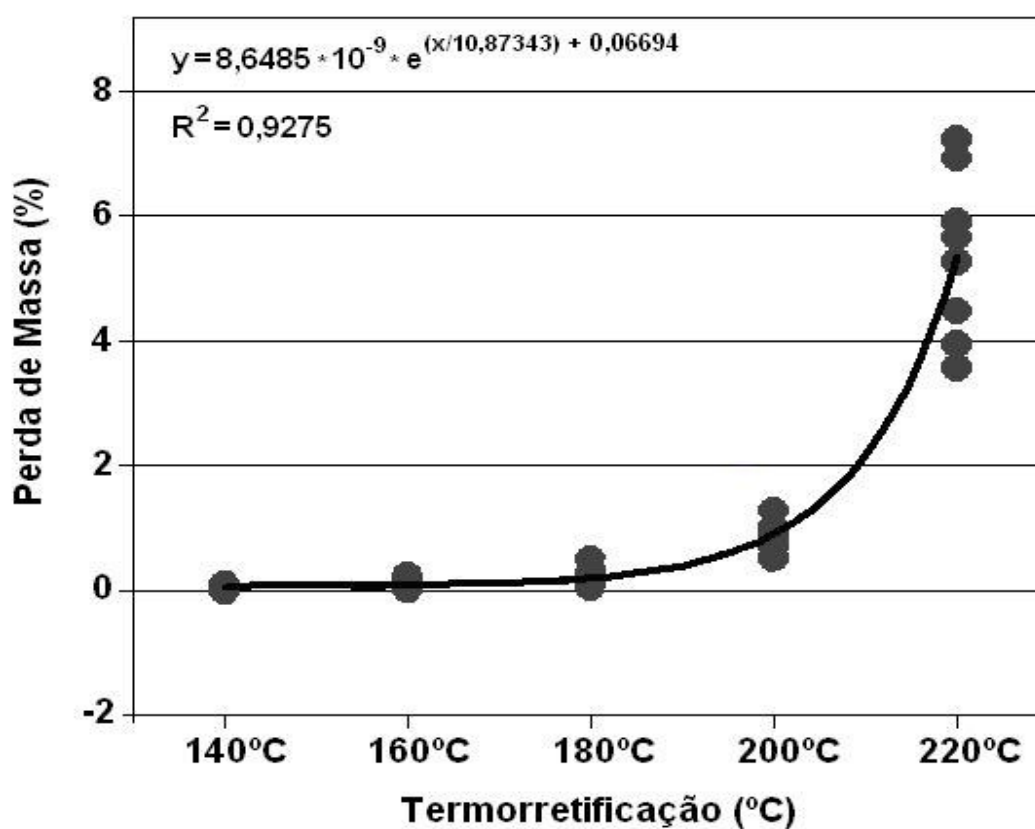


Figura 20. Regressão exponencial ajustada para estimar a perda de massa de tábuas de *E. grandis* em função da temperatura de termorretificação.

Com o modelo gerado em função da análise de regressão, obteve-se a equação proposta para a determinação da perda de massa das tábuas de *E. grandis* em função da temperatura de termorretificação, como mostra a Tabela 7.

Tabela 7. Equação proposta para determinação da perda de massa das tábuas de *E. grandis* em função da temperatura de termorretificação.

Temperatura da Termorretificação (°C)	Modelo proposto	Perda de Massa (%)
140°C	$PM = 8,6485 \cdot 10^{-9} \cdot e^{[(T/10,87343) + 0,06694]}$	0,004
160°C		0,02
180°C		0,1
200°C		0,9
220°C		5,7

sendo: T - temperatura de termorretificação, °C; PM - perda de massa nas tábuas de *Eucalyptus grandis*, %.

Verifica-se que a perda de massa das tábuas de *Eucalyptus grandis* aumenta exponencialmente de 0,004% para até aproximadamente 5,7%, com o aumento da temperatura de termorretificação de 140°C para 220°C. Esses resultados eram esperados, pois, segundo relatam Stamm (1956), Haygreen e Bowyer (1996), Schniewind (1989), Forest Products Laboratory (1999), Homan et al. (2000), Waskett e Selmes (2001) e Thiam et al. (2002), o aquecimento da madeira em altas temperaturas ocasiona a degradação de alguns de seus componentes químicos, o que, conseqüentemente, provoca a perda de massa. A qual, segundo Alén et al. (2002) e Sundqvist et al. (2006), aumenta com o aumento do tempo de exposição e da temperatura do tratamento. O aumento considerável da perda de massa da madeira termorretificada à 220°C é semelhante ao encontrado por Hakkou et al. (2005a, 2005b) para madeiras de *Fagus sylvatica* e *Populus nigra* tratadas entre 40°C e 260°C, as quais apresentaram perda de massa significativa a partir das temperaturas de 180°C e 200°C.

Resultados semelhantes foram encontrados por Metsä-Kortelainen et al. (2005) e/ou Alén et al. (2002), que ao estudarem a termorretificação do alburno da madeira *Picea abies*, respectivamente, com temperaturas de 170°C, 190°C, 210°C e 230°C durante 3 horas e/ou com 180°C a 225°C durante 4 horas, concluíram que o aumento da temperatura provoca perdas de massa na ordem de 1,8%, 3,3%, 6,6% e 10,0% e/ou de 1,5% a 10,8%.

Para cada uma das temperaturas empregadas na termorretificação da madeira de *Eucalyptus grandis* verificou-se, como mostra a Tabela 8, a influência dos tratamentos na variação da espessura das tábuas.

Tabela 8. Efeito da temperatura de termorretificação na diminuição da espessura das tábuas de *E. grandis*.

Tratamento	N	Região próxima à Medula			Região próxima à Casca		
		C.V. (%)	Δ e média (mm)	Redução %	C.V. (%)	Δ e média (mm)	Redução %
140°C	81	21,11	-0,483 a	-----	18,52	-0,487 a	-----
160°C	81	18,96	-0,559 b	15,7	23,03	-0,547 ab	12,3
180°C	81	19,56	-0,588 b	21,7	44,92	-0,541 b	11,1
200°C	81	28,64	-0,674 c	39,6	67,64	-0,513 b	5,3
220°C	76	35,47	-0,964 d	99,6	104,33	-0,577 b	18,5

sendo: N - número de repetições; Δ e média - diferença média da espessura das tábuas; C.V. - coeficiente de variação; letras diferentes na mesma coluna - indicam diferença significativa ao nível de 5% de significância pelo teste de Dunn.

Salienta-se que todas as tábuas de *E. grandis* utilizadas no experimento foram obtidas de pranchas centrais divididas ao meio, ao longo da medula. Então, cada tábua possuía todo o lenho compreendido entre a medula e a casca e, assim, foram realizadas medições das espessuras nas regiões próximas à medula e, também, na periferia do fuste.

A falta de normalidade dos dados, da variação da espessura das tábuas após a termorreificação, recomendou a adoção de métodos de análise não paramétrica (Kruskall-Wallis) para análise de variância e a aplicação do teste de Dunn para comparação múltipla.

Assim, constata-se, pela Tabela 8, que na região próxima à medula houve uma variação significativa ao nível de 5% de significância na diferença da espessura com o aumento da temperatura de termorreificação. Essa região das tábuas termorreificadas à 140°C apresentou uma diferença na espessura de 0,483 mm em relação à dimensão original (antes do tratamento), sendo que nas submetidas à 220°C houve uma variação de 0,964 mm.

Pode-se verificar que na região da madeira próxima à periferia do fuste não houve uma variação mais pronunciada na diferença da espessura com o aumento da temperatura de termorreificação, conforme era esperado para esse tipo de lenho. Essa região das tábuas termorreificadas com 140°C apresentou diferença na espessura de 0,487 mm em relação à dimensão original (antes do tratamento), enquanto que nas submetidas à 220°C houve uma variação média de 0,577 mm.

A região da medula das tábuas tratadas com 220°C apresentou um decréscimo significativo de até 99,6% quando comparado com o material termorreificado à 140°C. Quando se faz a mesma comparação na periferia das tábuas, percebe-se que o material tratado com a maior temperatura apresenta um decréscimo de apenas 18,5% em relação ao material termorreificado na condição mais suave.

Era esperado, com base na literatura, uma redução da espessura da tábua mais pronunciada na sua periferia do que próximo à medula, com o aumento da temperatura do tratamento. Pois, a variação em espessura está associada com a perda de massa e Papadopoulos (2006) salienta que as perdas de massa provocadas pela termorreificação no lenho juvenil são reduzidas em 40% quando comparadas com as perdas de massa na região mais periférica do lenho; e, Lepage (1986) e Estevez (2007) afirmam que as madeiras que possuem maiores teores de hemiceluloses são mais facilmente termodegradadas.

Essa menor variação da espessura com o aumento da temperatura de termorretificação da madeira próxima à casca, quando comparada com a madeira próxima à medula, pode ser explicada pela presença de rachaduras internas somente no lenho próximo à periferia do fuste em algumas das tábuas termorretificadas entre 200°C e 220°C.

Nota-se, na Tabela 8, que os coeficientes de variação da diferença em espessura na região periférica da tábua é muito alto e apresenta-se na ordem de 67,64% e 104,33% para os tratamentos de 200°C e de 220°C. Já, a região da medula das tábuas tratadas entre 140°C e 220°C e a região periférica das tratadas de 140°C a 180°C apresentaram coeficientes de variação sempre abaixo de 44,92%. Com o preparo do material para o ensaio de propriedades físicas foi constatado que um número razoável de corpos-de-prova, provenientes de algumas das tábuas tratadas entre 200°C e 220°C, foi descartado devido à presença de rachaduras internas.

Assim, o alto coeficiente de variação da diferença em espessura na região periférica das tábuas termorretificadas com 200°C e 220°C e o maior número de corpos-de-prova rejeitados devido à presença de rachaduras internas em algumas dessas tábuas podem explicar o aumento da espessura em algumas das tábuas tratadas com as maiores temperaturas.

Contudo, estudos detalhados sobre o efeito da termorretificação nas propriedades anatômicas da madeira de *E. grandis* devem ser realizados, sendo que Rousset et al. (2004) salientam que as rachaduras internas e as alterações na morfologia dos poros da madeira estão associadas com os tratamentos térmicos.

5.1.2. Efeito da termorretificação nas massas específicas e nos teores de umidade de equilíbrio da madeira

Conforme metodologia citada anteriormente (item 4.4.1.), determinou-se o efeito da termorretificação sobre as massas específicas aparentes e os teores de umidade de equilíbrio higroscópicos da madeira de *Eucalyptus grandis*.

A normalidade dos dados recomendou a adoção de análise de variância com delineamentos em blocos ao acaso e com repetições aninhadas a blocos, levando-se em

consideração os tratamentos térmicos, e o teste de Tukey com 5% de significância para as comparações múltiplas.

Verifica-se, na Tabela 9, que a massa específica aparente básica, a 0% de umidade, aquela determinada na condição climática de 12,0% de TUE e a de 17,5% de TUE, da madeira controle de *Eucalyptus grandis*, apresentaram valores médios de 0,418, 0,477, 0,500 e 0,508 g/cm³, respectivamente. Salienta-se que os resultados se enquadraram com os encontrados por Ribeiro e Zani Filho (1993) que classificaram a madeira de *E. grandis* na classe de massa específica abaixo de 0,510 g/cm³, e por Oliveira (1997) que obteve como massas específica básica e a 12% de umidade valores de 0,460 e 0,550 g/cm³, ao caracterizar a madeira dessa espécie.

Tabela 9. Efeito da temperatura de termorretificação nas massas específicas aparentes e nos teores de umidade de equilíbrio higroscópicos da madeira de *E. grandis*.

Tratam.	Bloco	N Total	Massa Específica a 0% (g/cm ³)			Massa Específica a 12,0% de TUE (g/cm ³)		
			C.V.	Média	Redução %	C.V.	Média	Redução %
Controle	14	106	6,87	0,477 a	-----	6,74	0,500 a	-----
140°C	14	109	6,24	0,460 b	3,6	6,15	0,481 b	3,8
160°C	14	112	7,53	0,467 b	2,1	7,32	0,487 b	2,6
180°C	14	111	7,81	0,445 c	6,7	7,60	0,463 c	7,4
200°C	14	72	5,17	0,462 b	3,1	5,07	0,478 b	4,4
220°C	14	60	5,99	0,427 d	10,5	5,92	0,439 d	12,2

Tratam.	Bloco	N Total	Massa Específica a 17,5% de TUE (g/cm ³)			Massa Específica Básica (g/cm ³)		
			C.V.	Média	Redução %	C.V.	Média	Redução ou (Aumento) %
Controle	14	106	6,43	0,508 a	-----	5,98	0,418 a	-----
140°C	14	109	6,05	0,489 b	3,7	5,58	0,407 b	2,6
160°C	14	112	7,14	0,496 b	2,4	6,48	0,416 a	0,5
180°C	14	111	7,42	0,471 c	7,3	7,39	0,401 b	4,1
200°C	14	72	4,94	0,486 b	4,3	5,20	0,420 a	(0,5)
220°C	14	60	5,83	0,444 d	12,6	5,63	0,400 b	4,3

(continuação Tabela 9)

Tratam.	Bloco	N Total	Teor de Umidade de Equilíbrio de 12,0 % (%)			Teor de Umidade de Equilíbrio de 17,5 % (%)		
			C.V.	Média	Redução %	C.V.	Média	Redução %
Controle	14	106	2,70	9,0 a	-----	3,48	13,2 a	-----
140°C	14	109	3,18	8,4 b	6,7	2,93	12,1 b	8,5
160°C	14	112	4,19	7,8 c	13,1	5,80	11,5 c	12,7
180°C	14	111	7,67	7,1 d	21,5	9,06	10,5 d	20,7
200°C	14	72	15,63	5,9 e	34,3	15,62	9,2 e	30,7
220°C	14	60	4,45	4,6 f	49,3	4,74	6,8 f	48,6

sendo: N - número de repetições; C.V. - coeficiente de variação, %; letras diferentes - indicam diferença significativa ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

A massa específica básica não sofreu variação significativa com a termorreificação, embora o incremento da temperatura tenha diminuído a massa seca dos corpos-de-prova. Pela verificação das variáveis que determinam a massa específica da madeira foi constatado que o volume saturado dos corpos-de-prova apresentou uma diminuição pronunciada com o aumento da temperatura do tratamento. Brito (2006) explica que a termorreificação tem maior influência na diminuição da higroscopicidade da madeira e na melhora da sua estabilidade dimensional do que na sua perda de massa. Assim, constata-se que a massa específica básica não é um bom parâmetro para avaliar a madeira termorreificada.

Entretanto, a Tabela 9 e a Figura 21 mostram que as termorreificações promoveram decréscimos significativos de até 10,5%, 12,2% e 12,6%, respectivamente, nas massas específicas a 0% de umidade, a 12,0% e a 17,5% de TUE. As massas específicas da madeira controle foram estatisticamente diferentes das madeiras termorreificadas mesmo com temperaturas de 140°C. As madeiras termorreificadas com 220°C foram as que apresentaram maiores reduções significativas nessa propriedade física, sendo que as suas respectivas massas específicas foram 0,427, 0,439 e 0,444 g/cm³. Esse resultado é semelhante ao encontrado por Unsal e Ayırlım (2005) que ao termorreificarem a madeira de *Eucalyptus camaldulensis* com 150°C e 180°C por 10 horas, obtiveram, respectivamente, reduções de 7,1% e 10,0% nas suas massas específicas a 12% de umidade. E, também, se assemelha com as reduções de 1,5% e 10,8% na massa específica a 12% da madeira de *Picea abies* termorreificada sob 180°C e 225°C por 4 horas, conforme estudo realizado por Alén et al. (2002).

Esses resultados eram esperados, pois, conforme mostrado anteriormente, e segundo Stamm (1956), Haygreen e Bowyer (1996), Schniewind (1989), Forest Products Laboratory (1999), Homan et al. (2000), Waskett e Selmes (2001) e Thiam et al. (2002) o aquecimento da madeira em altas temperaturas ocasiona a degradação de alguns de seus componentes químicos, o que, consequentemente, provoca a perda de massa e a diminuição das massas específicas aparentes.

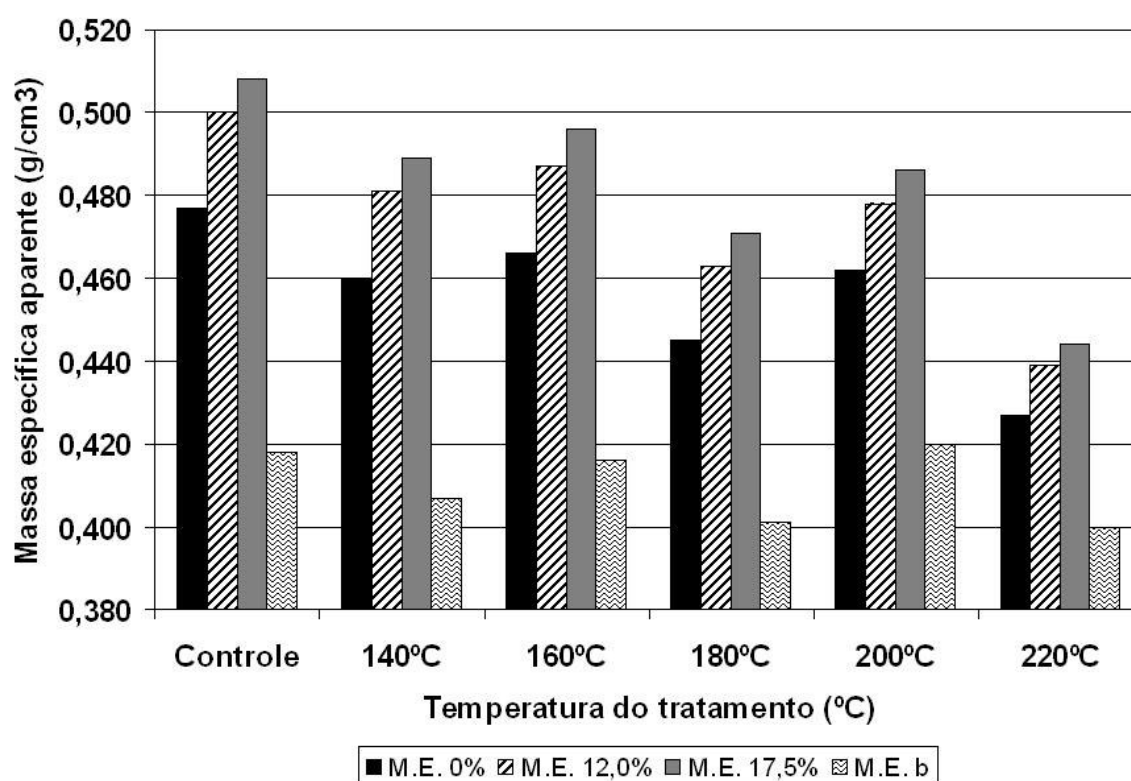


Figura 21. Efeito da termorretificação nas massas específicas aparentes da madeira de *E. grandis*.

Na Tabela 9 é mostrado que a madeira controle de *Eucalyptus grandis* ao adsorver umidade alcançou 9,0% e 13,2% de teores de umidade de equilíbrio higroscópico, respectivamente, nas condições climáticas de 12,0% de 17,5% de TUE. Se no estudo fosse verificada a dessorção de umidade da madeira nas condições climáticas de 12,0% de TUE, ela, provavelmente, apresentaria teor de umidade de equilíbrio aproximado de 12,0%. Entretanto, os resultados encontrados no presente estudo estão coerentes com a literatura, pois Galvão e Jankowsky (1988), Skaar (1988), Haygreen e Bowyer (1996), Forest Products Laboratory

(1999), Chauhan e Aggarwal (2004) e Del Menezzi (2004) mostraram que devido ao fenômeno de histerese a curva de adsorção permanece sempre abaixo da de dessorção.

Verifica-se, na Tabela 9 e na Figura 22, que o aumento da temperatura de termorretificação de 140°C para 220°C provocou reduções crescentes entre 6,7% e 49,3% e entre 8,5% e 48,6%, respectivamente, nos teores de umidade de equilíbrio higroscópico obtidos na condição de 12,0% e de 17,5% de TUE. Na condição de 12,0% de TUE, as madeiras controle, e as termorretificadas com 140°C, 160°C, 180°C, 200°C e 220°C apresentaram, respectivamente, teores de umidade de equilíbrio na ordem de 9,0%, 8,4%, 7,8%, 7,1%, 5,9% e de 4,6%. Na condição de 17,5% de TUE, os teores de umidade de equilíbrio das madeiras apresentaram-se em 13,2%, 12,1%, 11,5%, 10,5%, 9,2% e de 6,8%.

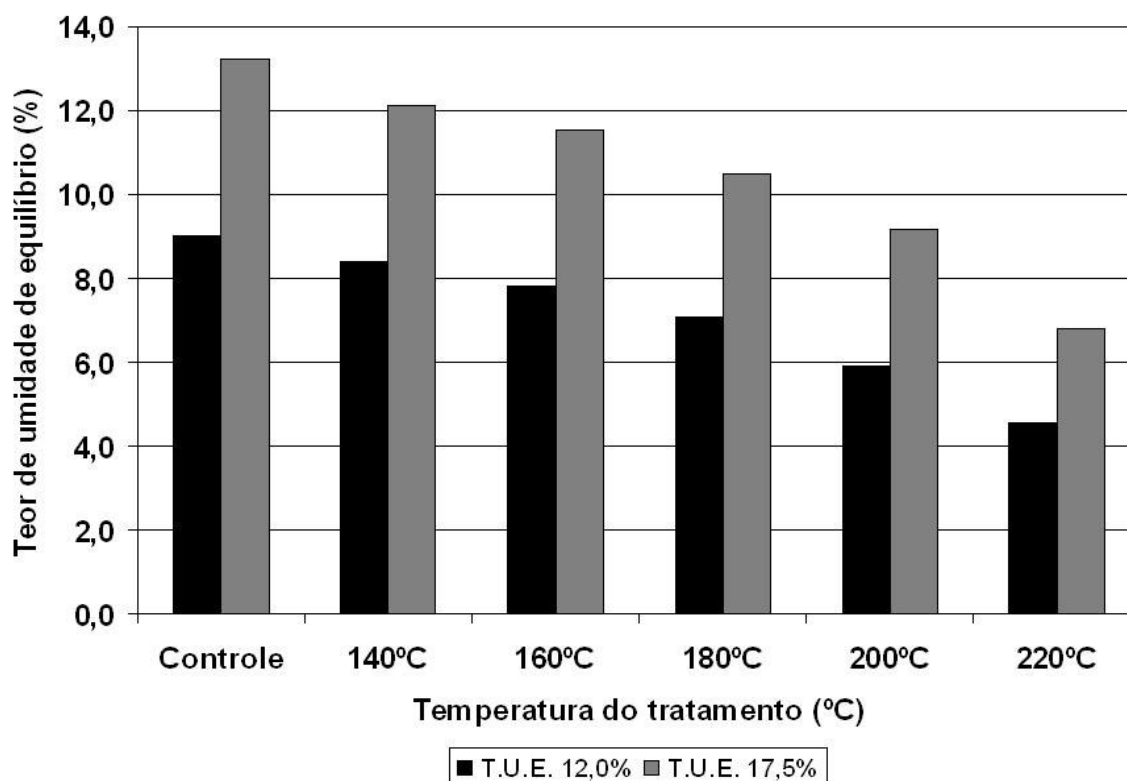


Figura 22. Efeito da termorretificação no teor de umidade de equilíbrio higroscópico da madeira de *E. grandis*.

Os resultados encontrados, no presente estudo, são coerentes com a afirmação dada por Vernois (2001) de que as madeiras tratadas termicamente, em torno de

200°C, além de apresentarem higroscopicidade menor do que as não tratadas, se estabilizam em torno de 4% a 5% de umidade de equilíbrio, em vez de 10% a 12%.

Melhoras semelhantes, nos teores de umidade de equilíbrio, também foram encontrados por Juodeikienė e Minelga (2003) para a madeira de *Pinus* sp. tratada termicamente a 120°C, ou, ainda, por Bekhta e Niemz (2003), sendo que as madeiras de *Picea abies* sem tratamento e quando termorretificadas com 200°C durante 2, 4, 8 e 24 horas, apresentaram 12,2%, 9,2%, 8,8%, 8,2% e 7,5% de teores de umidade de equilíbrio.

Verifica-se, na Tabela 9, que a redução do teor de umidade de equilíbrio pôde chegar até 49,3%. Esse resultado é semelhante ao relatado por Jämsä e Viitaniemi (2001) que afirmam que madeiras quando submetidas ao tratamento térmico apresentam reduções de até 50,0% do teor de umidade de equilíbrio higroscópico, devido à diminuição dos sítios de adsorção (região amorfa) e à degradação parcial das hemiceluloses.

A diminuição no teor de umidade de equilíbrio da madeira está relacionada com a sua higroscopicidade. Sabe-se que a higroscopicidade da madeira está relacionada com a sua composição química, sendo que as hemiceluloses são os constituintes químicos que mais contribuem com a adsorção de água pelo material (SKAAR, 1972; GALVÃO e JANKOWSKY, 1988; OLIVEIRA, 1997, 2007) e que durante a elevação na temperatura dos tratamentos térmicos ocorre a reação de despolimerização das hemiceluloses, a degradação da região amorfa da celulose e, conseqüentemente, o aumento da cristalinidade desse polímero com a diminuição dos grupos hidroxilas livres; concomitantemente, ocorrem as reações de condensação e reticulação da lignina com os produtos resultantes da degradação térmica, as quais são responsáveis pela redução da higroscopicidade da madeira. Assim, a redução do teor de umidade de equilíbrio higroscópico da madeira é a propriedade mais importante da madeira termorretificada, pois diminui a retração e o inchamento do material e, conseqüentemente, é responsável pela melhora da sua estabilidade dimensional (STAMM, 1956; VITAL e DELLA LUCIA, 1982; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999; BHUIYAN et al., 2001; JÄMSÄ e VIITANIEMI, 2001; MILITZ e TJEERDSMA, 2001; RAPP, 2001; RAPP e SAILER, 2001; SYRJÄNEN, 2001; VERNOS, 2001; WASKETT e SELMES, 2001; YILGOR et al., 2001; WEILAND e GUYONNET, 2003; DEL MENEZZI, 2004; ROUSSET et al., 2004; WIKBERG e MAUNU, 2004; ALÉN et al., 2005; REPELLIN e GUYONNET, 2005; TJEERDSMA e MILITZ, 2005; BOONSTRA e TJEERDSMA, 2006).

5.1.3. Efeito da termorretificação na instabilidade dimensional da madeira

Conforme metodologia citada anteriormente (item 4.4.1.), determinou-se o efeito da termorretificação, com 140°C, 160°C, 180°C, 200°C e 220°C, sobre a instabilidade dimensional da madeira de *Eucalyptus grandis*.

A normalidade dos dados, referentes às variáveis de caracterização física da madeira, recomendou a adoção de análise de variância com delineamentos em blocos ao acaso e com repetições aninhadas a blocos, levando-se em consideração os tratamentos térmicos, e o teste de Tukey com 5% de significância para as comparações múltiplas.

A influência da termorretificação na instabilidade dimensional da madeira de *Eucalyptus grandis* pode ser constatada nas Tabela 10 e 11, e, são melhores evidenciadas nas Figuras 23, 24, 25 e 26.

Tabela 10. Efeito da temperatura de termorretificação nos inchamentos volumétricos e lineares e no fator anisotrópico da madeira de *E. grandis*.

Tratam.	Bloco	N	Inchamento Volumétrico (%)								
			à 12,0% de TUE			à 17,5% de TUE			Máximo		
			CV	Média	Red. (%)	CV	Média	Red. (%)	CV	Média	Red. (%)
Controle	14	106	7,8	4,06 a	-----	8,2	6,29 a	-----	11,2	14,12 a	-----
140°C	14	109	10,7	3,62 b	10,8	10,5	5,38 b	14,4	11,2	12,94 b	8,4
160°C	14	112	9,3	3,22 c	20,7	10,3	4,92 c	21,8	10,9	12,07 c	14,5
180°C	14	111	13,4	2,78 d	31,5	14,1	4,22 d	32,9	12,6	10,85 d	23,2
200°C	14	72	26,1	2,40 e	40,9	25,3	3,81 e	39,4	19,2	9,94 e	29,6
220°C	14	60	9,9	1,69 f	58,4	9,7	2,59 f	58,8	14,5	6,60 f	53,3

Tratam.	Bloco	N	Inchamento Linear Longitudinal (%)								
			à 12,0% de TUE			à 17,5% de TUE			Máximo		
			CV	Média	Red. (%)	CV	Média	Red. (%)	CV	Média	Red. (%)
Controle	14	106	17,8	0,174 a	-----	20,4	0,205 a	-----	21,9	0,354 a	-----
140°C	14	109	21,0	0,156 b	10,3	20,7	0,183 b	10,7	19,3	0,309 b	12,7
160°C	14	112	23,7	0,134 c	23,0	24,0	0,157 c	23,4	24,2	0,268 c	24,3
180°C	14	111	27,7	0,107 d	38,5	27,2	0,126 d	38,5	27,7	0,219 d	38,1
200°C	14	72	38,7	0,0850 e	51,1	34,3	0,0967 e	52,8	30,5	0,171 e	51,7
220°C	14	60	46,4	0,0613 f	64,8	47,5	0,0678 f	66,9	48,0	0,0801 f	77,4

(continuação Tabela 10)

Tratam.	Bloco	N	Inchamento Linear Radial (%)								
			à 12,0% de TUE			à 17,5% de TUE			Máximo		
			CV	Média	Red. (%)	CV	Média	Red. (%)	CV	Média	Red. (%)
Controle	14	106	9,3	1,44 a	-----	9,5	2,07 a	-----	12,3	3,93 a	-----
140°C	14	109	12,9	1,35 b	6,3	13,4	1,89 b	8,7	15,5	3,93 a	0,0
160°C	14	112	11,7	1,18 c	18,1	13,2	1,68 c	18,8	16,3	3,53 b	10,2
180°C	14	111	14,1	1,05 d	27,1	14,8	1,47 d	29,0	15,8	3,26 c	17,0
200°C	14	72	25,2	0,98 e	31,9	24,0	1,44 d	30,4	19,2	3,32 c	15,5
220°C	14	60	11,3	0,72 f	50,0	11,9	1,04 e	49,8	14,9	2,37 d	39,7

Tratam.	Bloco	N	Inchamento Linear Tangencial (%)								
			à 12,0% de TUE			à 17,5% de TUE			Máximo		
			CV	Média	Red. (%)	CV	Média	Red. (%)	CV	Média	Red. (%)
Controle	14	106	11,1	2,41 a	-----	11,5	3,92 a	-----	14,6	9,42 a	-----
140°C	14	109	12,2	2,08 b	13,7	12,2	3,24 b	17,3	13,7	8,34 b	11,5
160°C	14	112	10,9	1,88 c	22,0	12,0	3,03 c	22,7	13,5	7,96 c	15,5
180°C	14	111	14,4	1,60 d	33,6	15,7	2,58 d	34,2	14,2	7,11 d	24,5
200°C	14	72	28,1	1,32 e	45,2	27,8	2,23 e	43,1	22,4	6,22 e	34,0
220°C	14	60	12,9	0,90 f	62,7	13,2	1,47 f	62,5	20,2	4,05 f	57,0

Tratam.	Bloco	N	Fator anisotrópico								
			à 12,0% de TUE			à 17,5% de TUE			Máxima		
			CV	Média	Red. (%)	CV	Média	Red. (%)	CV	Média	Red. (%)
Controle	14	106	14,0	1,70 a	-----	15,3	1,92 a	-----	20,1	2,44 a	-----
140°C	14	109	12,4	1,56 bc	8,2	14,0	1,74 c	9,4	19,3	2,17 c	11,1
160°C	14	112	12,8	1,61 b	5,3	14,7	1,83 b	4,7	23,1	2,33 ab	4,5
180°C	14	111	10,0	1,54 c	9,4	13,4	1,77 bc	7,8	17,3	2,22 bc	9,0
200°C	14	72	14,3	1,35 d	20,6	17,6	1,56 d	18,8	24,3	1,91 d	21,7
220°C	14	60	13,9	1,25 e	26,5	16,0	1,43 e	25,5	25,0	1,74 d	28,7

sendo: N - número de repetições; C.V. - coeficiente de variação, %; letras diferentes na mesma coluna - indicam diferença significativa ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

As variáveis estudadas foram os inchamentos volumétricos, os lineares tangencial, radial e longitudinal na condição saturada e nos diversos teores de umidade de equilíbrio higroscópico adotados no estudo, e os respectivos coeficientes de retratibilidade tangencial, radial e longitudinal da madeira.

Verifica-se, na Tabela 10 e nas Figuras 23, 24 e 25, que os inchamentos volumétricos da madeira controle de *Eucalyptus grandis* apresentaram-se entre 4,06%, 6,29% e 14,12%, nas condições de 12,0% e de 17,5% de TUE e na saturada. Os respectivos inchamentos tangenciais encontraram-se na ordem de 2,41%, 3,92% e 9,42%; os inchamentos radiais entre 1,44%, 2,07% e 3,93%; e, os longitudinais em cerca de 0,174%, 0,205% e 0,354%, respectivamente.

Esses resultados se enquadram com os valores estipulados por Haygreen e Bowyer (1996), Forest Products Laboratory (1999), Oliveira e Silva (2003) e Chauhan e Aggarwal (2004) para os quais os inchamentos lineares tangencial, radial e longitudinal variam entre 3,5 e 15,0%, entre 2,4 e 11,0% e entre 0,1 e 1,0%; e são coerentes com os encontrados por Oliveira (1997), que no estudo da madeira de *E. grandis* verificou que os inchamentos volumétrico, tangencial, radial e longitudinal máximos são próximos a 15,9%, 10,1%, 5,0% e 0,4%, respectivamente.

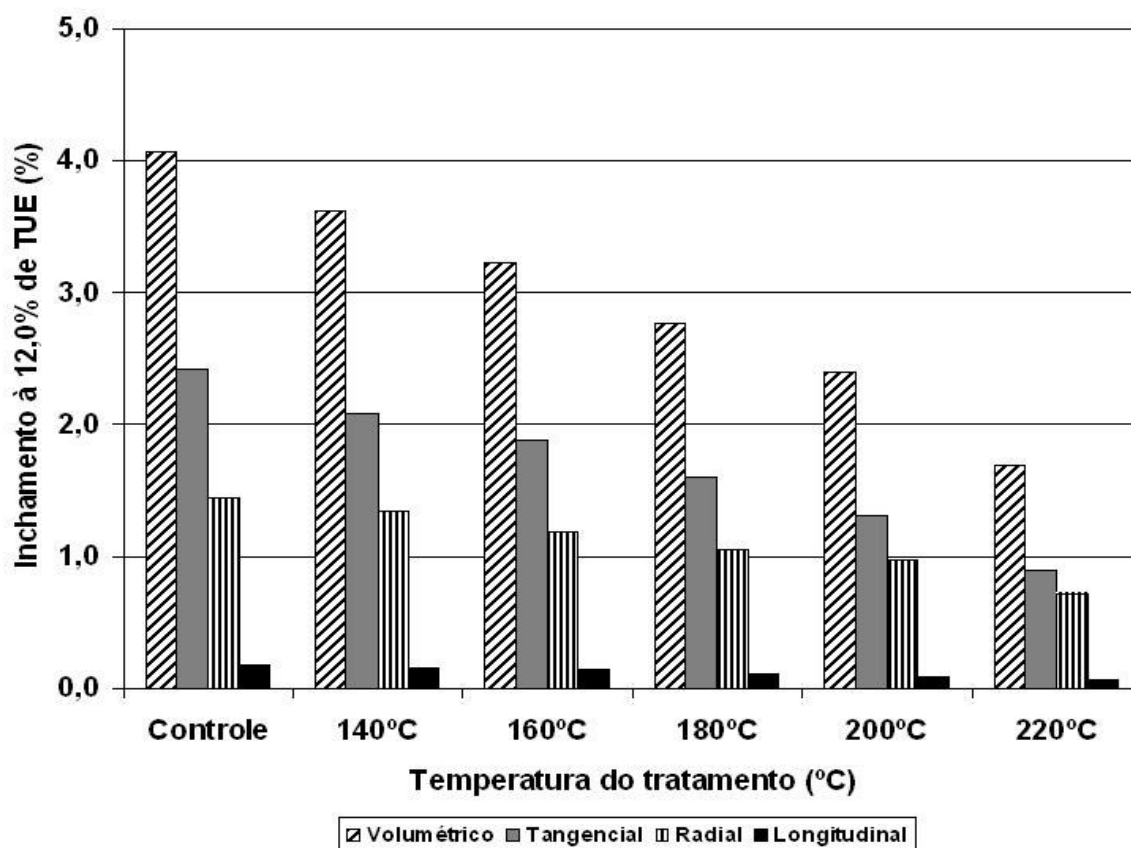


Figura 23. Efeito da termorretrificação nos inchamentos volumétricos e lineares da madeira de *E. grandis* climatizada a 12,0% de TUE.

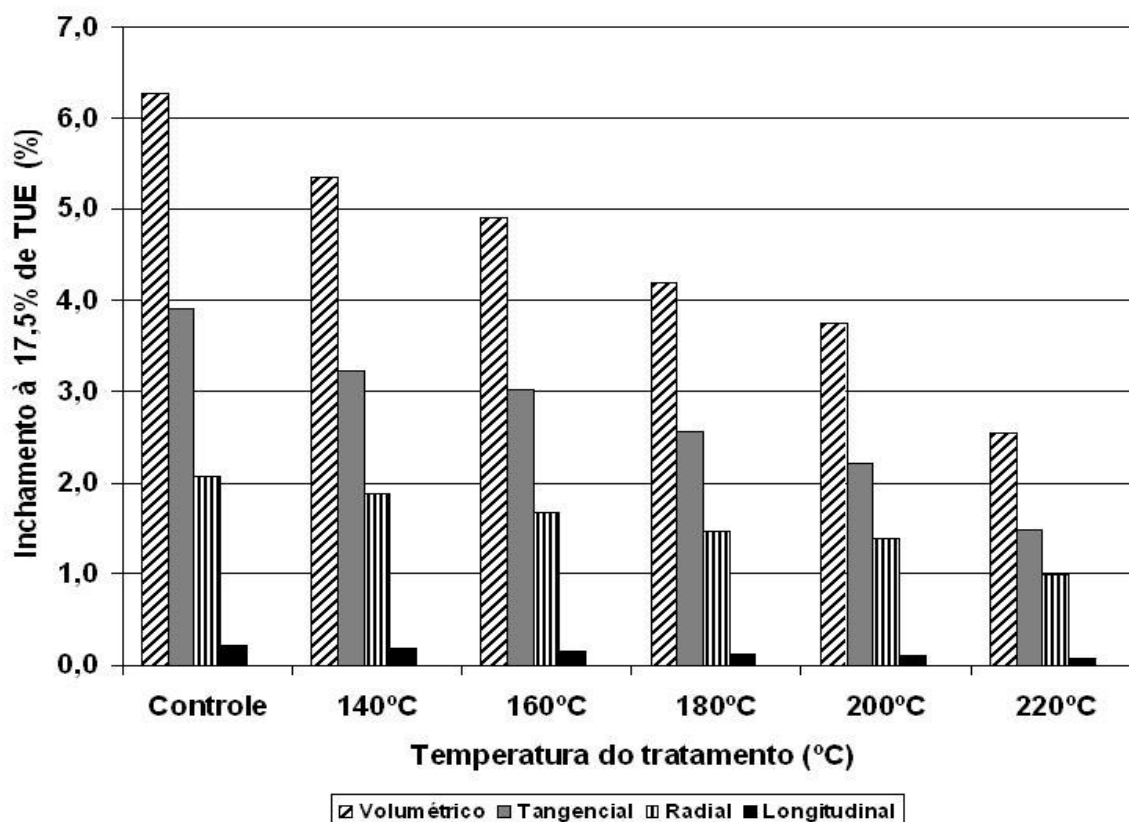


Figura 24. Efeito da termorretificação nos inchamentos volumétricos e lineares da madeira de *E. grandis* climatizada a 17,5% de TUE.

Entretanto, quando se verifica o efeito da termorretificação nos inchamentos da madeira de *Eucalyptus grandis*, conclui-se que os corpos-de-prova não tratados e os tratados com temperaturas de 140°C, 160°C, 180°C, 200°C e de 220°C quando expostos aos diversos teores de umidade de equilíbrio, apresentaram, respectivamente, valores decrescentes e estatisticamente diferentes, conforme pode ser visualizado na Tabela 10.

O presente estudo mostra que a madeira de *Eucalyptus grandis* climatizada na condição de 12,0% de TUE apresentou reduções crescentes e estatisticamente significativas de até 58,4%, 64,8%, 50,0% e 62,7%, respectivamente, nos inchamentos volumétricos e lineares longitudinal, radial e tangencial, quando termorretificadas com até 220°C de temperatura. Quando o mesmo material foi climatizado na condição de 17,5% de TUE mantiveram-se as reduções significativas e, respectivamente, na ordem de até 58,8%, 66,9%, 49,8% e 62,5%. Mesmo após a saturação do material, houve reduções significativas

nas respectivas propriedades físicas de até 53,3%, 77,4%, 39,7% e 57,0%, com o aumento da temperatura de termorretificação.

Esses resultados são semelhantes com os encontrados por Rapp e Sailer (2001), para as madeiras de *Pinus sylvestris* e de *Picea abies* termorretificadas durante 4 horas a 220°C, com melhora de até 40% na retratibilidade, ou ainda, por Militz e Tjeerdsma (2001) para a madeira de *Pinus sylvestris* termorretificada a 180°C, com reduções de 33% e de 44% nos seus inchamentos tangencial e radial, respectivamente. Também, se assemelham com os resultados de Brito (2006), para a madeira de *Eucalyptus grandis* termorretificada a 200°C, com redução de 25% na sua contração volumétrica máxima.

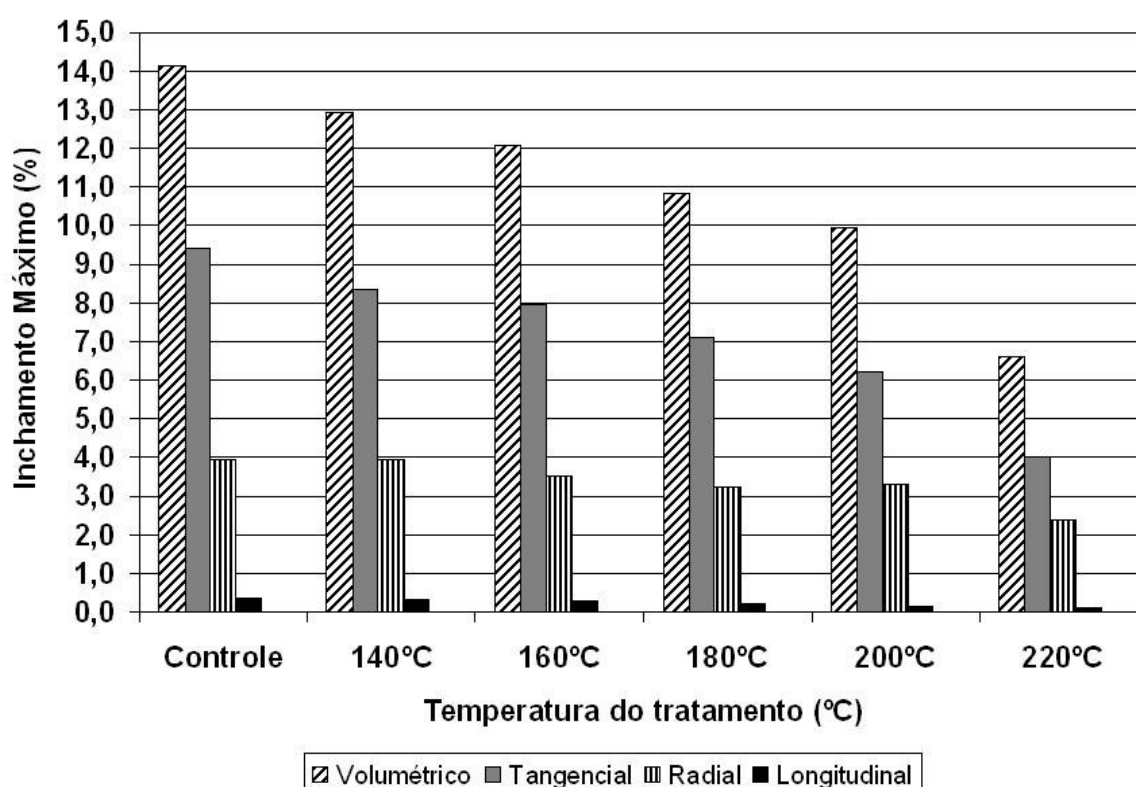


Figura 25. Efeito da termorretificação nos inchamentos volumétricos e lineares máximos da madeira de *E. grandis*.

Nota-se, para a mesma classe de temperatura de tratamento, que as reduções dos inchamentos lineares radial foram ligeiramente menores que a dos outros inchamentos lineares. Durante a termorretificação, o calor foi transmitido por irradiação ao

longo de toda a superfície da peça de madeira e é provável que, por condução, percorreu mais rapidamente a espessura do que a largura das tábuas, por questões dimensionais. Como as tábuas estudadas estavam perfeitamente orientadas, e, conseqüentemente, a direção tangencial estava perfeitamente alinhada com a espessura da madeira serrada, pressupõe-se que esse seja um dos motivos da menor influência do tratamento térmico na direção radial do lenho. Também, acredita-se que a maior facilidade de condução de calor na direção tangencial das fibras (desde que abaixo do PSF), em comparação com a radial, ocorra, conforme salientam Stuart e Evans (1995), pela maior espessura da parede celular e pela presença de um menor número de pontoações e com menores diâmetros na direção tangencial da madeira.

Contudo, os resultados da Tabela 10 mostram que o aumento da termorretificação diminuiu significativamente o fator anisotrópico (relação T/R) da madeira de *Eucalyptus grandis*. O fator anisotrópico da madeira não tratada e das tratadas com temperaturas de 140°C, 160°C, 180°C, 200°C e de 220°C quando expostas a 12,0% de TUE, apresentaram, respectivamente, valores estatisticamente diferentes e na ordem de 1,70, 1,56, 1,61, 1,54, 1,35 e 1,25, e, quando expostas a 17,5% de TUE, apresentaram, respectivamente, valores significativamente diferentes e na ordem de 1,92, 1,74, 1,83, 1,77, 1,56 e 1,43. Como os inchamentos apresentam-se diferenciados nos três planos anatômicos da madeira, quando há uma diminuição na relação entre os valores encontrados para a direção tangencial e a radial há uma redução na instabilidade dimensional das madeiras (HAYGREEN e BOWYER, 1996; OLIVEIRA, 1997; OLIVEIRA e SILVA, 2003; CHAUHAN e AGGARWAL, 2004; DEL MENEZZI, 2004).

Já, pelas Tabela 11 e Figura 26, constata-se que o coeficiente de retratibilidade radial não sofreu influência com a termorretificação da madeira. Contudo, houve reduções crescentes e estatisticamente significativas de até 30,6% e de até 26,9%, respectivamente, nos coeficientes de retratibilidade longitudinal e tangencial, para o material termorretificado com temperaturas de até 220°C. As madeiras controle e as termorretificadas com 140°C, 160°C, 180°C, 200°C e 220°C apresentaram valores de 0,0193, 0,0186, 0,0171, 0,0151, 0,0143 e 0,0134 para os coeficientes de retratibilidade longitudinal e de 0,268, 0,248, 0,241, 0,226, 0,219 e 0,196 para os coeficientes de retratibilidade tangencial.

Tabela 11. Efeito da temperatura de termorretificação nos coeficientes de retratibilidade da madeira de *E. grandis*.

Tratam.	Bloco	N	Q Longitudinal			Q Radial		
			C.V.	Média	Redução %	C.V.	Média	Redução ou (Aumento) %
Controle	14	106	17,8	0,0193 a	-----	9,1	0,159 a	-----
140°C	14	109	19,7	0,0186 a	3,6	10,9	0,160 a	(0,6)
160°C	14	112	23,2	0,0171 b	11,4	10,7	0,151 b	5,0
180°C	14	111	26,0	0,0151 c	21,8	10,0	0,148 b	6,9
200°C	14	72	33,4	0,0143 c	25,9	11,8	0,163 a	(2,5)
220°C	14	60	46,3	0,0134 c	30,6	10,1	0,158 a	0,6

Tratam.	Bloco	N	Q Tangencial		
			C.V.	Média	Redução %
Controle	14	106	10,8	0,268 a	-----
140°C	14	109	10,5	0,248 b	7,5
160°C	14	112	10,2	0,241 b	10,1
180°C	14	111	9,9	0,226 c	15,7
200°C	14	72	15,2	0,219 c	18,3
220°C	14	60	11,7	0,196 d	26,9

sendo: N - número de repetições; C.V. - coeficiente de variação, %; letras diferentes - indicam diferença significativa ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

Essa melhora é explicada por Stamm (1956), Haygreen e Bowyer (1996), Forest Products Laboratory (1999), Homan et al. (2000) e Waskett e Selmes (2001) quando afirmam que o aquecimento da madeira em altas temperaturas ocasiona a degradação de alguns de seus componentes químicos, além de promover a máxima cristalização da celulose (BHUIYAN et al., 2001) devido à destruição dos grupos hidroxilas livres na região amorfa da celulose e a reticulação dos polímeros que compõem a madeira durante o seu tratamento (WEILAND e GUYONNET, 2003; ROUSSET et al., 2004; WIKBERG e MAUNU, 2004) modificando, assim o seu caráter hidrofílico (HAKKOU et al., 2005b).

Contudo, esses resultados são coerentes com os apresentados pela literatura, pois, as madeiras quando submetidas ao tratamento térmico podem apresentar melhora na estabilidade dimensional entre 50% e até 90%, devido às reduções na ordem de até 50% do teor de umidade de equilíbrio higroscópico, com a diminuição dos sítios de adsorção (região amorfa) da parede celular (JÄMSÄ e VIITANIEMI, 2001). Sendo que, as madeiras ao serem termorretificadas entre 160°C e 195°C, durante cerca de 2 a 3 horas, apresentaram um

aumento da região cristalina da celulose entre 41% e 65% (WIKBERG e MAUNU, 2004). E, Bhuiyan et al. (2001) mostra que, logo após a primeira das 8 horas do tratamento térmico à 200°C é que ocorreu a máxima cristalização da celulose da madeira de *Fagus crenata*.

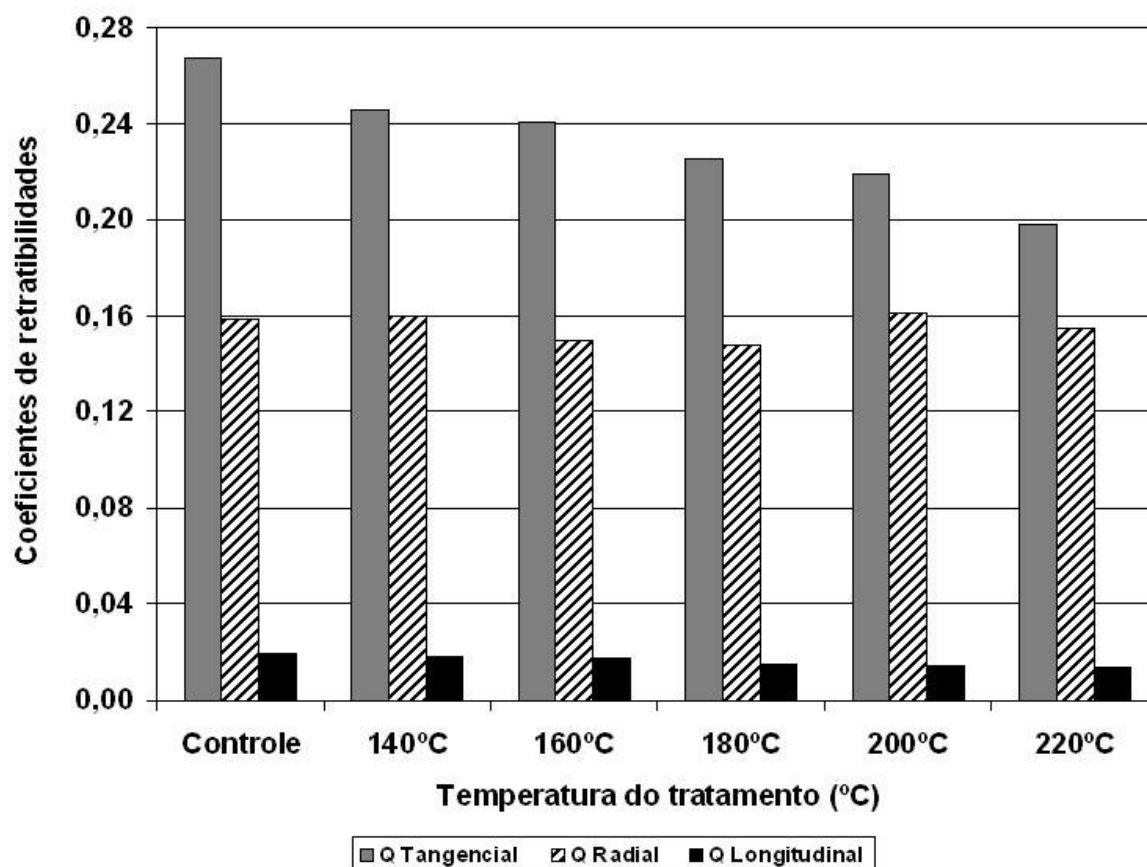


Figura 26. Efeito da termorretificação nos coeficientes de retratibilidades da madeira de *E. grandis*.

Entretanto, também se verifica na Tabela 11, que, o coeficiente de retratibilidade radial apresenta no máximo, apenas, uma redução de 6,9% na madeira termorretificada a 180°C, quando comparada com a não tratada. As madeiras controle e as termorretificadas com 140°C, 200°C e 220°C apresentam valores estatisticamente iguais e na ordem de 0,159, 0,160, 0,163 e 0,158.

A baixa redução dessa propriedade mesmo com o incremento da temperatura pode ser explicada da seguinte maneira: sabe-se que o coeficiente de retratibilidade dimensional da madeira é a relação entre o inchamento linear dimensional,

obtido da condição seca até a condição climatizada a 12,0% de TUE, e o seu respectivo teor de umidade de equilíbrio. Sabe-se, e foi amplamente apresentado no estudo, que a termorretificação da madeira diminui o seu teor de umidade de equilíbrio e melhora a sua estabilidade dimensional; entretanto, para que o coeficiente de retratibilidade dimensional da madeira seja reduzido com o aumento da temperatura, a redução do seu inchamento deve ser superior à redução do seu teor de umidade de equilíbrio. Assim, nas Tabelas 9 e 10, percebe-se que as reduções do inchamento linear radial nas temperaturas de 200°C e 220°C, em relação à madeira controle, são 31,9% e 50,0%, respectivamente. Porém, são menores e/ou muito semelhantes com as reduções nos respectivos teores de umidade de equilíbrio, as quais se apresentam na ordem de 34,3% e 49,3%.

Contudo, sobre o efeito da termorretificação nas propriedades físicas da madeira de *Eucalyptus grandis*, conclui-se através da grande maioria dos resultados apresentados e discutidos que o tratamento da madeira estudada entre 180°C e 200°C é suficiente melhorar a estabilidade dimensional da madeira, sem que ocorra perda de material com rachaduras internas. Salienta-se que os resultados são coerentes com àqueles encontrados na termorretificação realizada por Homan et. al (2000), Bhuiyan et al. (2001), Jämsä e Viitaniemi (2001), Militz e Tjeerdsma (2001), Rapp (2001), Rapp e Sailer (2001), Syrjänen (2001), Vernois (2001), Waskett e Selmes (2001), Alén (2002), Bekhta e Niemz (2003), Juodeikienė e Minelga (2003), Weiland e Guyonnet (2003), Rousset et al. (2004), Wikberg e Maunu (2004) e Metsä-Kortelainen et al. (2005) para as madeiras de outras espécies.

5.2. Efeito da termorretificação na resistência a fungos deterioradores da madeira

Conforme metodologia citada no item 4.4.2., foram realizados os testes acelerados de laboratório, dos tipos “agar-block” e “soil-block”, para avaliar a resistência da madeira de *Eucalyptus grandis* à deterioração provocada pelo fungo *Picnoporus sanguineus*.

A normalidade dos dados recomendou a adoção de análise de variância com delineamentos em blocos casualizados e com repetições aninhadas a blocos, levando-se em consideração os níveis de termorretificação, e o teste de Tukey com 5% de significância para as comparações de médias.

A Tabela 12 mostra que as perdas de massas da madeira controle de *Eucalyptus grandis* apresentaram-se na ordem de 17,31% e de 34,32%, respectivamente, para o material ensaiado no sistema “agar-block” e no “soil-block”. Salienta-se que os dois métodos de ensaio fornecem dados consistentes com relação à resistência da madeira a deterioração. Entretanto, o período diferenciado de incubação de cada teste, respectivamente, 8 e 12 semanas, e a umidade relativa do ar mais constante no “soil-block” podem explicar a variação encontrada.

Com base no resultado apresentado (perda de massa de 34,32%), ao classificarmos a madeira de *Eucalyptus grandis* segundo a norma ASTM D-2017 (1994) podemos incluí-la na classe de resistência moderada, àquela em que a perda de massa devido à ação dos fungos deterioradores varia entre 25% e 44%.

Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Abreu et al. (2007) que ao caracterizarem a resistência natural da madeira de *Eucalyptus* sp concluíram que o material, inoculado com *Pycnoporus cinnabarinus*, apresentou perda de massa de 22,57% e 28,10% após 8 e 16 semanas de incubação.

Entretanto, a perda de massa e a classificação de resistência da madeira controle de *Eucalyptus grandis* são diferentes dos resultados encontrados por Paes (2002), que ao avaliar a resistência natural da madeira de *Corymbia maculata*, exposta por 12 semanas, aos fungos *Postia placenta*, *Neolentinus lepideus* e *Polyporus fumosus* verificaram perda de massa inferior a 10% e classificaram a madeira como altamente resistente.

Tais variações são explicadas por Lepage (1986), Jesus et al. (1998) e Paes et al. (2004), ao comentarem que as madeiras por serem um material de durabilidade natural relativa, podem apresentar, com frequência, diferenças nas suas resistências quanto aos fungos deterioradores, e pela norma ASTM D-2017 (1994) ao expor que a mesma espécie de madeira não ocupa necessariamente uma mesma posição de resistência à deterioração, devido aos diferentes fungos existentes.

Contudo, o foco do presente estudo foi determinar o efeito da termorreificação, com temperaturas de 140°C, 160°C, 180°C, 200°C e 220°C, sobre a durabilidade biológica da madeira de *Eucalyptus grandis*. Os resultados dessa avaliação encontram-se na Tabela 12 e podem ser melhores visualizados na Figura 27.

Assim, as avaliações dos corpos-de-prova submetidos à ação do fungo *Picnoporus sanguineus* indicaram que houve melhora significativa, ao nível de 5% de significância, na resistência à deterioração da madeira de *Eucalyptus grandis* quando termorretificada com temperaturas superiores a 160-180°C.

Tabela 12. Efeito da termorretificação na resistência da madeira de *E. grandis* ao fungo deteriorador *P. sanguineus*.

Tratam.	Bloco	N Total	Ensaio "Agar-Block" (8 semanas)							
			TUE antes (%)		TUE após (%)		Perda de massa (%)			
			C.V.	Média	C.V.	Média	C.V.	Média	Tukey	Redução (%)
Controle	7	21	3,3	9,3 a	15,4	166,5 ab	15,0	17,31	a	-----
140°C	7	21	3,8	8,7 b	8,8	158,5 ab	17,3	16,41	a	5,1
160°C	7	21	4,1	8,2 c	10,4	171,8 a	25,4	12,72	b	26,5
180°C	7	21	4,0	7,4 d	16,4	152,3 ab	24,2	12,06	b	30,3
200°C	7	21	10,5	6,5 e	27,9	144,9 ab	41,1	11,85	b	31,5
220°C	7	21	11,7	4,9 f	22,8	136,6 b	43,2	3,91	c	77,4

Tratam.	Bloco	N Total	Ensaio "Soil-Block" (12 semanas)							
			TUE antes (%)		TUE após (%)		Perda de massa (%)			
			C.V.	Média	C.V.	Média	C.V.	Média	Tukey	Redução (%)
Controle	7	21	3,7	9,2 a	15,3	244,3 a	24,7	34,32	a	-----
140°C	7	21	2,8	8,7 b	5,7	234,9 a	12,3	33,19	a	3,3
160°C	7	21	3,7	8,1 c	23,6	240,3 a	26,2	32,57	a	5,1
180°C	7	21	5,9	7,5 d	12,6	226,9 ab	21,7	28,95	ab	15,7
200°C	7	21	11,1	6,5 e	22,5	200,0 b	39,5	23,81	b	30,6
220°C	7	21	8,5	4,8 f	15,8	126,5 c	64,0	6,05	c	82,4

sendo: N - número de repetições; C.V. - coeficiente de variação, %; TUE - teor de umidade de equilíbrio dos corpos-de-prova; letras diferentes na mesma coluna - indicam diferença significativa ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

Verifica-se que, a termorretificação entre 140°C e 220°C provocou reduções de 5,1 a 77,4% e de 3,3 a 82,4%, respectivamente, nas perdas de massa da madeira incubada em “agar-block” e em “soil-block”. No ensaio do tipo “agar-block”, o fungo foi responsável por perdas de massa na ordem de 17,31%, 16,41%, 12,72%, 12,06%, 11,85% e 3,91%, respectivamente, para as madeiras controle e para as termorretificadas com 140°C,

160°C, 180°C, 200°C e 220°C. No ensaio denominado “soil-block”, as respectivas perdas de massas foram de 34,32%, 33,19%, 32,57%, 28,95%, 23,81% e 6,05%.

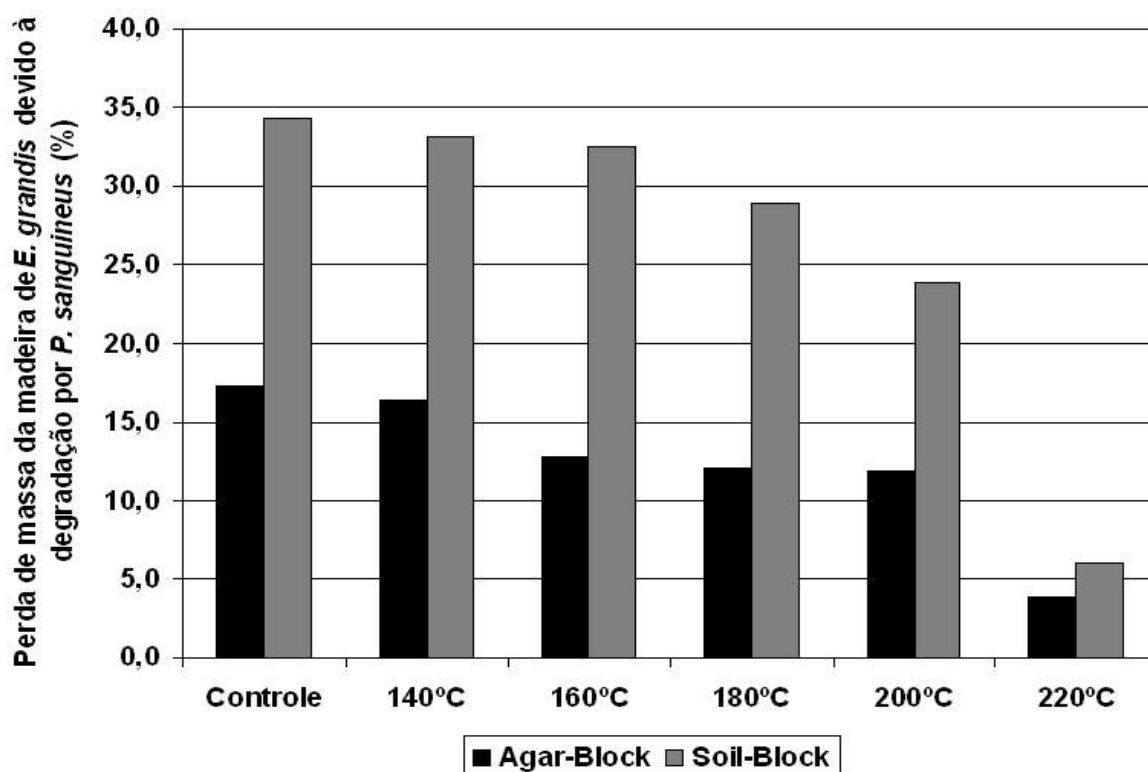


Figura 27. Perda de massa da madeira de *E. grandis* mediante ao fungo deteriorador *P. sanguineus*, em função da temperatura de termorretificação.

Os resultados encontrados são coerentes com as afirmações dadas por Homan et al. (2000), Rapp (2001), Waskett e Selmes (2001), Alén et al. (2002), Rousset et al. (2004) e Metsä-Kortelainen et al. (2005), de que os tratamentos térmicos têm como um dos objetivos aumentar a resistência biológica da madeira perante a ação de agentes xilófagos, e, com a informação dada por Momohara et al. (2003), de que quanto maior o tempo e a temperatura do tratamento melhor é a resistência da madeira ao fungo deteriorador.

Também se assemelham com os obtidos por Militz e Tjeerdsma (2001), que verificaram perda de massa sempre inferior a 4% devido à exposição das madeiras de *Pinus radiata*, *Pinus sylvestris*, *Pseudotsuga menziesii* e *Picea abies*, tratadas com temperaturas próximas à 220°C, aos fungos *Coriolus versicolor* e *Coniophora puteana*.

Resultados semelhantes foram encontrados por Weiland e Guyonnet (2003) que ao exporem as madeiras de *Fagus sylvatica* sem tratamento e tratadas termicamente com 230-260°C ao fungo *Poria placenta*, durante 16 semanas em teste de laboratório, obtiveram perda de massa de 22,92% e 5,94%, respectivamente.

Também, são semelhantes com os encontrados por Rapp e Sailer (2001), no qual a madeira controle de *Pinus sylvestris* e de *Picea abies* depois de expostas ao fungo *Coniophora puteana* apresentaram perda de massa de 48,0% e 40,0%, respectivamente; e, de 11,0% e 5,5% quando termorretificadas entre 180°C e 220°C, durante 4,5 horas.

É mostrado, na Tabela 12, que a redução da perda de massa ocasionada pelo fungo xilófago pôde alcançar valores de até 82,4%, em relação à madeira controle. Vários autores, dentre eles Oliveira et al. (1986), Vernois (2001), Weiland e Guyonnet (2003) e Doi et al. (2005) explicam que a termorretificação altera a composição química da madeira e promove a indisponibilidade de alimentos (hemiceluloses) aos fungos, reduz o teor de umidade de equilíbrio, promove a criação de novas moléculas livres as quais atuam como fungicidas, além de reticular a rede de lignina dificultando o reconhecimento do substrato pelo fungo.

Contudo, percebe-se pela Tabela 12 que, para ambos os ensaios, os corpos-de-prova de todos os tratamentos apresentaram teores de umidade elevados após o período de incubação. Assim como salientado por Hakkou et al. (2006), isso mostra que o aumento da durabilidade da madeira termorretificada ocorre devido à degradação das hemiceluloses e a reticulação das ligações da lignina.

As alterações nas propriedades químicas provocadas pelas termorretificações da madeira de *Eucalyptus grandis* deverão ser, futuramente, melhor elucidadas, pois poderá explicar com maior exatidão a causa da melhora da resistência natural das madeiras termorretificadas quando expostas aos seus fungos deterioradores e, talvez, se caracterizar como o início do desenvolvimento de novos produtos preservativos de madeira.

Entretanto, através dos resultados apresentados e discutidos, constata-se que a madeira de *Eucalyptus grandis* termorretificada entre 200°C e 220°C apresenta-se como um produto adequado para o uso em ambientes que apresentam condições ótimas para o desenvolvimento de fungos.

5.3. Efeito da termorretificação nas propriedades mecânicas da madeira

Conforme metodologia citada anteriormente (item 4.4.3.), determinou-se o efeito da termorretificação sobre a compressão paralela às fibras, a flexão estática, e a dureza normal às fibras da madeira de *Eucalyptus grandis*.

A normalidade dos dados, referentes as variáveis de caracterização mecânica da madeira, recomendou a adoção de análise de variância com delineamentos em blocos ao acaso, levando-se em conta os tratamentos de termorretificação, e a aplicação do teste de Tukey com 5% de significância para as comparações múltiplas.

Pôde-se observar e foi discutido no item 5.1.2. que o teor de umidade de equilíbrio é reduzido com o incremento da temperatura de termorretificação imposta na madeira. Bodig e Jayne (1982), Haygreen e Bowyer (1996), Oliveira (1997), Forest Products Laboratory (1999), Thiam et al. (2002) dentre outros autores citaram que a diminuição da umidade do material influencia positivamente nas suas propriedades mecânicas. Entretanto, no presente estudo, decidiu-se comparar as propriedades mecânicas da madeira, que foi submetida a diferentes níveis de termorretificação, depois do acondicionamento em um mesmo ambiente. Esta opção foi considerada a melhor para a avaliação prática, pois a madeira quando em serviço estará em equilíbrio higroscópico com o ambiente.

As Tabelas 13, 14 e 16 mostram, de forma detalhada, a rigidez e a resistência da madeira de *E. grandis* quando submetida, respectivamente, aos ensaios de compressão paralela às fibras, de flexão estática e de dureza Janka normal às fibras. Nos ensaios de compressão paralela e de flexão fica evidenciado que a madeira controle possui resistência de 39,8 MPa e 69,0 MPa, respectivamente. A rigidez do material, nos respectivos ensaios de caracterização mecânica, encontra-se na ordem de 12783 MPa e 10670 MPa. A mesma madeira, quando submetida ao ensaio de dureza, apresentou valores de 19,8 MPa. Salienta-se que os resultados se enquadraram com os citados por Haygreen e Bowyer (1996) e Forest Products Laboratory (1999), e, com os encontrados por Oliveira (1997) que obteve resistência em compressão paralela de 30,0 MPa e resistência e rigidez em flexão estática de 52,0 MPa e 8584 MPa ao caracterizar a madeira da mesma espécie.

Observa-se, pela Tabela 13 e pela Figura 28, que as resistências à compressão paralela às fibras das madeiras controle e das termorretificadas com 140°C, 160°C, 180°C, 200°C e 220°C apresentaram-se, respectivamente, em torno de 39,8, 40,6, 41,5, 41,3, 42,0 e 37,6 MPa, e a sua respectiva rigidez apresentaram-se em torno de 12783, 12350, 12479, 11922, 12283 e 12079 MPa.

Tabela 13. Efeito da temperatura de termorretificação na resistência e na rigidez em compressão paralela às fibras da madeira de *E. grandis*.

Tratam.	N	Compressão Paralela - f_{c0} (MPa)				Compressão Paralela - E_{c0} (MPa)			
		C.V.	Média	Tukey	Redução ou Aumento (%)	C.V.	Média	Tukey	Redução (%)
Controle	19	8,8	39,8	ab	-----	25,3	12783	a	-----
140°C	19	9,7	40,6	a	(1,9)	18,5	12350	a	3,4
160°C	19	9,5	41,5	a	(4,2)	16,8	12479	a	2,4
180°C	19	7,5	41,3	a	(3,7)	13,2	11922	a	6,7
200°C	19	7,4	42,0	a	(5,3)	18,4	12283	a	3,9
220°C	19	15,1	37,6	b	5,6	16,9	12079	a	5,5

Tratam.	N	Teor de Umidade de Equilíbrio (%)			
		C.V.	Média	Tukey	Redução (%)
Controle	19	4,6	12,2	a	-----
140°C	19	4,7	10,3	b	15,6
160°C	19	7,2	10,0	bc	18,0
180°C	19	10,7	9,4	c	22,9
200°C	19	17,1	7,8	d	36,1
220°C	19	7,9	5,1	e	58,2

sendo: N - número de repetições; C.V. - coeficiente de variação, %; letras diferentes - indicam diferença significativa ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

Constata-se que o incremento na temperatura de termorretificação de 140°C para até 220°C promoveu apenas um decréscimo de 5,6% na magnitude na resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) e de 6,7% na sua rigidez (E_{c0}), quando comparados com os valores encontrados para a madeira controle de *E. grandis*.

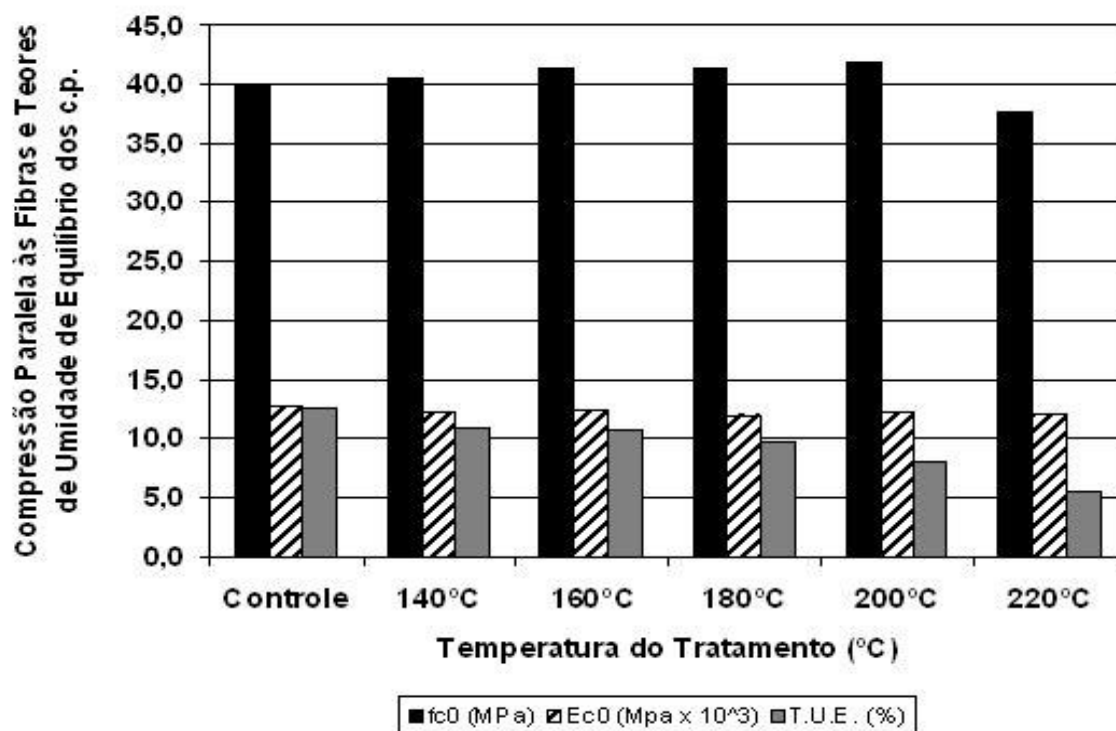


Figura 28. Efeito da termorretificação na rigidez e resistência em compressão paralela às fibras da madeira de *E. grandis*.

Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Severo e Tomaselli (2000) que ao vaporizarem toras de *Eucalyptus dunni* à 100°C de temperatura, por 20 horas, e sua madeira serrada, por 3 horas, concluíram que a rigidez e a resistência à compressão paralela às fibras não sofreram alteração com o tratamento térmico.

Também se assemelham com os apresentados por Weiland e Guyonnet (2003) que ao termorretificarem madeiras de *Fagus sylvatica* e de *Pinus pinaster*, com temperaturas entre 230°C e 260°C, verificaram reduções de apenas 6,1% e 8,0% nas resistências à compressão paralela, em relação às madeiras sem tratamento.

Entretanto, os resultados diferem dos apresentados por Unsal e Ayrilmis (2005), que ao expor a madeira de *Eucalyptus camaldulensis* à 180°C, durante 10 horas, encontraram um decréscimo na resistência à compressão paralela às fibras de 19,0% em relação à madeira controle. Porém, ressalta-se que o tempo de tratamento empregado foi maior do que o utilizado neste estudo e que a condição atmosférica do meio em que a madeira foi exposta não foi relatada pelos autores.

Já, pela Tabela 14 e pela Figura 29, observa-se que as resistências em flexão para as madeiras controle e para as termorretificadas com 140°C, 160°C, 180°C, 200°C e 220°C apresentaram-se, respectivamente, em torno de 69,0, 65,6, 64,4, 52,5, 45,6 e 32,9 MPa, e a rigidez das madeiras apresentaram-se em torno de 10670, 10802, 11319, 10905, 10938 e 9768 MPa.

Constata-se que o incremento na temperatura de termorretificação, de 180°C para até 220°C, promoveu decréscimos significativos e na ordem de 24,0% a 52,3% nas resistências em flexão estática (f_M) e, que houve uma redução na magnitude da rigidez (E_{M0}) de, apenas, 8,4% para material termorretificado a 220°C, quando comparado com o material sem tratamento.

Tabela 14. Efeito da temperatura de termorretificação na resistência e na rigidez em flexão estática da madeira de *E. grandis*.

Tratam.	N	Flexão Estática - f_M (MPa)				Flexão Estática - E_{M0} (MPa)			
		C.V.	Média	Tukey	Redução (%)	C.V.	Média	Tukey	Redução ou Aumento (%)
Controle	17	15,4	69,0	a	-----	11,2	10670	ab	-----
140°C	18	15,4	65,6	a	5,0	10,1	10802	a	(1,2)
160°C	18	14,8	64,4	a	6,7	9,7	11319	a	(6,1)
180°C	19	25,4	52,5	b	24,0	5,5	10905	a	(2,2)
200°C	18	32,8	45,6	b	33,9	9,8	10938	a	(2,5)
220°C	16	49,4	32,9	c	52,3	18,1	9768	b	8,4

Tratam.	N	Teor de Umidade de Equilíbrio (%)			
		C.V.	Média	Tukey	Redução (%)
Controle	17	4,4	11,6	a	-----
140°C	18	3,2	9,8	b	15,5
160°C	18	7,4	9,1	c	21,7
180°C	19	10,5	8,4	d	27,1
200°C	18	10,8	7,2	e	38,0
220°C	16	7,3	4,8	f	58,8

sendo: N - número de repetições; C.V. - coeficiente de variação, %; letras diferentes - indicam diferença significativa ao nível de 5% de significância pelo teste paramétrico de Tukey.

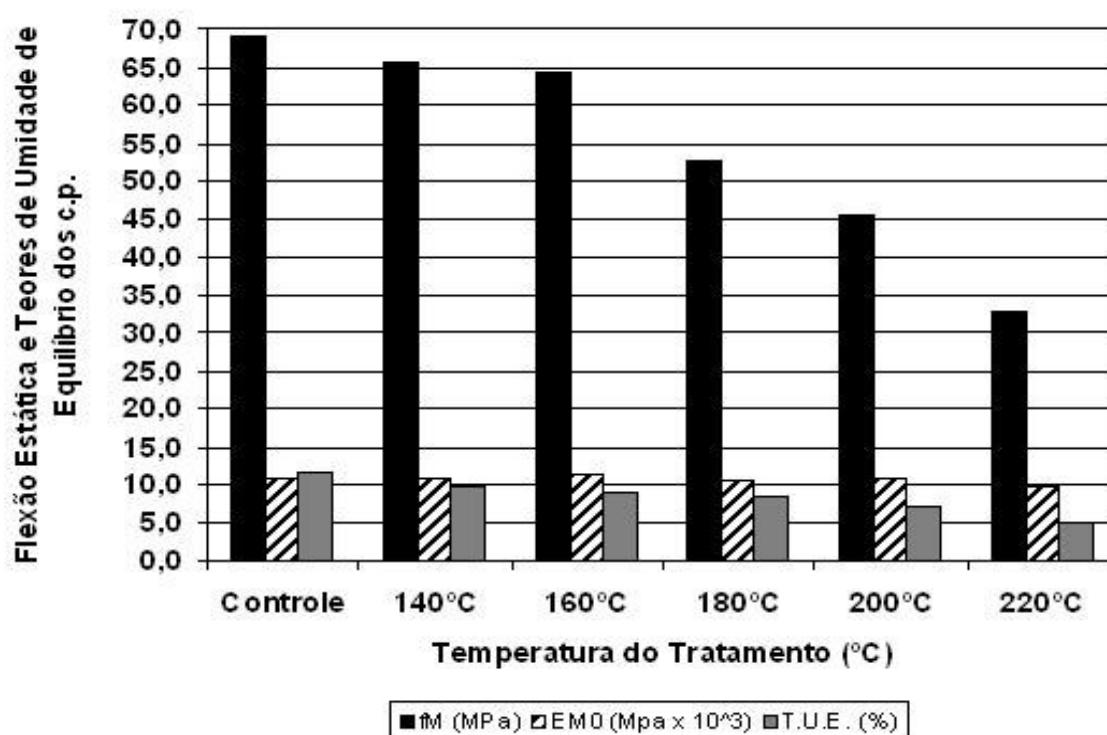


Figura 29. Efeito da termorretrificação na rigidez e resistência em flexão estática da madeira de *E. grandis*.

Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Bekhta e Niemz (2003) que ao termorretrificarem a madeira de *Picea abies*, com 200°C durante 2 a 24 horas, obtiveram reduções entre 44,0% e 55,0% na resistência mecânica da madeira e apenas entre 4,0% e 9,0% na sua rigidez. Também, se assemelham com as reduções de 40,0% e 8,0% nas resistências das madeiras de *Fagus sylvatica* e *Picea abies* termorretrificadas a 200°C (KAMDEM et al., 2002). São similares com os resultados apresentados por Esteves et al. (2007) que, ao estudarem o efeito da termorretrificação entre 190°C e 210°C nas madeiras de *Pinus pinaster* e de *Eucalyptus globulus*, concluíram que a folhosa apresentou reduções na resistência e na rigidez em flexão, respectivamente, na ordem de 50,0% e 15,0%, e que na conífera as respectivas variáveis foram reduzidas em torno de 40,0% e 5,0%.

Entretanto, as reduções que a termorretrificação promoveu na rigidez e na resistência em flexão da madeira de *E. grandis* foram bem menores do que as encontrados por Sundqvist et al. (2006) no estudo sobre o efeito do tratamento hidrotérmico entre 160°C e 200°C, na madeira de *Betula pubescens*.

Vários autores, dentre eles Stamm (1956), Forest Products Laboratory (1999), Homan et al. (2000), Zaman et al. (2000), Jämsä e Viitaniemi (2001), Militz e Tjeerdsma (2001), Rapp (2001), Syrjänen (2001), Alén et al. (2005) e Hakkou et al. (2005a, 2005b), destacam que a degradação da madeira apresenta comportamento diferenciado conforme o meio de aquecimento utilizado, sendo que tratamentos com atmosfera com altos teores de umidade, temperatura e tempo de exposição aceleram o processo.

Contudo, no presente estudo, foi verificado pelas Tabelas 13 e 14 e pelas Figuras 28 e 29 que tanto a rigidez em compressão paralela às fibras (E_{c0}) quanto em flexão estática (E_{M0}), da madeira de *Eucalyptus grandis*, não foram significativamente alteradas pela termorretificação. Dentre as possibilidades levantadas para explicar esse fato destacam-se: o rearranjoamento ou a reticulação dos componentes químicos presentes após a termorretificação da madeira e/ou o provável aumento da região cristalina da celulose e a consequente aproximação das micelas como descritos por Bhuiyan et al. (2001) e Wikberg e Maunu (2004). A inalteração da rigidez da madeira termorretificada, tanto no ensaio de compressão quanto no de flexão, é ser explicada por Bhuiyan et al. (2000) devido ao aumento da cristalização da celulose e da espessura dos cristalitos desse polímero.

Outra informação obtida nestes ensaios foi, respectivamente, a forma de ruptura e os tipos de superfícies de ruptura nos corpos-de-prova após os ensaios de compressão paralela às fibras e de flexão estática. A Tabela 15 mostra a classificação das formas e dos tipos de superfície de ruptura, conforme o estabelecido pela norma ASTM D-143 (1994), em função do número de corpos-de-prova provenientes tanto de madeira controle como das termorretificadas.

Observa-se, na Tabela 15, que 100% dos corpos-de-prova das madeiras controle e das termorretificadas entre 140°C e 160°C apresentaram tipos de ruptura classificados como normais, após os ensaios de compressão paralela às fibras e de flexão estática. Cerca de 89,5% e 26,3% das amostras das madeiras termorretificadas com 180°C e 200°C apresentaram forma normal de ruptura, segundo a norma ASTM D-143 (1994), no ensaio de compressão paralela. Em torno de 84,2% e 55,6% do número de peças desse material apresentaram superfície de rupturas classificadas como normais após os ensaios de flexão.

Fica evidenciado que o aumento da temperatura de termorretificação provoca o aumento do número de corpos-de-prova com rupturas caracterizadas como frágeis, de modo a chegar em 100% na madeira de *Eucalyptus grandis* tratada com 220°C.

Tabela 15. Efeito da termorretificação no tipo de ruptura dos corpos-de-prova de compressão paralela às fibras e de flexão estática da madeira de *E. grandis*.

Forma de Ruptura pela ASTM D-143 (1994)	Ensaio de Compressão Paralela às Fibras											
	N total: 19		N total: 19		N total: 19		N total: 19		N total: 19		N total: 19	
	Controle		140°C		160°C		180°C		200°C		220°C	
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
Esmagamento	15	78,9	17	89,5	14	73,7	13	68,4	2	10,5	0	0,0
Fenda em Cunha	4	21,1	2	10,5	5	26,3	4	21,1	3	15,8	0	0,0
Cisalhamento	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Total (Ruptura Normal)	19	100	19	100	19	100	17	89,5	5	26,3	0	0
Fendilhamento	0	0,0	0	0,0	0	0,0	1	5,3	5	26,3	11	57,9
Compressão e cisalhamento paralelo	0	0,0	0	0,0	0	0,0	1	5,3	9	47,4	8	42,1
Total (Ruptura Frágil)	0	0	0	0	0	0	2	10,5	14	73,7	19	100

Tipo de Superfície de Ruptura pela ASTM D-143 (1994)	Ensaio de Flexão Estática											
	N total: 17		N total: 18		N total: 18		N total: 19		N total: 18		N total: 16	
	Controle		140°C		160°C		180°C		200°C		220°C	
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
Tração Simples	7	41,2	6	33,3	5	27,8	1	5,3	0	0,0	0	0,0
Tração Desviada	3	17,6	5	27,8	4	22,2	6	31,6	4	22,2	0	0,0
Tração com Desfibramento	7	41,2	7	38,9	9	50,0	9	47,4	6	33,3	0	0,0
Total (Ruptura Normal)	17	100	18	100	18	100	16	84,2	10	55,6	0	0
Tração com Ruptura	0	0,0	0	0,0	0	0,0	3	15,8	8	44,4	11	68,8
Compressão	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	1	6,3
Cisalhamento Horizontal	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	4	25,0
Total (Ruptura Frágil)	0	0	0	0	0	0	3	15,8	8	44,4	16	100

sendo: N - número de corpos-de-prova.

Já, a Tabela 16 e a Figura 30, mostram que, a dureza Janka normal às fibras para as madeiras controle e para as termorretificadas com 140°C, 160°C, 180°C, 200°C e 220°C apresentaram-se, respectivamente, em torno de 19,8, 19,1, 18,2, 17,4, 16,8 e 15,7 MPa.

Tabela 16. Efeito da temperatura de termorretificação na dureza Janka normal às fibras da madeira de *E. grandis*.

Tratam.	N	Dureza Janka – f_{H90} (MPa)				Umidade de Equilíbrio (%)			
		C.V.	Média	Tukey	Redução (%)	C.V.	Média	Tukey	Redução (%)
Controle	19	19,0	19,8	a	-----	2,3	12,5	a	-----
140°C	19	15,4	19,1	ab	3,5	4,9	11,0	b	12,0
160°C	19	20,1	18,2	abc	8,1	5,8	10,8	b	13,6
180°C	19	13,5	17,4	bcd	12,1	7,9	9,8	c	21,6
200°C	19	12,1	16,8	cd	15,2	12,3	8,0	d	36,0
220°C	19	17,0	15,7	d	20,7	7,0	5,4	e	56,8

sendo: N - número de repetições; C.V. - coeficiente de variação, %; letras diferentes - indicam diferença significativa ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

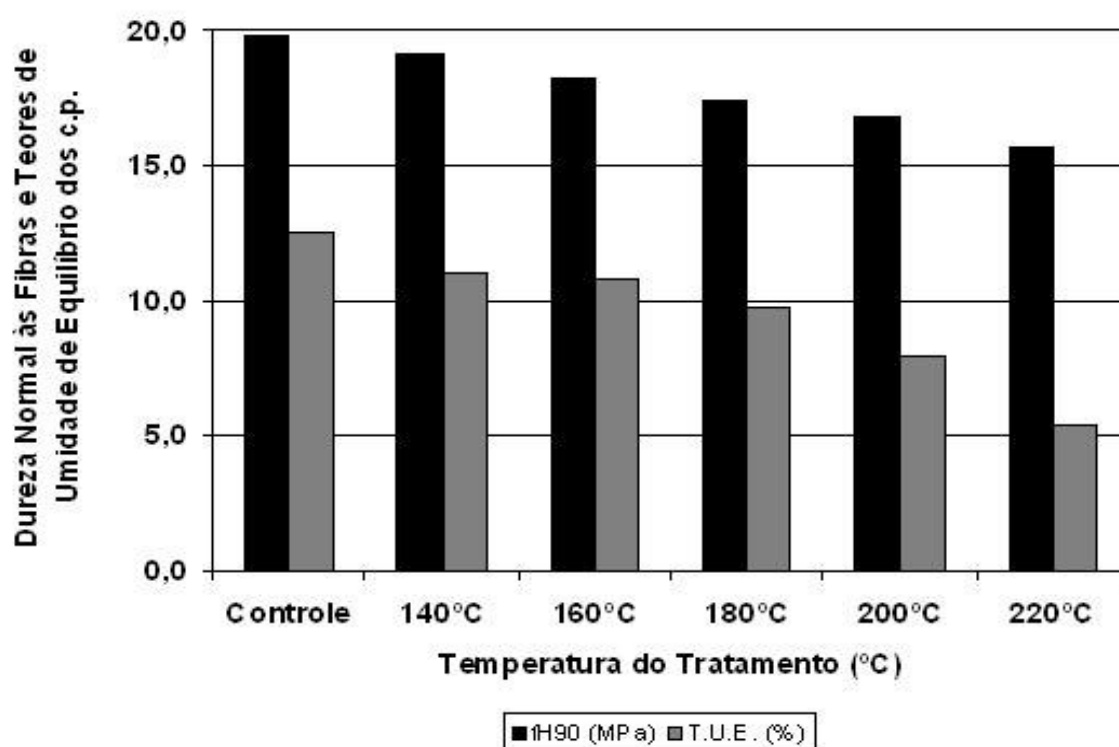


Figura 30. Efeito da termorretificação na dureza Janka normal às fibras da madeira de *E. grandis*.

Verifica-se que a madeira controle de *Eucalyptus grandis*, utilizada no estudo, apresenta valores de dureza Janka menores do que os encontrados por Dickson et al. (2003) que ao caracterizarem a madeira de *Eucalyptus dunnii*, com 9 anos de idade, constataram que o material apresentava uma dureza de 45,2 MPa. Uma explicação para o fato está relacionada com diferença entre as idades das árvores e as espécies utilizadas nos estudos.

Entretanto, constata-se que o aumento na temperatura de termorretificação entre 180°C e 220°C promoveu decréscimos significativos e na ordem de 12,1% e 20,7% na dureza Janka normal às fibras, quando comparada com a madeira controle de *E. grandis*.

Embora haja escassez de artigos científicos sobre os efeitos de tratamentos térmicos na dureza do material, constata-se que os resultados encontrados são similares às informações dadas por Homan et al. (2000) e Waskett e Selmes (2001) de que, em geral, as propriedades mecânicas da madeira reduzem em torno de 30% com a sua termorretificação.

Todos os resultados eram esperados, pois, conforme mostrado anteriormente, e segundo Stamm (1956), Haygreen e Bowyer (1996), Schniewind (1989), Forest Products Laboratory (1999), Homan et al. (2000), Bhuiyan et al. (2000, 2001), Waskett e Selmes (2001), Thiam et al. (2002) e Wikberg e Maunu (2004) o aquecimento da madeira em altas temperaturas ocasiona a degradação de alguns de seus componentes químicos, a reticulação dos componentes restantes, o aumento da cristalização dos polímeros de celulose e as consequentes alterações nas propriedades de resistência mecânica da madeira.

As prováveis alterações sofridas nas propriedades químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*, durante as termorretificações empregadas no estudo, deverão ser em trabalhos futuros, melhores elucidadas, pois poderão explicar com melhor exatidão os tipos de ruptura dos corpos-de-prova e as tendências de diminuição em algumas propriedades das madeiras termorretificadas e a ausência de variação em outras.

Assim, precauções devem ser tomadas quanto ao uso da madeira de *Eucalyptus grandis* que tenham sido submetidas ao processo de termorretificação com temperaturas acima de 180°C, no que se refere ao seu uso estrutural e, portanto, as informações apresentadas e discutidas devem ser levadas em consideração no dimensionamento das peças.

6. CONCLUSÕES

Os estudos desenvolvidos, para avaliar o efeito da termorretificação na qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, mostraram que esta técnica possui um grande potencial para melhorar a estabilidade dimensional e a resistência natural do material, embora, diminua algumas de suas propriedades mecânicas.

Com relação ao efeito da termorretificação na perda de massa e na variação em espessura da madeira serrada, conclui-se que:

- a) a perda de massa das tábuas de *Eucalyptus grandis* aumenta exponencialmente de 0,004% para 5,7%, com o aumento da temperatura de termorretificação de 140°C para 220°C;
- b) na região próxima à medula há uma variação na diminuição da espessura das tábuas de até 99,6% com o aumento da temperatura de termorretificação, e de 18,5% próximo à periferia do fuste.

No estudo relativo ao efeito da termorretificação entre 140°C e 220°C nas propriedades físicas da madeira, pode-se concluir que:

- a) o aumento da temperatura promoveu decréscimos significativos de até 10,5%, 12,2% e 12,6% nas massas específicas aparentes a 0% de umidade, e nas determinadas a 12,0% e a 17,5% de TUE, respectivamente; a massa específica básica não sofreu variação significativa e não é indicada para avaliar a madeira termorretificada;

- b) o aumento da temperatura de termorretificação provocou reduções significativas entre 6,7% e 49,3% e entre 8,5% e 48,6%, respectivamente, nos teores de umidade de equilíbrio higroscópico para as condições climáticas de 12,0% e 17,5% de TUE;
- c) houve reduções crescentes e significativas de até 58,4%, 64,8%, 50,0% e 62,7% nos inchamentos volumétricos e lineares longitudinal, radial e tangencial dos corpos-de-prova climatizados em 12,0% de TUE; de até 58,8%, 66,9%, 49,8% e 62,5% quando climatizados em 17,5% de TUE; e de até 53,3%, 77,4%, 39,7% e 57,0% quando saturados;
- d) o aumento da temperatura reduziu significativamente em até 28,7%, 25,5% e 26,5%, respectivamente, os fatores anisotrópicos máximos e da madeira aclimatizada a 17,5% e a 12,0% de TUE.

Com referência ao efeito da termorretificação na resistência da madeira ao fungo deteriorador *Picnoporus sanguineus*, conclui-se que:

- a) no ensaio do tipo “agar-block” foram observadas reduções significativas entre 26,5% e 77,4% nas perdas de massa do material termorretificado entre 160°C e 220°C;
- b) no ensaio do tipo “soil-block” foram observadas reduções significativas entre 15,7% e 82,4% nas perdas de massa do material termorretificado entre 180°C e 220°C.
- c) a madeira de *Eucalyptus grandis* termorretificada entre 200°C e 220°C apresenta-se como um produto adequado para o uso em ambientes que apresentam condições ótimas para o desenvolvimento de fungos.

Sobre o efeito da termorretificação nas propriedades mecânicas da madeira, conclui-se que:

- a) o incremento na temperatura de 180°C para até 220°C promoveu decréscimos significativos entre 24,0% e 52,3% nas resistências em flexão estática (f_M), e a sua rigidez (E_{M0}) não foi estatisticamente alterada;
- b) a magnitude da resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) e da sua rigidez (E_{c0}) não foram alteradas com o aumento da temperatura de termorretificação; o ensaio de compressão paralela às fibras não é indicado para avaliar a madeira termorretificada.

- c) temperaturas acima de 180°C provocam o aumento do número de corpos-de-prova com rupturas caracterizadas como frágil, de modo a caracterizar 100% da madeira de *Eucalyptus grandis* tratada com 220°C;
- d) o aumento na temperatura, de 180°C para 220°C, promoveu decréscimos significativos entre 12,1% e 20,7% na dureza Janka normal às fibras da madeira de *Eucalyptus grandis*;
- e) para que as peças de *Eucalyptus grandis* termorretificadas com temperaturas acima de 180°C sejam aplicadas em uso estrutural, elas devem ser dimensionadas levando-se em consideração as reduções nas suas resistências apresentadas no estudo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, L.D.; MARINO, R.H.; MESQUITA, J.B.; RIBEIRO, G.T. Degradação da madeira de *Eucalyptus* sp. por basidiomicetos de podridão branca. **Arq. Inst. Biol.**, São Paulo, v.74, n.4, p.321-328, 2007.

ABUTER, R. A. A. Estudio de algunas propiedades físicas de la madera juvenil de *Eucalyptus globulus* L. crecido en Chile. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRAS, 3, 1989, São Carlos. **Anais...** São Carlos, 1989. p.233-242.

ALÉN, R.; KOTILAINEN, R.; ZAMAN, A. Thermochemical behavior of Norway spruce (*Picea abies*) at 180-225°C. **Wood Science and Technology**, Berlin, v.36, n.2, p.163-171, 2002.

ALMEIDA, G.; HERNÁNDEZ, R. E. Changes in physical properties of tropical and temperate hardwoods below and above fiber saturation point. **Wood Science and Technology**, Berlin, v.40, p.599-613, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM D-143. Standard methods of testing small clear specimens of timber. **Annual Book of ASTM Standard**, v.0410, p.23-53, 1994.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM D-1413. Standard test method for wood preservatives by laboratory soil-block cultures. **Annual Book of ASTM Standard**, v.0410, p.119-121, 1994.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM D-2017. Standard method of accelerated laboratory test of natural decay resistance of wood. **Annual Book of ASTM Standard**, v.0410, p.324-328, 1994.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 7190. **Ações nas estruturas, propriedades da madeira e dimensionamento nos estados limites de utilização.** Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

AYADI, N.; LEJEUNE, F.; CHARRIER, F.; CHARRIER, B.; MERLIN, A. Color stability of heat-treated wood during artificial weathering. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.61, n.3, p.221-226, 2003.

BALLARIN, A.W.; LARA PALMA, H.A. Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L.. **Revista Árvore**, Viçosa, v.27, n.3, p.371-380, 2003.

BEKHTA, P.; NIEMZ, P. Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood. **Holzforschung**, Berlin, v.57, p.539-546, 2003.

BHUIYAN, T. R.; HIRAI, N.; SOBUE, N. Changes of crystallinity in wood cellulose by heat treatment under dried and moist conditions. **Journal of Wood Science**, Tóquio, v.46, p.431-436, 2000.

BHUIYAN, T. R.; HIRAI, N.; SOBUE, N. Effect of intermittent heat treatment on crystallinity in wood cellulose. **Journal of Wood Science**, Tóquio, v.47, n.5, p.336-341, 2001.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites.** New York: Van Nostrand Reinhold, 1982, 712p.

BOONSTRA, M. J.; TJEERDSMA, B. Chemical analysis of heat treated softwoods. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.64, n.3, p.204-211, 2006

BRISCHKE, C.; WELZBACHER, C. R.; RAPP, A. O. A new method for testing the abrasion resistance of thermally modified wood. In: WORKSHOP: MANAGING THE ENVIRONMENTAL RISK, 2004, Reinbeck, Germany. **Proceedings...** Reinbeck, Germany: COST ACTION E 37, 2004, 9p.

BRITO, J.O.; GARCIA, J.N.; BORTOLETTO JR, G. Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* submetida a diferentes temperaturas de termorretificação. **Cerne**, Lavras, v.12, n.2, p.182-188, 2006.

CHAUHAN, S. S.; AGGARWAL, P. Effect of moisture sorption state on transverse dimensional changes in wood. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.62, n.1, p.50-55, 2004.

COSTA, A. F. da; VALE, A. T. do; GONZALEZ, J. C.; SOUZA, F. D. Durabilidade de madeiras tratadas e não tratadas em campo de apodrecimento. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v.12, n.1, p.07-14, 2005.

DEL MENEZZI, C. H. S. **Estabilização dimensional por meio do tratamento térmico e seus efeitos sobre as propriedades de painéis de partículas orientadas (OSB)**. Curitiba, 2004. 226f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais/Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais). Universidade Federal do Paraná.

DICKSON, R.L.; RAYMOND, C.A.; JOE, W.; WILKINSON, C.A. Segregation of *Eucalyptus dunnii* logs using acoustics. **Forest Ecology and Management**, n.179, p.243-251, 2003.

DOI, S.; AOYAMA, M.; YAMAUCHI, S.; KURIMOTO, Y. Changes of decay and termite durabilities of Japanese larch (*Larix leptolepis*) wood due to high-temperature kiln drying process. **Journal of Wood Science**, Tóquio, v.51, n.5, p.526-530, 2005.

ESTEVES, B.; MARQUES, A.V.; DOMINGOS, I.; PEREIRA, H. Influence of steam heating on the properties of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulos*) wood. **Wood Science and Technology**, Berlin, v.41, n.3, p.193-207, 2007.

FERNANDES, L.; LOGUERCIO-LEITE, C.; ESPOSITO, E.; REIS, M.M. In vitro wood decay of *Eucalyptus grandis* by the basidiomycete fungus *Phellinus flavomarginatus*. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v.55, p.187-193, 2005.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Washington: US Department of Agriculture, 1999, 463p.

GALVÃO, A.P.M.; JANKOWSKY, I.P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1988. 111p.

GOMES, J. I.; FERREIRA, G. C. Durabilidade natural de quatro madeiras amazônicas em contato com o solo. **Comunicado Técnico EMBRAPA**, n.66, 3p., 2002.

GUILLEY, E.; CHARPENTIER, J. P.; AYADI, N. SNAKKERS, G.; NEPVEU, G.; CHARRIER, B. Decay resistance against *Coriolus versicolor* in Tensile oak (*Quercus petraea* Liebl.): analysis of the between-tree variability and correlation with extractives, tree growth and other basic wood properties. **Wood Science and Technology**, Berlin, v.38, p.539-554, 2004.

HAKKOU, M.; PÉTRISSANS, M.; EL BAKALI, I.; GÉRARDIN, P.; ZOULALIAN, A. Investigations of the reasons for fungal durability of heat-treated beech wood. **Polymer Degradation and Stability**, Amsterdam, v.91, n.2, p.393-397, 2006.

HAKKOU, M.; PÉTRISSANS, M.; EL BAKALI, I.; GÉRARDIN, P.; ZOULALIAN, A. Wettability changes and mass loss during heat treatment of wood. **Holzforschung**, Berlin, v.59, p.35-37, 2005a.

HAKKOU, M.; PÉTRISSANS, M.; ZOULALIAN, A.; GÉRARDIN, P. Investigations of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis. **Polymer Degradation and Stability**, Amsterdam, v.89, n.1, p.1-5, 2005b.

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

HOMAN, W.; TJEERDSMA, B.; BECKERS, E.; JORISSEN, A. Structural and other properties of modified wood. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 2000. British Columbia, Canada. **Proceedings...** British Columbia, Canada, 2000, 8p.

ISHIGURI, F.; MATSUI, M.; ANDOH, M.; YOKOTA, S.; YOSHIZAWA, M. Time-course changes of chemical and physical properties in Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) logs during smoke heating. **Wood and Fiber Science**, Madison, v.35, n.4, p.585-593, 2003.

ISHIGURI, F.; MATSUI, M.; YOKOTA, S.; YOSHIZAWA, M. Changes in the physical and chemical properties of six Japanese softwoods caused by lengthy smoke-heating treatments. **Journal of Wood Science**, Tóquio, v.51, n.2, p.161-166, 2005.

JÄMSÄ, S.; VIITANIEMI, P. Heat treatment of wood: better durability with out chemicals. In: RAPP, A.O. Review on heat treatments of wood. In: SPECIAL SEMINAR: ENVIRONMENTAL OPTIMISATION OF WOOD PROTECTION, 2001. Antibes, France. **Proceedings...** Antibes, France: COST ACTION E 22, 2001, p.21-26.

JESUS, M. A. de; MORAIS, J. W. de; ABREU, R. L. S. de; CARDIAS, M. de F. C. Durabilidade natural de 46 espécies de madeira amazônica em contato com o solo em ambiente florestal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.54, p.81-92, 1998.

JOHANSSON, D.; MORÉN, T. The potential of colour measurement for strength prediction of thermally treated wood. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.64, n.2, p.104-110, 2006.

JUODEIKIENĖ, I.; MINELGA, D. The influence of heating on wood hygroscopicity and dimensional stability. **Materials Science (Medziagotyra)**, v.9, n.2, p.209-212, 2003.

KAMDEM, D. P.; PIZZI, A.; JERMANNAUD, A. Durability of heat-treated wood. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.60, n.1, p.1-6, 2002.

KÄRENLAMPI, P. P.; TYNJÄLÄ, P.; STRÖM, P. Effect of temperature and compression on the mechanical behavior of steam-treated wood. **Journal of Wood Science**, Tóquio, v.49, n.3, p.298-304, 2003.

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

LARA PALMA, H. A.; BALLARIN, A. W. Propriedades de contração na madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L.. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.64, p.13-22, 2003.

LELIS, A. T. de; BRAZOLIN, S.; FERNANDES, J. L. G.; LOPEZ, G. A. C.; MONTEIRO, M. B. B.; ZENID, G. J. **Biodeterioração de madeiras em edificações**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2001. 54p.

LEPAGE, E. S. Química da madeira. In: LEPAGE, E. S. **Manual de preservação de madeiras**. 2. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1986. cap. 4, p.69-98.

MARTON, J. M.; FELIPE, M. das G. de A.; SILVA, J. B. de A. Avaliação de carvões ativos e das condições de adsorção no tratamento do hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana empregando planejamento de experimentos. **Revista Analytica**, São Paulo, n.3, p.45-53, 2003.

METSÄ-KORTELAJINEN, S.; ANTIKAINEN, T.; VIITANIEMI, P. The water absorption of sapwood and heartwood of Scots pines and Norway spruce heat-treated at 170°C, 190°C, 210°C and 230°C. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.64, n.3, p.192-197, 2005.

MILITZ, H.; TJEERDSMA, B. Heat treatment of wood by the PLATO-process. In: RAPP, A.O. Review on heat treatments of wood. In: SPECIAL SEMINAR: ENVIRONMENTAL OPTIMISATION OF WOOD PROTECTION, 2001. Antibes, France. **Proceedings...** Antibes, France: COST ACTION E 22, 2001, p.27-38.

MOMOHARA, I.; OHMURA, W.; KATO, H.; KUBOJIMA, Y. Effect of high-temperature treatment on wood durability against the Brown-rot fungus, *Fomitopsis palustris*, and the termite, *Coptotermes formosanus*. In: INTERNATIONAL IUFRO WOOD DRYING CONFERENCE, 2003. s.l. **Proceedings...** s.l., p.284-287.

MONTEIRO, M.B.B.; FREITAS, A.R. Método de ensaio acelerado para avaliação da durabilidade natural de madeiras. **Revista Árvore**, Viçosa, v.21, n.4, p.555-561, 1997.

MORAES, P. D.; ROGAUME, Y.; BOCQUET, J. F.; TRIBOULOT, P. Influence of temperature on the embedding strength. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.63, n.4, p.297-302, 2005.

OLIVEIRA, A. M. F.; LELIS, A.T. de; LEPAGE, E.S.; LOPEZ, G.A.C.; OLIVEIRA, L.C. de S.; CAÑEDO, M.D.; MILANO, S. Agentes destruidores da madeira. In: LEPAGE, E.S. **Manual de preservação de madeiras**. 2. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1986. cap. 5, p.99-256.

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

OLIVEIRA, J. T. S. Propriedades físicas e mecânicas da madeira. In: OLIVEIRA, J.T.S.; FIELDLER, N.C.; NOGUEIRA, M. **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro II**. Vitória: Aquárium, 2007. cap. 5, p.129-163.

OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm.. **Revista Árvore**, Viçosa, v.27, n.3, p.381-385, 2003.

PAES, J. B. Resistência natural da madeira de *Corymbia maculata* (Hook.) K. D. Hill & L. A. S. Johnson a fungos e cupins xilófagos, em condições de laboratório. **Revista Árvore**, Viçosa, v.26, n.6, p.761-767, 2002.

PAES, J. B.; MORAIS, V. de M.; LIMA, C. R. de. Resistência natural de nove madeiras do semi-árido brasileiro a fungos xilófagos em condições de laboratório. **Revista Árvore**, Viçosa, v.28, n.2, p.275-282, 2004.

PAPADOPOULOS, A. N. Pyridine-catalyst acetylation of pine wood: influence of mature sapwood vs juvenile wood. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.64, p.134-136, 2006.

POPPER, R.; NIEMZ, P.; EBERLE, G. Untersuchungen zum Sorptions- und Quellungsverhalten von thermisch behandeltem Holz. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.63, n.2, p.135-148, 2005.

RAPP, A. O. Review on heat treatments of wood. In: SPECIAL SEMINAR: ENVIRONMENTAL OPTIMISATION OF WOOD PROTECTION, 2001. Antibes, France. **Proceedings...** Antibes, France: COST ACTION E 22, 2001, 68p.

RAPP, A. O.; SAILER, M. Oil heat treatment of wood in Germany: state of the art. In: RAPP, A. O. Review on heat treatments of wood. In: SPECIAL SEMINAR: ENVIRONMENTAL OPTIMISATION OF WOOD PROTECTION, 2001. Antibes, France. **Proceedings...** Antibes, France: COST ACTION E 22, 2001, p.47-64.

REPELLIN, V.; GUYONNET, R. Evaluation of heat-treated wood swelling by differential scanning calorimetry in relation to chemical composition. **Holzforschung**, Berlin, v.59, p.28-34, 2005.

REZENDE, M. A. Retratabilidade da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e de *Eucalyptus grandis* e suas relações com a umidade e densidade. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.64, p.120-127, 2003.

RIBEIRO, F. A.; ZANI FILHO, J. Variação da densidade básica da madeira em espécies/procedências de *Eucalyptus* spp. **IPEF**, Piracicaba, n.46, p.76-85, 1993.

ROCCO, F. A. **Sobre a determinação de propriedades de elasticidade da madeira**. São Carlos, 1983. 221f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Universidade de São Paulo.

ROUSSET, P.; PERRÉ, P.; GIRARD, P. Modification of mass transfer properties in poplar wood (*P. robusta*) by thermal treatment at high temperature. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.62, n.2, p.113-119, 2004.

SANTOS, J. A. Mechanical behaviour of Eucalyptus wood modified by heat. **Wood Science and Technology**, Berlin, v.34, n.1, p.39-43, 2000.

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

SBS. **Fatos e números do Brasil florestal: 2005**. São Paulo: SBS, 2005. 105p.

SCANAVACA JR., L.; GARCIA, J. N. Determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.65, p.120-129, 2004.

SCHNIEWIND, A. P. **Concise encyclopedia of wood & wood-based materials**. 1ª ed. New York: Pergamon Press, 1989. p.271-273.

SCHWANNINGER, M.; HINTERSTOISSER, B.; GIERLINGER, N.; WIMMER, R.; HANGER, J. Application of Fourier Transform Near Infrared Spectroscopy (FT-NIR) to thermally modified wood. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.62, n.6, p.483-485, 2004.

SEVERO, E. T. D.; TOMASELLI, I. Efeito da vaporização em madeira de *Eucalyptus dunnii* sobre algumas propriedades mecânicas. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.10, n.2, p.123-133, 2000.

SILVA, D. A. da; TRUGILHO, P. F. Comportamento dimensional da madeira de cerne e alburno utilizando-se a metodologia de análise de imagem submetida a diferentes temperaturas. **Cerne**, Lavras, v.9, n.1, p.56-65, 2003.

SILVA, J. C.; OLIVEIRA, J. T. S. Avaliação das propriedades higroscópicas da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. em diferentes condições de umidade relativa do ar. **Revista Árvore**, Viçosa, v.27, n.2, p.233-239, 2003.

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

SKAAR, C. **Water in wood**. Syracuse: Syracuse University Press, 1972. 218p.

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

STAMM, A.J. Thermal degradation of wood and cellulose. **Ind. Eng. Chem.**, v.48, n.3, p.413-416, 1956.

STUART, S.A.; EVANS, R. X-ray diffraction estimation of the microfibril angle variation in eucalipt wood. **Appita**, v.48, n.3, p.197-200, 1995.

SUNDQVIST, B.; KARLSSON, O.; WESTERMARK, U. Determination of formic-acid and acetic acid concentrations formed during hydrothermal treatment of birch wood and its relation to colour, strength and hardness. **Wood Science and Technology**, Berlin, v.40, n.7, p.549-561, 2006.

SYRJÄNEN, T. Production and classification of heat treated wood in Finland. In: RAPP, A. O. Review on heat treatments of wood. In: SPECIAL SEMINAR: ENVIRONMENTAL OPTIMISATION OF WOOD PROTECTION, 2001. Antibes, France. **Proceedings...** Antibes, France: COST ACTION E 22, 2001, p.11-20.

THIAM, M.; MILOTA, M. R.; LEICHTI, R. J. Effect of high-temperature drying on bending and shear strengths of Western Hemlock lumber. **Forest Products Journal**, Madison, v.52, n.4, p.64-68, 2002.

TJEERDSMA, B.F. Heat treatment of wood: thermal modification. In: SEMINAR WOOD MODIFICATION, 2006. Limerick, Ireland. **Proceedings...** Limerick, Ireland. COFORD, 2006, s.p.

TJEERDSMA, B. F.; MILITZ, H. Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.63, n.2, p.102-111, 2005.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M.; SILVA, J. R. M. da. Variação dimensional acima e abaixo da umidade de saturação das fibras da madeira de Eucalipto. In: CONFERENCIA INTERNACIONAL SOBRE SILVICULTURA E MELHORAMENTO GENETICO DE EUCALIPTOS, 1997. Salvador, Brasil. **Proceedings...** Curitiba, Brasil: EMBRAPA, 1997. v.3, p. 393-400.

UNSAL, O.; AYRILMIS, N. The effect of steaming on equilibrium moisture content in beech wood (*Fagus orientalis* Lipsky). **Forest Products Journal**, Madison, v.54, n.6, p.90-93, 2004.

UNSAL, O; AYRILMIS, N. Variations in compression strength and surface roughness of heat-treated Turkish river red gum (*Eucalyptus camaldulensis*) wood. **Journal Wood Science**, Tóquio, v.51, n.4, p.405-409, 2005.

VERNOIS, M. Heat treatment of wood in France: state of the art. In: RAPP, A.O. Review on heat treatments of wood. In: SPECIAL SEMINAR: ENVIRONMENTAL OPTIMISATION OF WOOD PROTECTION, 2001. Antibes, France. **Proceedings...** Antibes, France: COST ACTION E 22, 2001, p.39-46.

VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M. Efeito do aquecimento na estabilidade dimensional e na higroscopicidade da madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, v.6, n.2, p.150-161, 1982.

VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M.; EUCLIDES, R. F. Efeito do aquecimento em algumas propriedades da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Revista Árvore**, Viçosa, v.7, n.2, p.136-146, 1983.

WASKETT, P.; SELMES, R. E. Opportunities for UK grown timber: wood modification state of the art review. **Building Research Establishment LTD**, proj. n° 203-343. 2001, 83p.

WEILAND, J. J.; GUYONNET, R. Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy. **Holz als Roh-Werkstoff**, Berlin, v.61, n.2, p.216-220, 2003.

WIKBERG, H.; MAUNU, S. L. Characterization of thermally modified hard- and softwoods by ^{13}C CPMAS NMR. **Carbohydrate Polymers**, v.58, p.461-466, 2004.

YILGOR, N.; UNSAL, O.; KARTAL, S. N. Physical, mechanical, and chemical properties of steamed beech wood. **Forest Products Journal**, Madison, v.51, n.11/12, p.89-93, 2001.

ZAMAN, A.; ALÉN, R.; KOTILAINEN, R. Thermal behavior of Scots pine (*Pinus sylvestris*) and silver birch (*Betula pendula*) at 200-230°C. **Wood and Fiber Science**, Madison, v.32, n.2, p.138-143, 2000.

ZOBEL, B. J.; Van BUIJTENEN, J. P. **Wood variation: its causes and control**. New York: Springer-Verlag, 1989. 363p.

APÊNDICE 1

TESTE PRELIMINAR PARA ESTABELECER O TEMPO ADOTADO NA
TERMORRETIFICAÇÃO DA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis*.

Metodologia utilizada no teste preliminar

Para auxiliar na definição do tempo de termorretificação a ser utilizado no material definitivo da tese foram realizados os testes preliminares com lotes de tábuas centrais (aquelas que continham a medula) de *Eucalyptus grandis*.

Nos estudos preliminares foi utilizado material proveniente de toras de 2,9 m de comprimento, com massa específica aparente básica de $0,600 \text{ g/cm}^3$ e com diâmetro médio de 30 a 35 cm, retiradas de árvores com 30 anos de idade oriundas na Floresta Estadual de Santa Bárbara, pertencente ao Instituto Florestal do Estado de São Paulo.

O material foi processado conforme metodologia citada no item 4.1 do corpo principal da tese. Posteriormente, todas as tábuas, com 28 mm de espessura e previamente secas, foram cortadas em peças menores com 0,50 m de comprimento, sendo que foram descartadas as regiões com rachaduras e nós e o material contido até 30 cm das extremidades.

O material foi colocado em estufa elétrica com controlador programável por patamares de tempo e de temperatura, desde uma temperatura inicial de 100°C e com uma taxa de elevação de temperatura de $1,34^\circ\text{C}$ até um conjunto de temperaturas finais correspondentes à 180°C e 200°C , por um período de 2,5, 3,0 e 4,0 horas.

Após as termorretificações, a estufa foi desligada e as peças de madeira permaneceram no seu interior em resfriamento natural até atingirem cerca de 30°C .

Todas as tábuas de *Eucalyptus grandis* tiveram as suas espessuras mensuradas em pontos pré-determinados conforme metodologia adotada no item 4.3 do corpo principal da tese. Essas medições foram realizadas antes e após as termorretificações com 200°C de temperatura durante 4 horas, com 200°C de temperatura durante 3 horas e/ou com 180°C de temperatura por um período de 2,5 horas.

Resultados do teste preliminar

Verifica-se, pela Tabela 1-1, que nos tratamentos com maiores condições de tempo e de temperatura houve um aumento médio da espessura das tábuas entre 0,698 mm e 0,874 mm. Verificou-se, através de cortes ao longo da espessura das peças de

madeira, que todo o lote do material termorretificado a 200°C durante 3 a 4 horas apresentou rachaduras internas, e consequentemente, aumento nas suas espessuras (veja a Figura 1-1).

Para a madeira estudada nos testes preliminares, verifica-se que as condições mais severas de tempo e de temperatura provocaram rachaduras internas nas peças de madeira conforme salientado por Rousset et al. (2004).

Somente a madeira de *Eucalyptus grandis*, com 30 anos e massa específica básica de 0,600 g/cm³, quando termorretificada com temperatura de 180°C e durante um período de 2,5 horas é que apresentou uma redução na espessura média das suas peças em torno de 0,177 mm. Após a realização de cortes ao longo dessas peças ficou constatada a ausência de rachaduras internas visíveis.

Tabela 1-1: Efeito da condição da termorretificação na variação da espessura das tábuas de *Eucalyptus grandis*, com 30 anos de idade e massa específica básica de 0,600 g/cm³.

Termorretificação		Variação da espessura da tábua		
Temperatura (°C)	Tempo (h)	N	Δe Média (mm)	Tukey
200	4,0	10	0,698	a
200	3,0	16	0,874	a
180	2,5	14	-0,177	b

sendo: N - número de repetições; Δe média - diferença média da espessura das tábuas; letras diferentes - indicam diferença significativa ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.



Figura 1-1: Rachaduras internas ao longo das tábuas de *Eucalyptus grandis* termorretificadas com temperaturas de 200°C durante 3 horas.

APÊNDICE 2

ANÁLISE DE REGRESSÃO DA PERDA DE MASSA DAS TÁBUAS DE *Eucalyptus grandis* EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE TERMORRETIFICAÇÃO.

Apêndice 2-1: Análise de regressão da perda de massa das tábuas de *Eucalyptus grandis* em função da temperatura de termorretificação.

$$Y = A_1 * e^{(X/T_1) + Y_0}$$

N = 40

$R^2 = 0,92751$

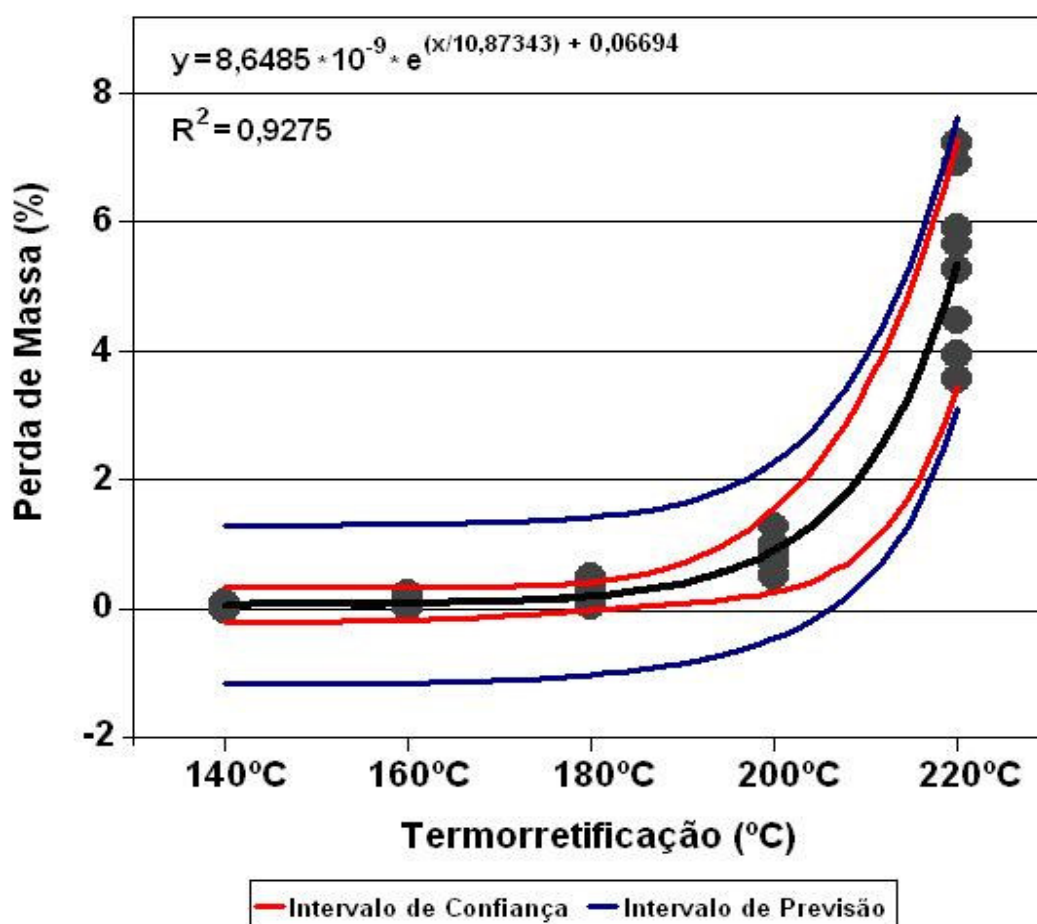
P-valor < 0,0001

$\chi^2 = 0,35224$

Variável	Coeficientes	Erro padrão	Intervalo de Confiança com 95% de probabilidade	
Y_0	0,06694	$\pm 0,13974$	-0,21629	0,35017
A_1	$8,6485 \cdot 10^{-9}$	$\pm 2,9038 \cdot 10^{-8}$	---	---
T_1	10,87343	$\pm 1,79837$	7,22957	14,51728

sendo: Y - Perda de massa, %; X - Temperatura usada na termorretificação das tábuas, °C; Y_0 , A_1 e T_1 - Coeficientes do modelo de regressão.

Curva de regressão representando a perda de massa das tábuas de *Eucalyptus grandis* em função da temperatura de termorretificação.



APÊNDICE 3

ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS E ANÁLISE ESTATÍSTICA NÃO
PARAMÉTRICA PARA A VARIAÇÃO DA ESPESSURA DAS TÁBUAS DE *Eucalyptus*
grandis EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE TERMORRETIFICAÇÃO.

Tabela 3-1: Análise exploratória dos dados de perda na espessura das tábuas durante a sua termorretrificação.

Perda de espessura na:	N	Média	Mediana	Desvio Padrão	Coef. Var. %	Teste Normalidade (p-Valor)		
						Kolmogorov Smirnov	D'Agostino Skewness	D'Agostino Kurtosis
Madeira Juvenil	400	-0,650	-0,610	0,2521	41,32	0	0	0
Madeira Adulta	400	-0,533	-0,560	0,3324	59,36	0	0	0

Tabela 3-2: Teste de Kruskal-Wallis para a variável perda na espessura, na região próxima à medula das tábuas, segundo os tratamentos de termorretrificação.

Tratamento	N	Percentís		Mediana	Média	p-Valor
		25%	75%			
140°C	81	-0,535	-0,423	-0,482	-0,483	<0,001
160°C	81	-0,631	-0,497	-0,566	-0,559	
180°C	81	-0,664	-0,541	-0,590	-0,588	
200°C	81	-0,774	-0,593	-0,680	-0,674	
220°C	76	-1,158	-0,744	-0,973	-0,964	

Tabela 3-3: Teste de comparação de medianas de Dunn's para a variável perda na espessura, na região próxima à medula das tábuas, segundo os tratamentos de termorretrificação.

Tratamento	N	Mediana	Média	C.V. (%)	Teste Dunn's
140°C	81	-0,482	-0,483	21,11	A
160°C	81	-0,566	-0,559	18,96	B
180°C	81	-0,590	-0,588	19,56	B
200°C	81	-0,680	-0,674	28,64	C
220°C	76	-0,973	-0,964	35,47	D

Tabela 3-4: Teste de Kruskal-Wallis para a variável perda na espessura, na região próxima à periferia das tábuas, segundo os tratamentos de termorretrificação.

Tratamento	N	Percentís		Mediana	Média	p-Valor
		25%	75%			
140°C	81	-0,545	-0,436	-0,486	-0,487	<0,001
160°C	81	-0,628	-0,479	-0,565	-0,547	
180°C	81	-0,674	-0,471	-0,600	-0,541	
200°C	81	-0,742	-0,326	-0,667	-0,513	
220°C	76	-1,001	-0,216	-0,688	-0,577	

Tabela 3-5: Teste de comparação de medianas de Dunn's para a variável perda na espessura, na região próxima à periferia das tábuas, segundo os tratamentos de termorretrificação.

Tratamento	N	Mediana	Média	C.V. (%)	Teste Dunn's
140°C	81	-0,486	-0,487	18,52	A
160°C	81	-0,565	-0,547	23,03	AB
180°C	81	-0,600	-0,541	44,92	B
200°C	81	-0,667	-0,513	67,64	B
220°C	76	-0,688	-0,577	104,33	B

APÊNDICE 4

ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS PARA AS VARIÁVEIS DAS
PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E RESISTÊNCIA DA MADEIRA A FUNGOS.

Tabela 4-1: Análise estatística básica dos dados das variáveis de propriedades físicas das madeiras de *Eucalyptus grandis*.

Propriedade Física da Madeira	N	Média	Mediana	Desvio Padrão
ρ 0%	570	0,458	0,454	0,0345
ρ 12,0% (21°C-65%UR)	570	0,477	0,473	0,0363
ρ 17,5% (23°C-83%UR)	570	0,485	0,482	0,0364
ρ básica	570	0,411	0,409	0,0267
TUE 12,0% (21°C-65%UR)	570	7,4	7,9	1,4
TUE 17,5% (23°C-83% UR)	570	11,0	11,6	2,0
Incha. Volum. a 12,0%TUE	570	3,10	3,22	0,82
Incha. Long. a 12,0%TUE	570	0,126	0,127	0,0480
Incha. Radial a 12,0%TUE	570	1,16	1,19	0,27
Incha. Tangen. a 12,0%TUE	570	1,79	1,83	0,52
Incha. Volum. a 17,5%TUE	570	4,74	4,83	1,24
Incha. Long. a 17,5%TUE	570	0,148	0,150	0,0574
Incha. Radial a 17,5%TUE	570	1,65	1,67	0,39
Incha. Tangen. a 17,5%TUE	570	2,88	2,93	0,83
Incha. Volum. Máximo	570	11,53	11,76	0,26
Incha. Long. Máximo	570	0,250	0,250	0,103
Incha. Radial Máximo	570	3,48	3,56	0,72
Incha. Tangen. Máximo	570	7,51	7,61	1,92
Fator anisotrópico a 12,0%TUE	570	1,53	1,52	0,24
Fator anisotrópico a 17,5%TUE	570	1,74	1,73	0,30
Fator anisotrópico Máxima	570	2,18	2,15	0,51
Q Longitudinal 12,0%	570	0,0167	0,0167	0,00469
Q Radial 12,0%	570	0,156	0,155	0,0171
Q Tangencial 12,0%	570	0,237	0,234	0,0337

Tabela 4-2: Análise estatística básica dos dados das variáveis de resistência das madeiras de *Eucalyptus grandis* ao fungo *Picnoporus sanguineus*.

Resistência da Madeira a Fungos	N	Média	Mediana	Desvio Padrão
TUE dos c.p. antes do ensaio “agar-block”	126	7,5	7,8	1,6
TUE dos c.p. depois do ensaio “agar-block”	126	155,1	158,2	37,3
Perda de Massa no ensaio de “agar-block”	126	12,38	13,00	5,74
TUE dos c.p. antes do ensaio “soil-block”	126	7,5	7,9	1,6
TUE dos c.p. depois do ensaio “soil-block”	126	212,16	221,63	57,65
Perda de Massa no ensaio de “soil-block”	126	26,481	28,340	12,501

Tabela 4-3: Análise estatística básica dos dados das variáveis de propriedades mecânicas das madeiras de *Eucalyptus grandis*.

Propriedade Mecânica da Madeira	N	Média	Mediana	Desvio Padrão
Dureza Janka (MPa)	114	17,9	17,5	3,2
TUE em Dureza Janka (%)	114	9,6	10,3	2,4
Resistência em Compressão (MPa)	114	40,5	40,8	4,2
Rigidez em Compressão (MPa)	114	12316	11698	2268
TUE em Compressão (%)	114	9,1	9,8	2,4
Resistência em Flexão (MPa)	106	55,3	59,8	17,6
Rigidez em Flexão (MPa)	106	10754	10838	1231
TUE em Flexão (%)	106	8,5	9,0	2,2

Figura 4-1: Histograma com a frequência dos dados de massa específica a 0% e o seu gráfico de probabilidade normal.

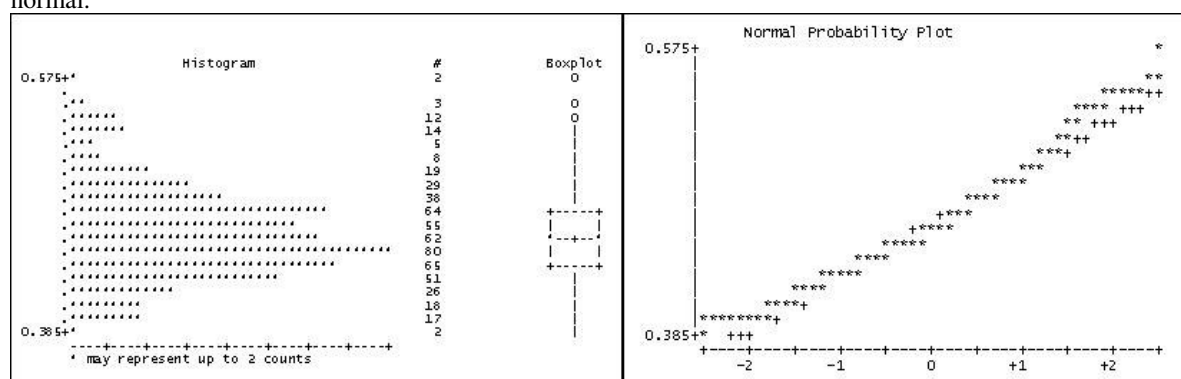


Figura 4-2: Histograma com a frequência dos dados de massa específica na condição de 21°C-65%UR e o seu gráfico de probabilidade normal.

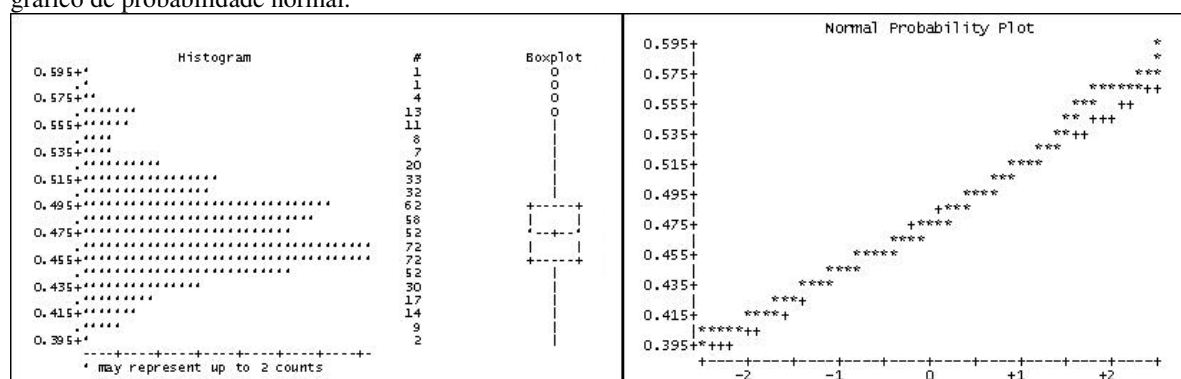


Figura 4-3: Histograma com a frequência dos dados de massa específica na condição de 23°C-83%UR e o seu gráfico de probabilidade normal.

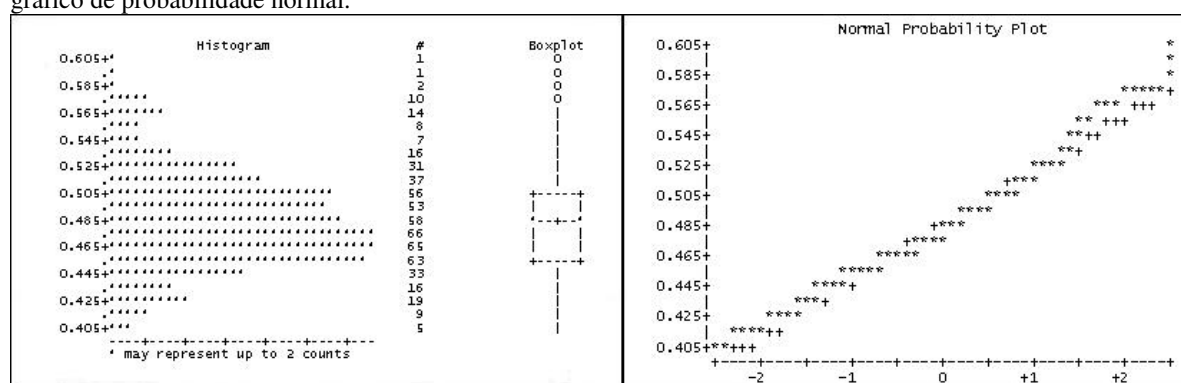


Figura 4-4: Histograma com a frequência dos dados de massa específica básica e o seu gráfico de probabilidade normal.

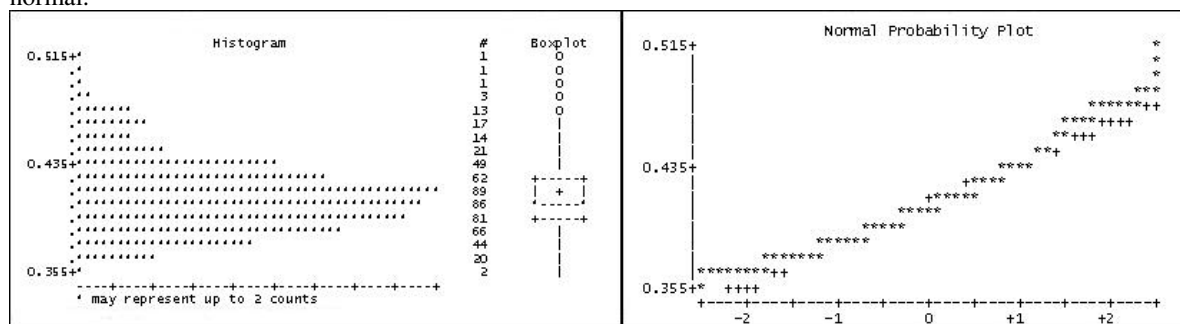


Figura 4-5: Histograma com a frequência dos dados de teor de umidade de equilíbrio na condição de 21°C-65%UR e o seu gráfico de probabilidade normal.

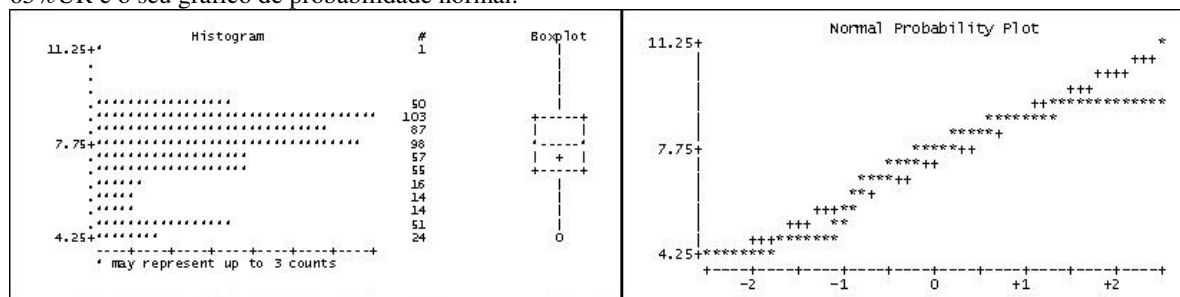


Figura 4-6: Histograma com a frequência dos dados de teor de umidade de equilíbrio na condição de 23°C-83%UR e o seu gráfico de probabilidade normal.

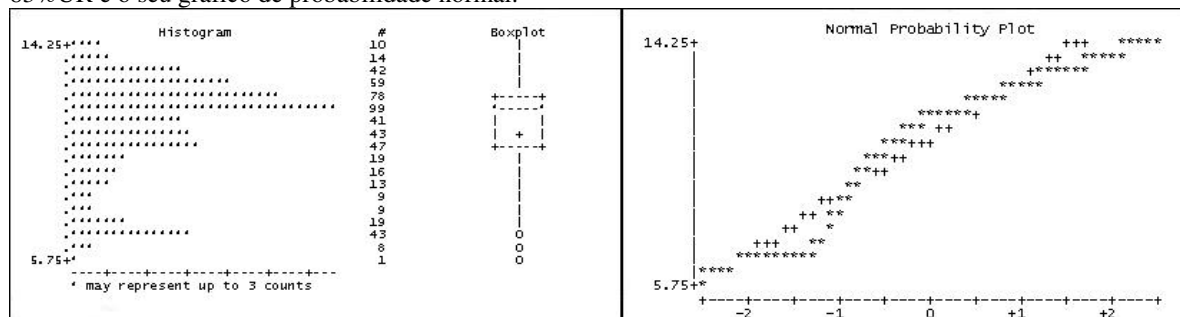


Figura 4-7: Histograma com a frequência dos dados de inchamento volumétrico na condição de 21°C-65%UR e o seu gráfico de probabilidade normal.

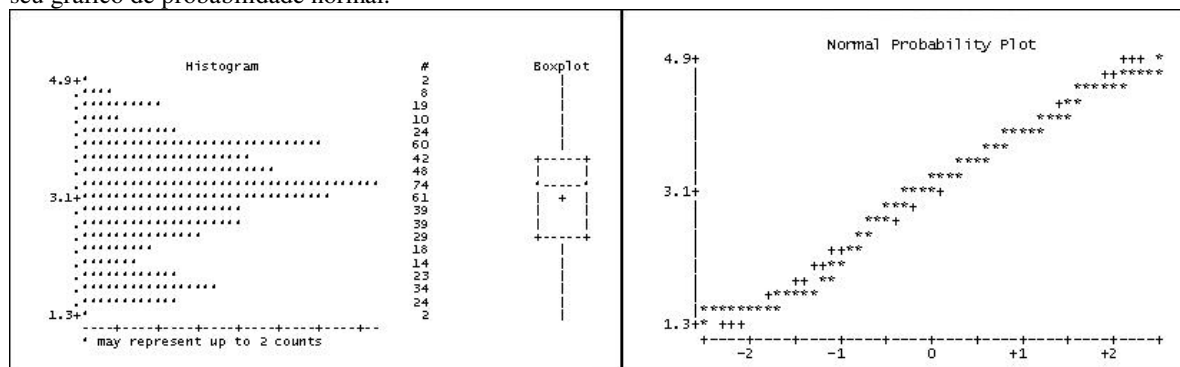


Figura 4-8: Histograma com a frequência dos dados de inchamento linear longitudinal na condição de 21°C-65%UR e o seu gráfico de probabilidade normal.

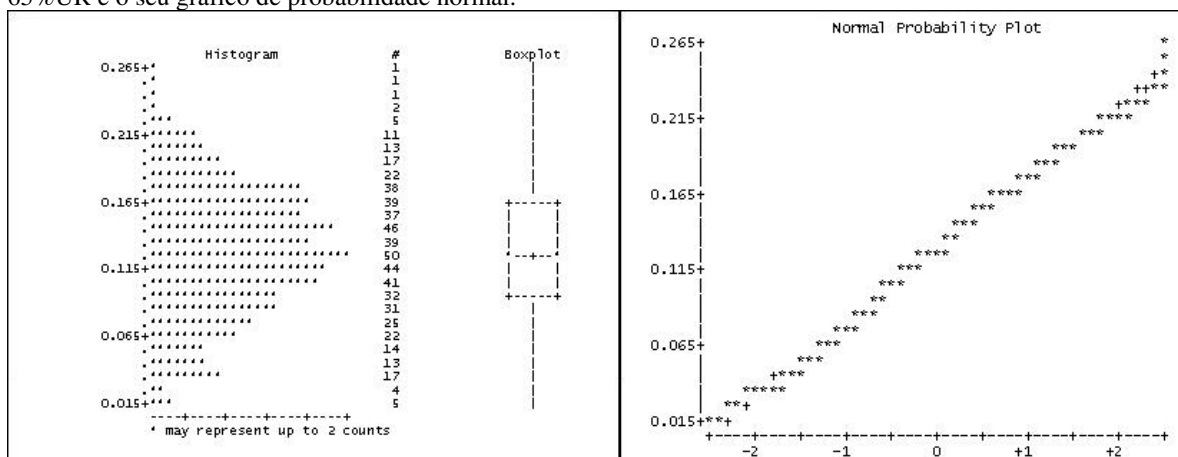


Figura 4-9: Histograma com a frequência dos dados de inchamento linear radial na condição de 21°C-65%UR e o seu gráfico de probabilidade normal.

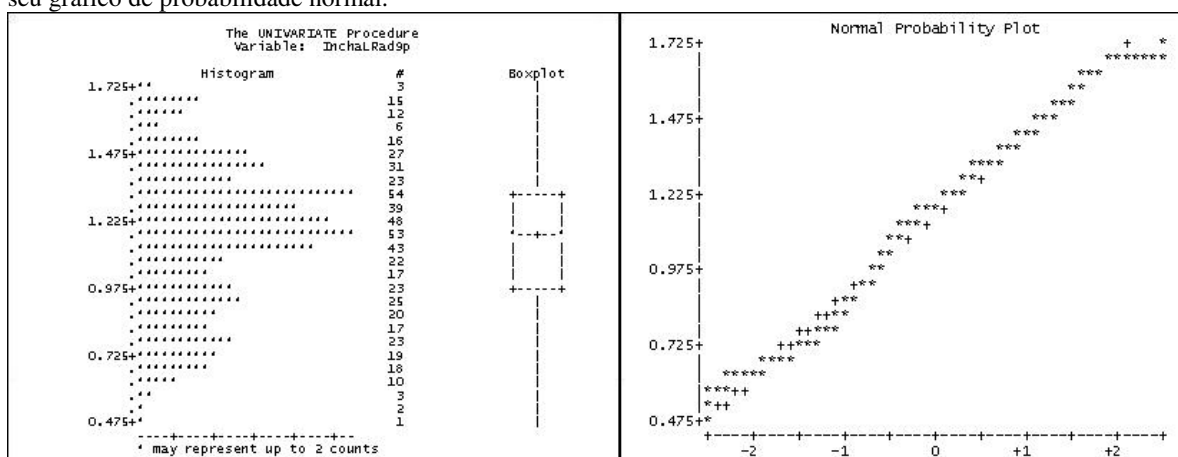


Figura 4-10: Histograma com a frequência dos dados de inchamento linear tangencial na condição de 21°C-65%UR e o seu gráfico de probabilidade normal.

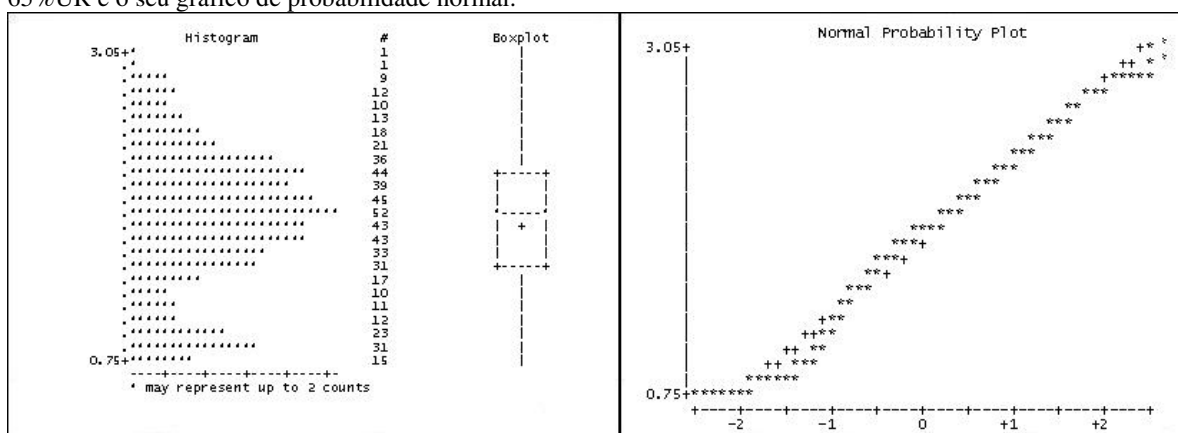


Figura 4-11: Histograma com a frequência dos dados de inchamento volumétrico na condição de 23°C-83%UR e o seu gráfico de probabilidade normal.

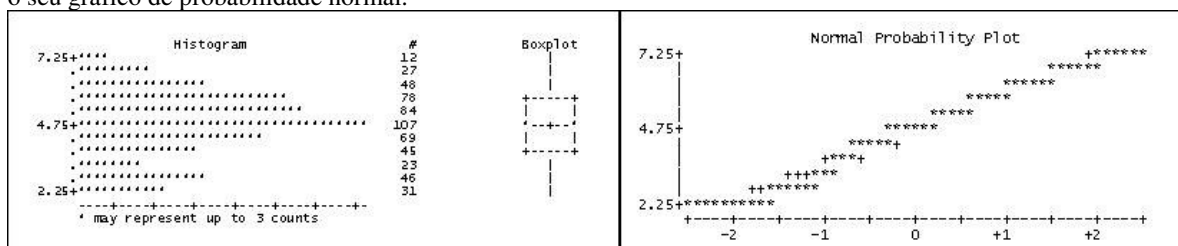


Figura 4-12: Histograma com a frequência dos dados de inchamento linear longitudinal na condição de 23°C-83%UR e o seu gráfico de probabilidade normal.

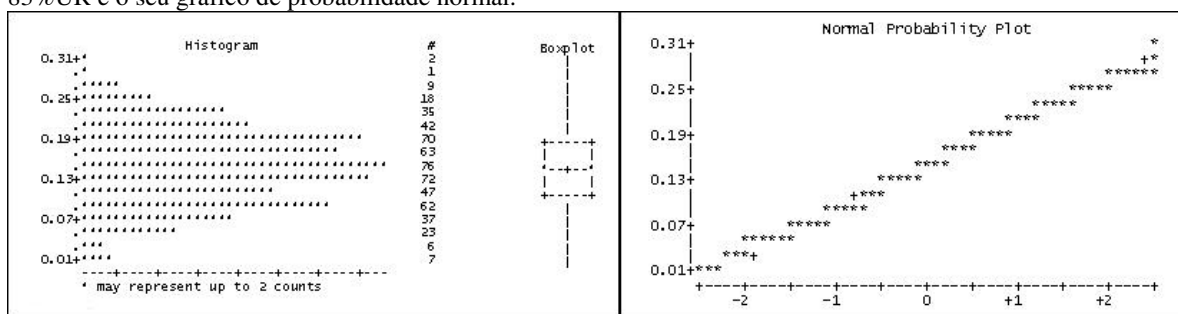


Figura 4-13: Histograma com a frequência dos dados de inchamento linear radial na condição de 23°C-83%UR e o seu gráfico de probabilidade normal.

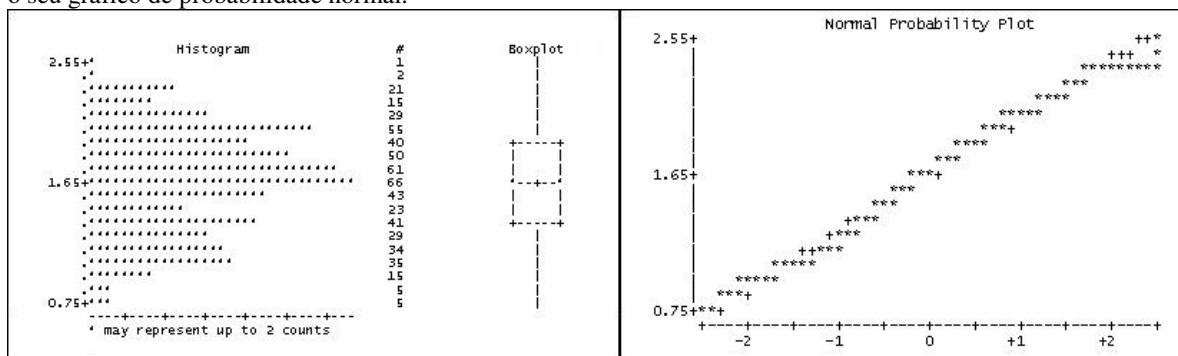


Figura 4-14: Histograma com a frequência dos dados de inchamento linear tangencial na condição de 23°C-83%UR e o seu gráfico de probabilidade normal.

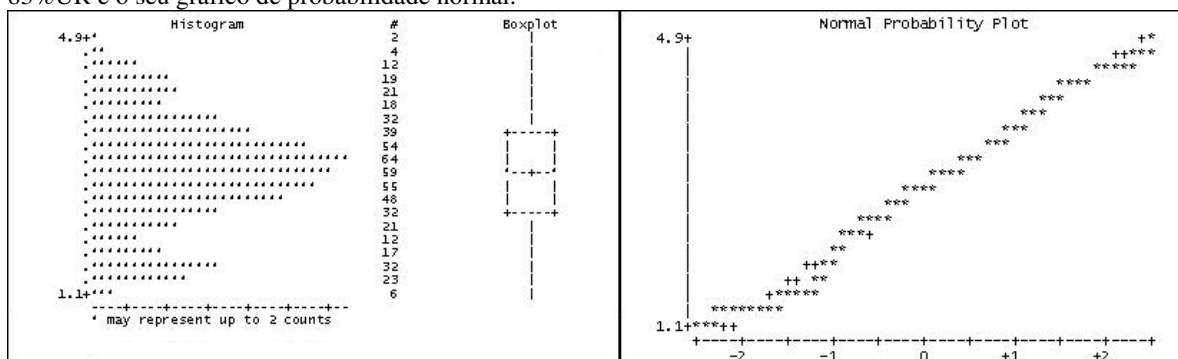


Figura 4-15: Histograma com a frequência dos dados de inchamento volumétrico máximo e o seu gráfico de probabilidade normal.

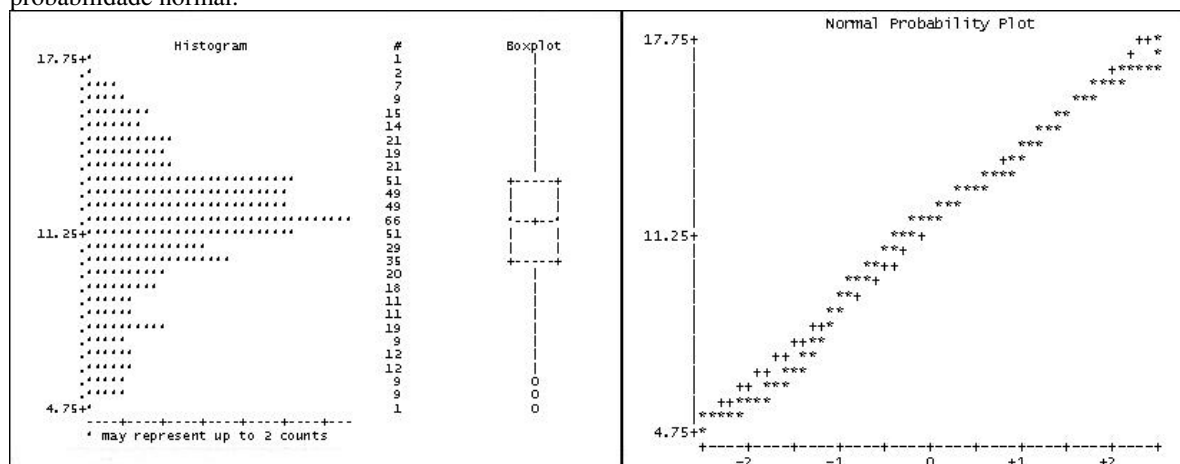


Figura 4-16: Histograma com a frequência dos dados de inchamento linear longitudinal máximo e o seu gráfico de probabilidade normal.

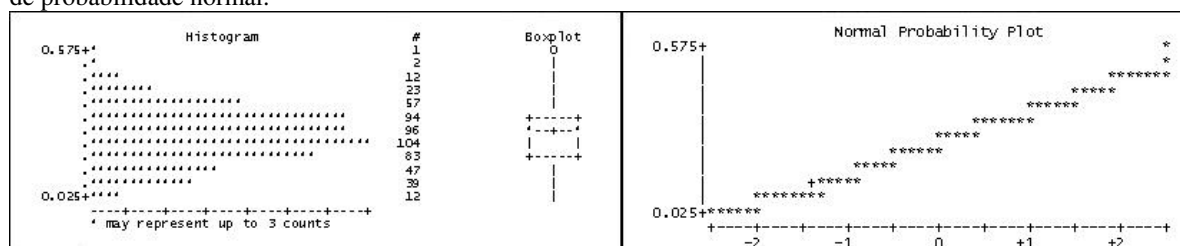


Figura 4-17: Histograma com a frequência dos dados de inchamento linear radial máximo e o seu gráfico de probabilidade normal.

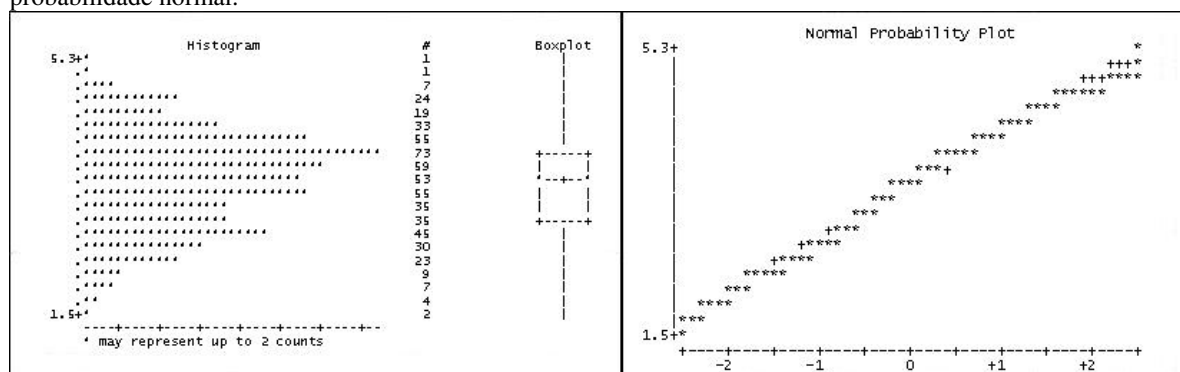


Figura 4-18: Histograma com a frequência dos dados de inchamento linear tangencial máximo e o seu gráfico de probabilidade normal.

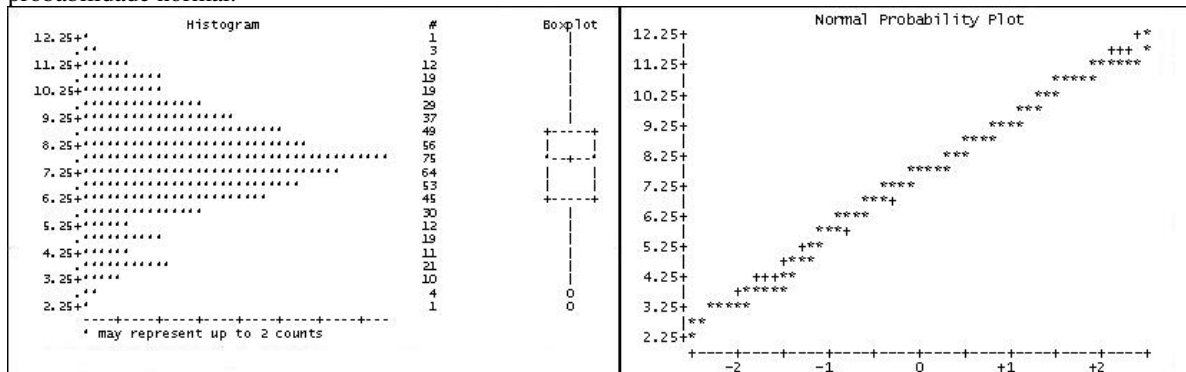


Figura 4-19: Histograma com a frequência dos dados do Fator anisotrópico na condição de 12,0% de TUE e o seu gráfico de probabilidade normal.

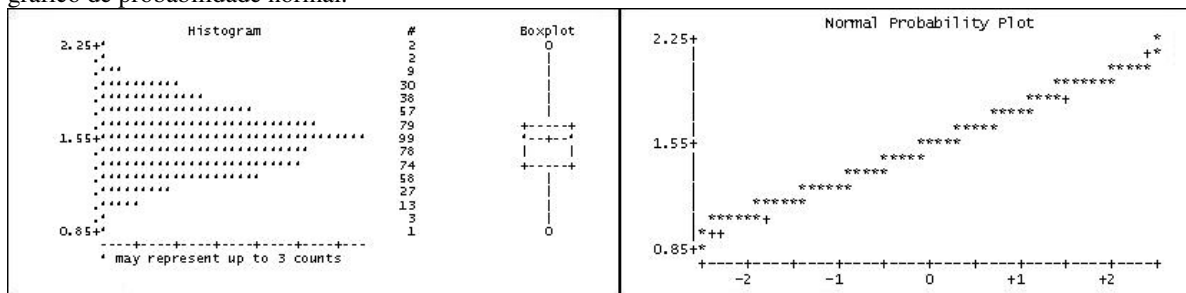


Figura 4-20: Histograma com a frequência dos dados do Fator anisotrópico na condição de 17,5% de TUE e o seu gráfico de probabilidade normal.

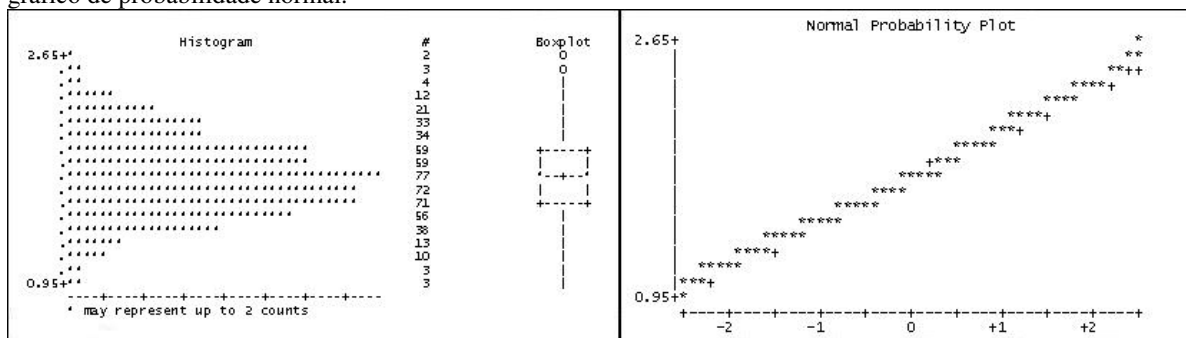


Figura 4-21: Histograma com a frequência dos dados do Fator anisotrópico máximo e o seu gráfico de probabilidade normal.

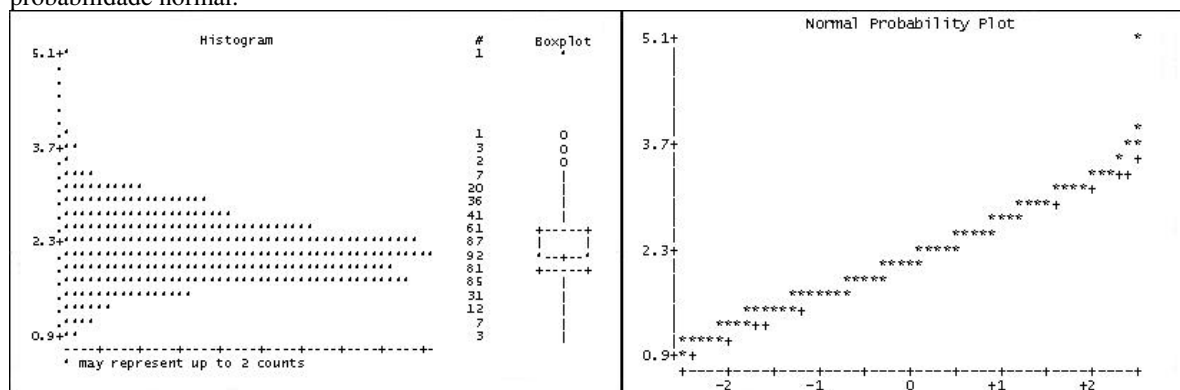


Figura 4-22: Histograma com a frequência dos dados de coeficiente de retratibilidade linear longitudinal e o seu gráfico de probabilidade normal.

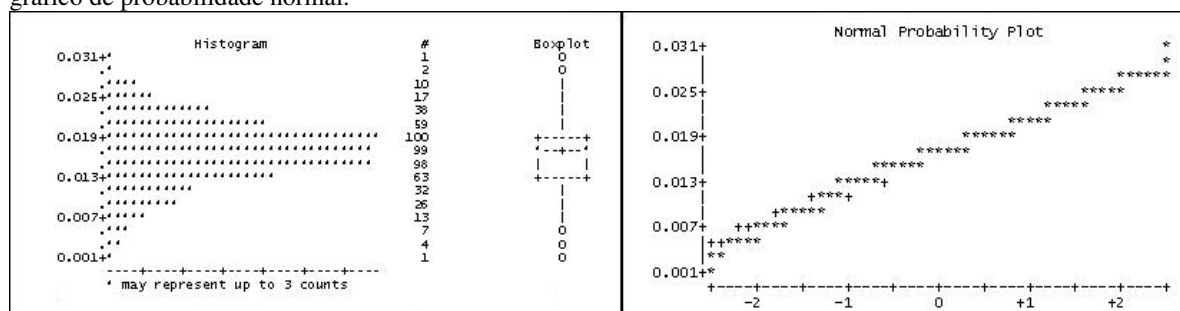


Figura 4-23: Histograma com a frequência dos dados de coeficiente de retratibilidade linear radial e o seu gráfico de probabilidade normal.

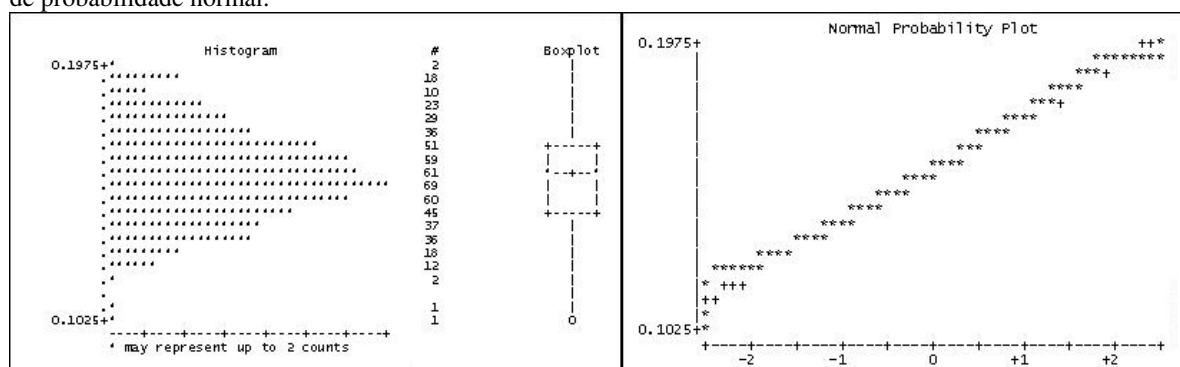


Figura 4-24: Histograma com a frequência dos dados de coeficiente de retratibilidade linear tangencial e o seu gráfico de probabilidade normal.

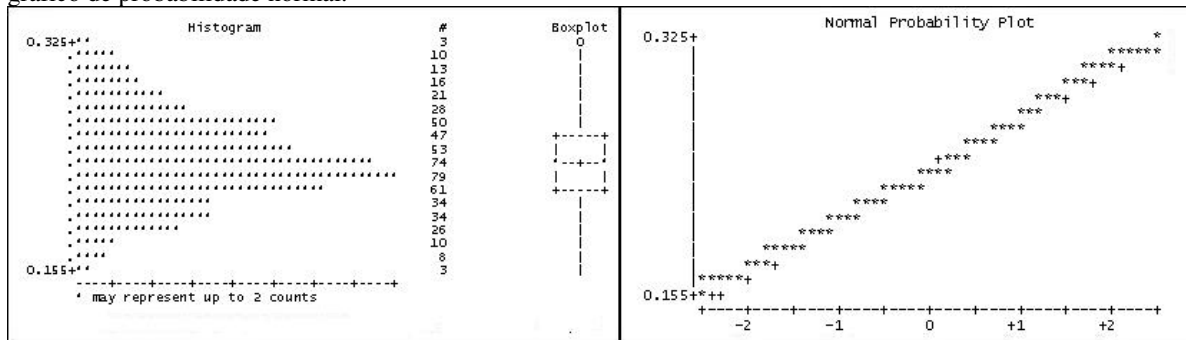


Figura 4-25: Histograma com a frequência dos dados de teor de umidade de equilíbrio dos corpos-de-prova antes do ensaio “agar-block” e o seu gráfico de probabilidade normal.

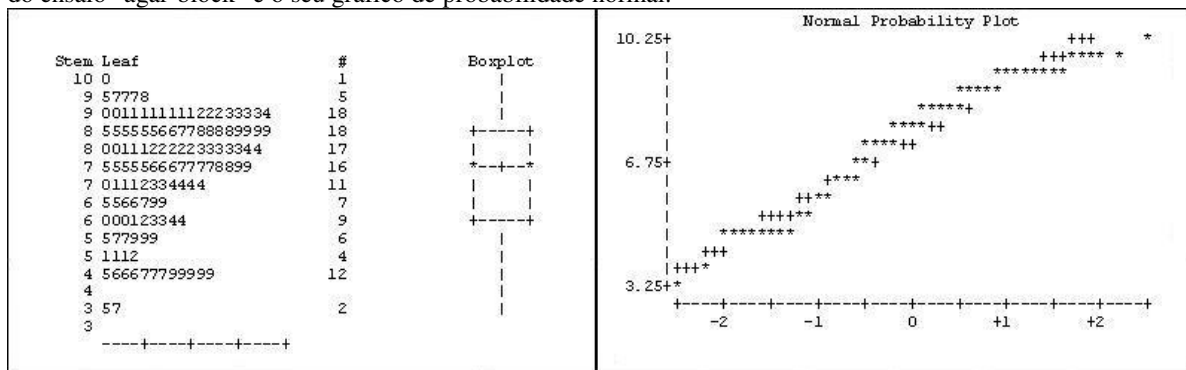


Figura 4-26: Histograma com a frequência dos dados de teor de umidade de equilíbrio dos corpos-de-prova depois do ensaio “agar-block” e o seu gráfico de probabilidade normal.

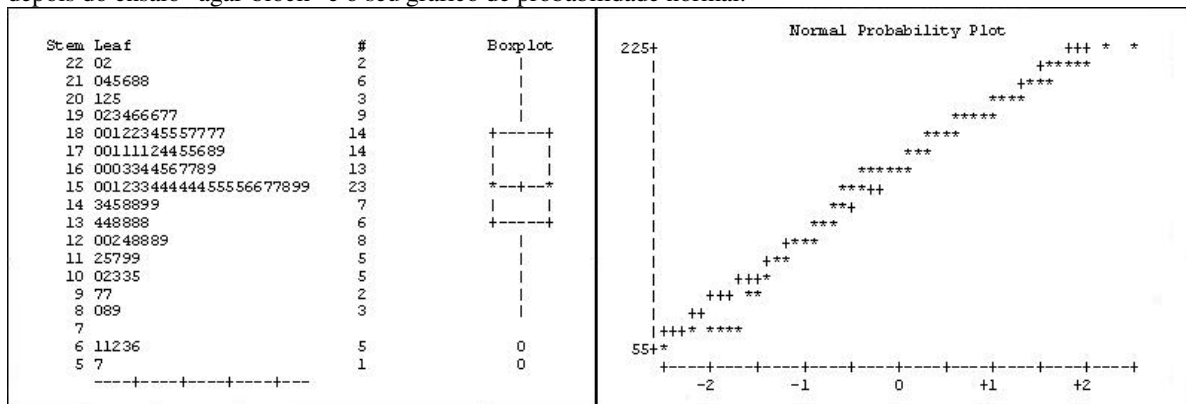


Figura 4-27: Histograma com a frequência dos dados de perda de massa dos corpos-de-prova no ensaio “agar-block” e o seu gráfico de probabilidade normal.

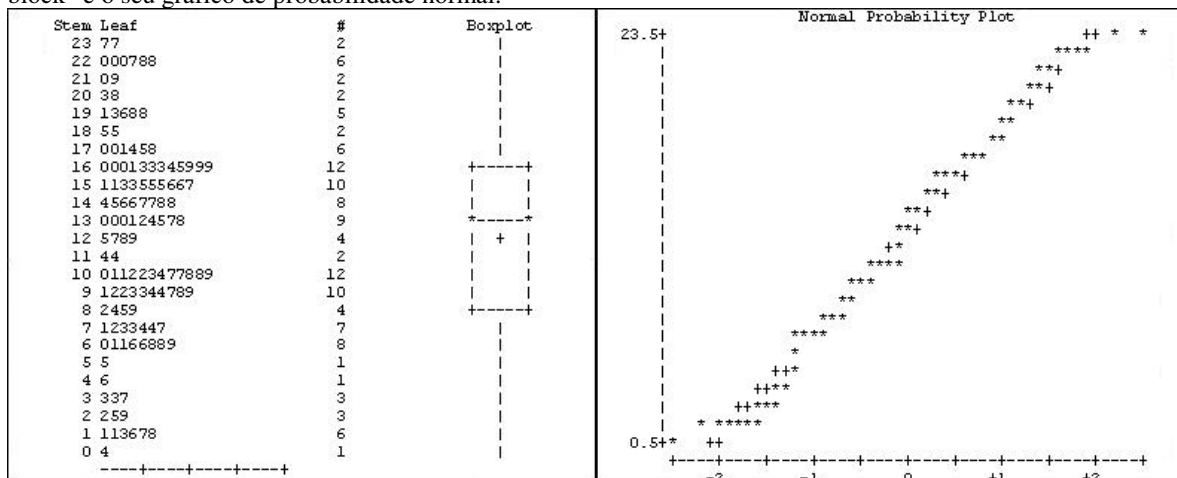


Figura 4-28: Histograma com a frequência dos dados de teor de umidade de equilíbrio dos corpos-de-prova antes do ensaio “soil-block” e o seu gráfico de probabilidade normal.

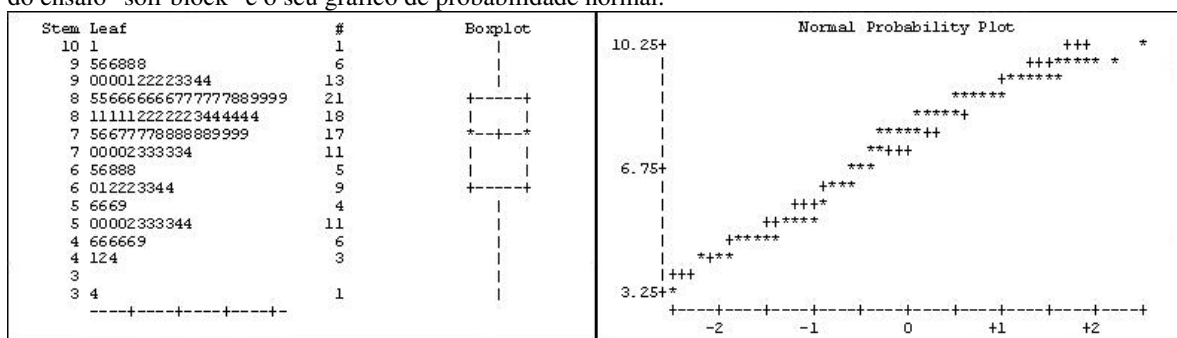


Figura 4-29: Histograma com a frequência dos dados de teor de umidade de equilíbrio dos corpos-de-prova depois do ensaio “soil-block” e o seu gráfico de probabilidade normal.

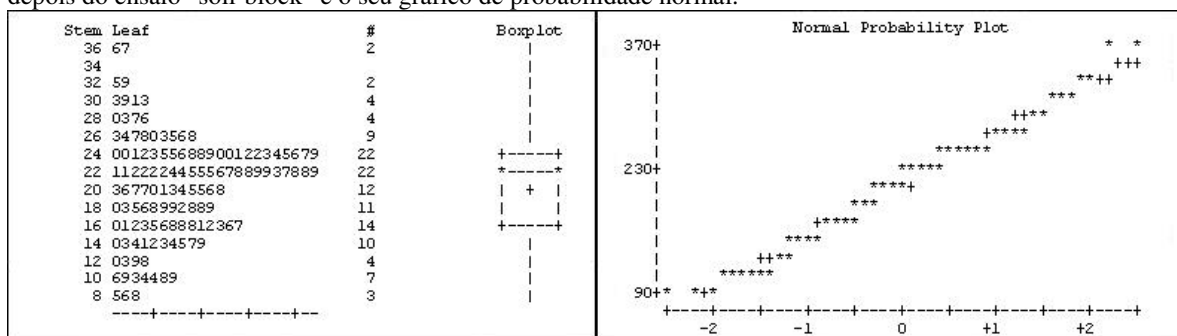


Figura 4-30: Histograma com a frequência dos dados de perda de massa dos corpos-de-prova no ensaio “soil-block” e o seu gráfico de probabilidade normal.

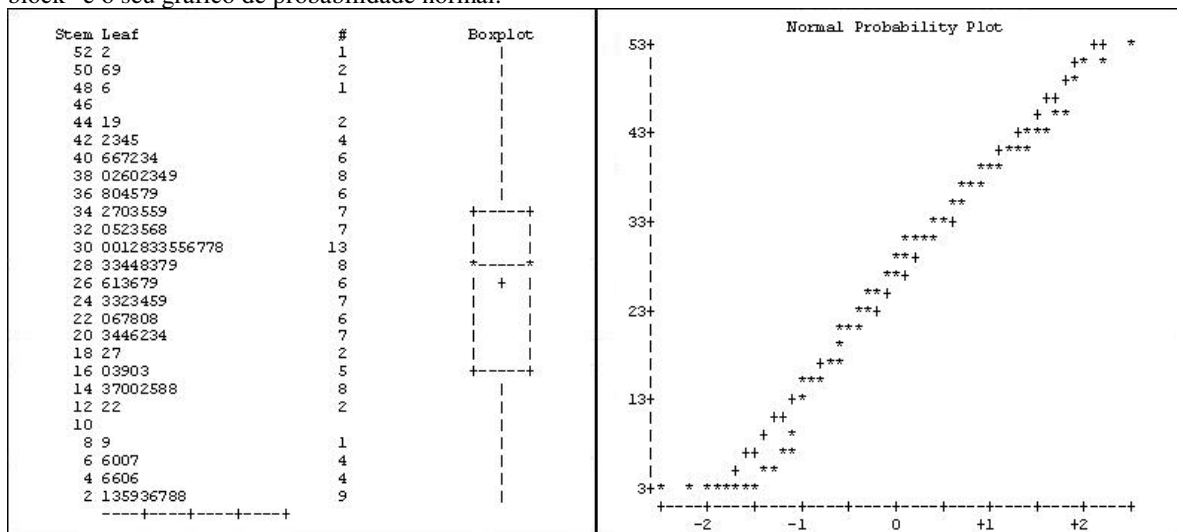


Figura 4-31: Histograma com a frequência dos dados de dureza Janka e o seu gráfico de probabilidade normal.

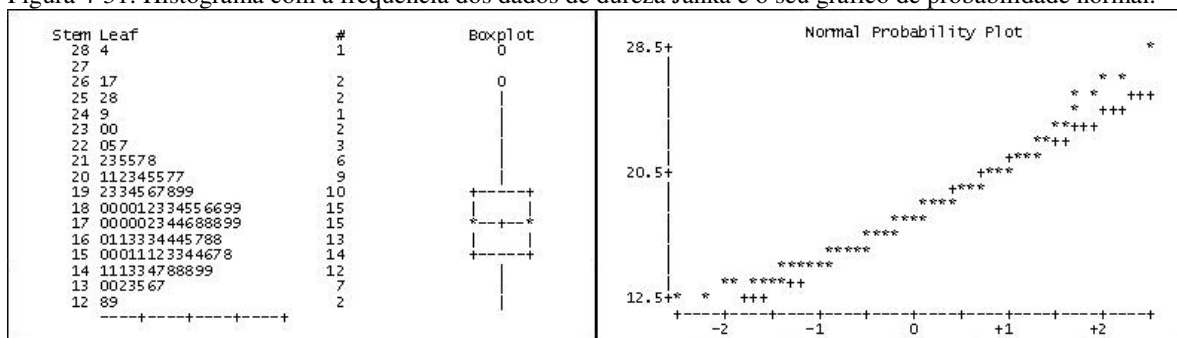


Figura 4-32: Histograma com a frequência dos dados de teor de umidade dos corpos-de-prova no ensaio de dureza Janka e o o seu gráfico de probabilidade normal.

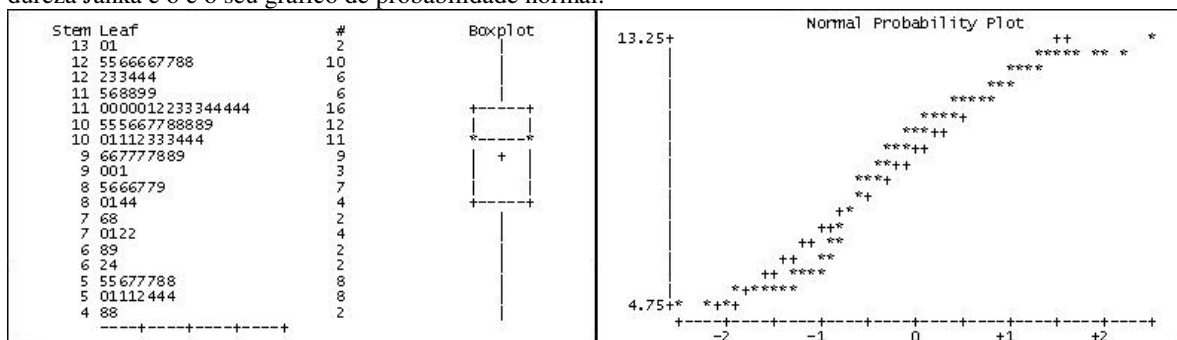


Figura 4-33: Histograma com a frequência dos dados de resistência em compressão paralela às fibras e o e o seu gráfico de probabilidade normal.

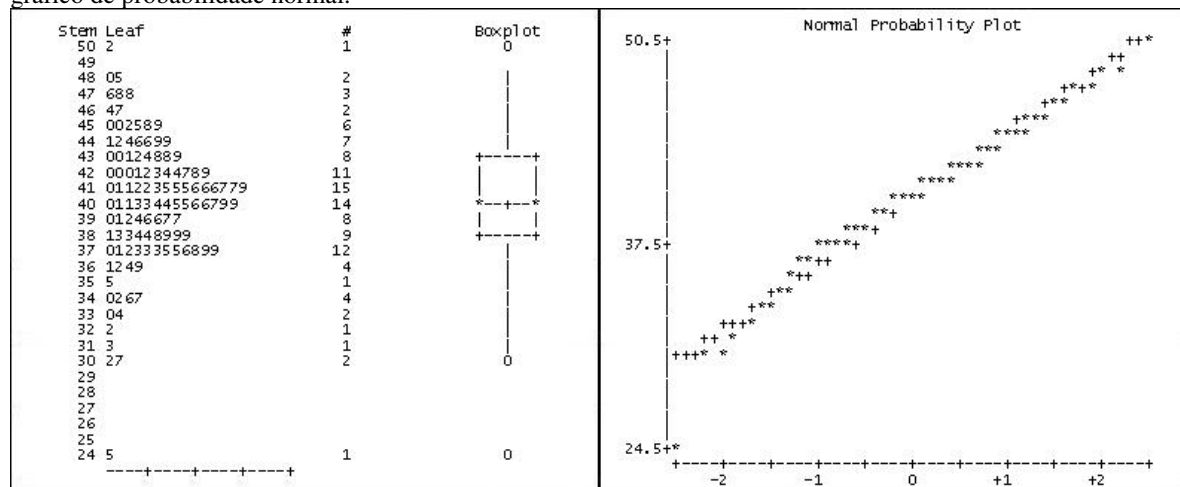


Figura 4-34: Histograma com a frequência dos dados de rigidez em compressão paralela às fibras e o e o seu gráfico de probabilidade normal.

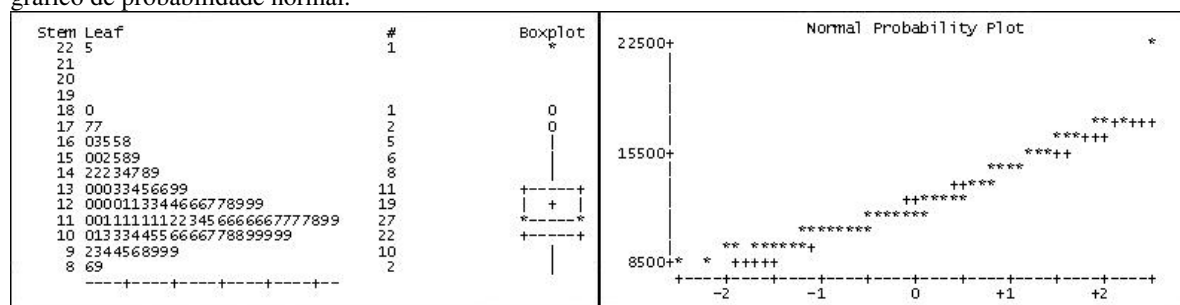


Figura 4-35: Histograma com a frequência dos dados teor de umidade dos corpos-de-prova no ensaio de compressão paralela às fibras e o e o seu gráfico de probabilidade normal.

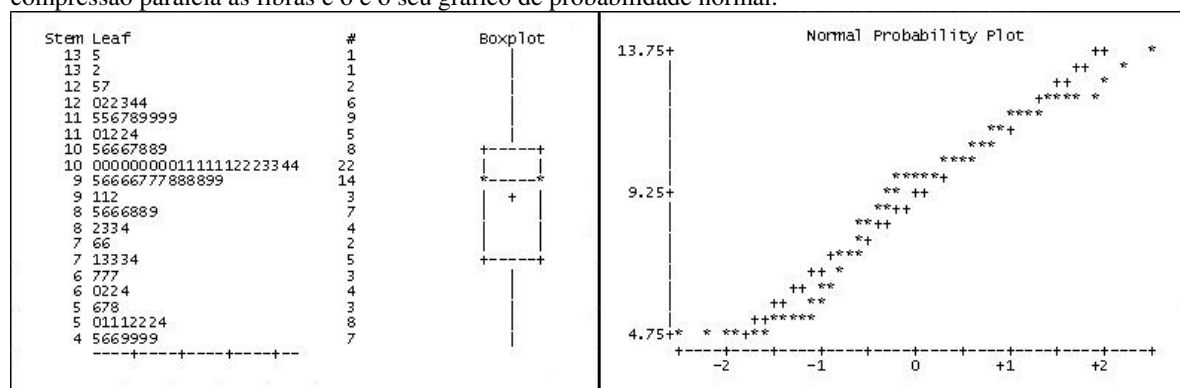


Figura 4-36: Histograma com a frequência dos dados de resistência em flexão estática e o e o seu gráfico de probabilidade normal.

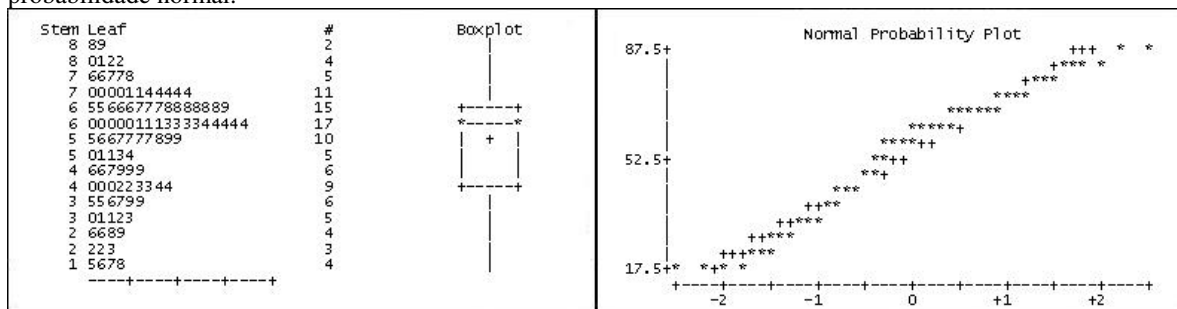


Figura 4-37: Histograma com a frequência dos dados de rigidez em flexão estática e o e o seu gráfico de probabilidade normal.

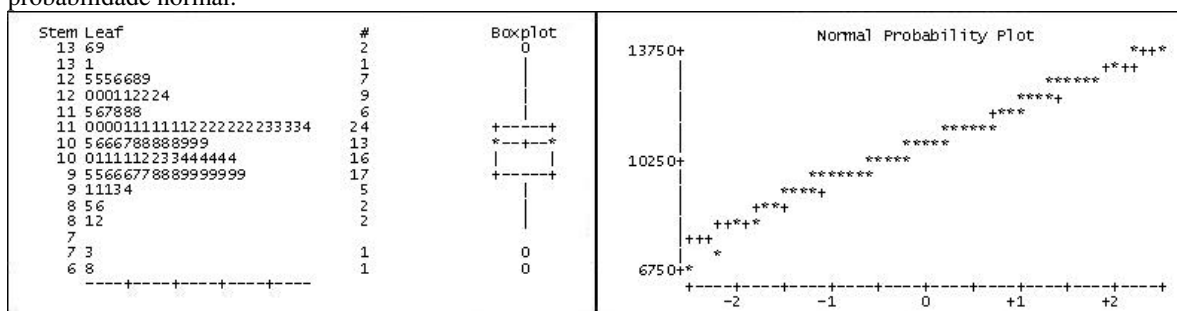
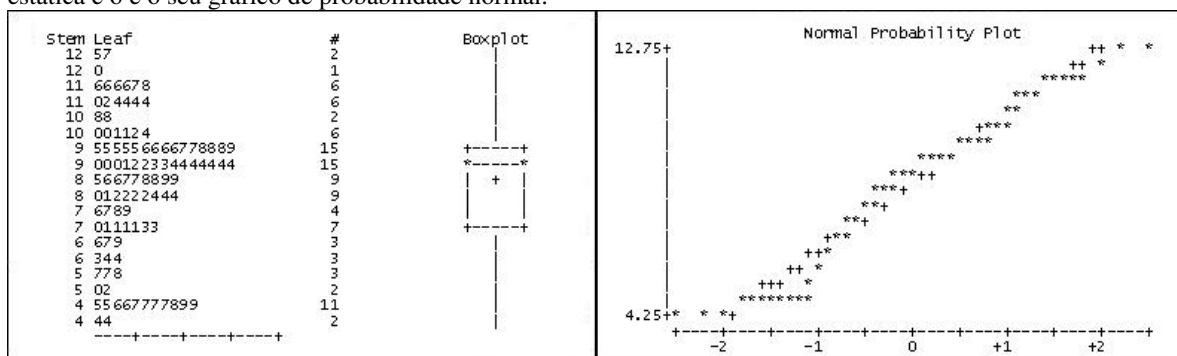


Figura 4-38: Histograma com a frequência dos dados teor de umidade dos corpos-de-prova no ensaio de flexão estática e o e o seu gráfico de probabilidade normal.



APÊNDICE 5

ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA AS VARIÁVEIS DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DA
MADEIRA.

Tabela 5-1: Análise de variância para a variável massa específica a 0%, classificadas segundo os tratamentos de termorretificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	0,12634537	0,02526907	38,87	<0,0001
Bloco	13	0,22589295	0,01737638	26,73	<0,0001
Repetição (Bloco)	125	0,04732586	0,00037861	0,58	0,9998
Resíduo	426	0,27693749	0,00065009		
Total	569	0,67650167			
Coefficiente de Variação:		5,565			

Tabela 5-2: Análise de variância para a variável massa específica a 12,0% de TUE, classificadas segundo os tratamentos de termorretificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	0,17683228	0,03536646	52,44	<0,0001
Bloco	13	0,23539949	0,01810765	26,85	<0,0001
Repetição (Bloco)	125	0,04995344	0,00039963	0,59	0,9997
Resíduo	426	0,28729089	0,00067439		
Total	569	0,74947610			
Coefficiente de Variação:		5,440			

Tabela 5-3: Análise de variância para a variável massa específica a 17,5% de TUE, classificadas segundo os tratamentos de termorretificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	0,19081409	0,03816282	57,76	<0,0001
Bloco	13	0,23034212	0,01771862	26,82	<0,0001
Repetição (Bloco)	125	0,04900891	0,00039207	0,59	0,9997
Resíduo	426	0,28147292	0,00066073		
Total	569	0,75163804			
Coefficiente de Variação:		5,297			

Tabela 5-4: Análise de variância para as variáveis massas específicas básica, classificadas segundo os tratamentos de termorretificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	0,03334887	0,00666977	15,50	<0,0001
Bloco	13	0,15524183	0,01194168	27,75	<0,0001
Repetição (Bloco)	125	0,03313255	0,00026506	0,62	0,9993
Resíduo	426	0,18332668	0,00043034		
Total	569	0,40504992			
Coefficiente de Variação:		5,052			

Tabela 5-5: Análise de variância para a variável teor de umidade de equilíbrio higroscópico a 12,0% de TUE, classificadas segundo os tratamentos de termorretificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	1054,203358	210,840672	1541,68	<0,0001
Bloco	13	55,386630	4,260510	31,15	<0,0001
Repetição (Bloco)	125	7,410406	0,059283	0,43	1,0000
Resíduo	426	58,259964	0,136760		
Total	569	1175,260359			
Coefficiente de Variação:		4,984			

Tabela 5-6: Análise de variância para a variável teor de umidade de equilíbrio higroscópico a 17,5% de TUE, classificadas segundo os tratamentos de termorretificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	2016,806687	403,361337	864,69	<0,0001
Bloco	13	105,771722	8,136286	17,44	<0,0001
Repetição (Bloco)	125	31,973808	0,255790	0,55	1,0000
Resíduo	426	198,721213	0,466482		
Total	569	2353,273429			
Coefficiente de Variação:		6,233			

Tabela 5-7: Análise de variância para a variável inchamento volumétrico a 12,0% de TUE, classificadas segundo os tratamentos de termorretificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	296,4116904	59,2823381	701,74	<0,0001
Bloco	13	40,7032429	3,1310187	37,06	<0,0001
Repetição (Bloco)	125	4,8050721	0,0384406	0,46	1,0000
Resíduo	426	35,9881629	0,0844793		
Total	569	377,9081683			
Coefficiente de Variação:		9,375			

Tabela 5-8: Análise de variância para a variável inchamento linear longitudinal a 12,0% de TUE, classificadas segundo os tratamentos de termorretificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	0,76038338	0,15207668	214,28	<0,0001
Bloco	13	0,16347183	0,01257476	17,72	<0,0001
Repetição (Bloco)	125	0,08298733	0,00066390	0,94	0,6680
Resíduo	426	0,30234069	0,00070972		
Total	569	1,30918323			
Coefficiente de Variação:		21,070			

Tabela 5-9: Análise de variância para a variável inchamento linear radial a 12,0% de TUE, classificadas segundo os tratamentos de termorretificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	27,01065800	5,40213160	439,24	<0,0001
Bloco	13	8,34729745	0,64209980	52,21	<0,0001
Repetição (Bloco)	125	0,75082293	0,00600658	0,49	1,0000
Resíduo	426	5,23932930	0,01229890		
Total	569	41,34810768			
Coefficiente de Variação:		9,563			

Tabela 5-10: Análise de variância para a variável inchamento linear tangencial a 12,0% de TUE, classificadas segundo os tratamentos de termorretificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	119,6413111	23,9282622	583,59	<0,0001
Bloco	13	15,4238376	1,1864490	28,94	<0,0001
Repetição (Bloco)	125	2,4309195	0,0194474	0,47	1,0000
Resíduo	426	17,4668848	0,0410021		
Total	569	154,9629530			
Coefficiente de Variação:		11,323			

Tabela 5-11: Análise de variância para a variável fator anisotrópico a 12,0% de TUE, classificadas segundo os tratamentos de termorretificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	10,89908065	2,17981613	83,71	<0,0001
Bloco	13	8,82102288	0,67854022	26,06	<0,0001
Repetição (Bloco)	125	1,77270790	0,01418166	0,54	1,0000
Resíduo	426	11,09263549	0,02603905		
Total	569	32,58544693			
Coefficiente de Variação:		10,543			

Tabela 5-12: Análise de variância para a variável inchamento volumétrico a 17,5% de TUE, classificadas segundo os tratamentos de termorretificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	671,6053979	134,3210796	541,47	<0,0001
Bloco	13	77,4314777	5,9562675	24,01	<0,0001
Repetição (Bloco)	125	16,5865703	0,1326926	0,53	1,0000
Resíduo	426	105,6771687	0,2480685		
Total	569	871,3006147			
Coefficiente de Variação:		10,507			

Tabela 5-13: Análise de variância para a variável inchamento linear longitudinal a 17,5% de TUE, classificadas segundo os tratamentos de termorreificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	1,10875224	0,22175045	198,50	<0,0001
Bloco	13	0,19929554	0,01533043	13,72	<0,0001
Repetição (Bloco)	125	0,08800579	0,00070405	0,63	0,9988
Resíduo	426	0,47589862	0,00111713		
Total	569	1,87195219			
Coefficiente de Variação:		22,622			

Tabela 5-14: Análise de variância para a variável inchamento linear radial a 17,5% de TUE, classificadas segundo os tratamentos de termorreificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	53,59922965	10,71984593	347,87	<0,0001
Bloco	13	15,68935656	1,20687358	39,16	<0,0001
Repetição (Bloco)	125	2,14594026	0,01716752	0,56	0,9999
Resíduo	426	13,12735733	0,03081539		
Total	569	84,56188379			
Coefficiente de Variação:		10,629			

Tabela 5-15: Análise de variância para a variável inchamento linear tangencial a 17,5% de TUE, classificadas segundo os tratamentos de termorreificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	291,7981242	58,3596248	442,88	<0,0001
Bloco	13	35,1779897	2,7059992	20,54	<0,0001
Repetição (Bloco)	125	9,1297209	0,0730378	0,55	0,9999
Resíduo	426	56,1348782	0,1317720		
Total	569	392,2407130			
Coefficiente de Variação:		12,589			

Tabela 5-16: Análise de variância para a variável fator anisotrópico a 17,5% de TUE, classificadas segundo os tratamentos de termorreificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	12,60166720	2,52033344	53,68	<0,0001
Bloco	13	14,97297083	1,15176699	24,53	<0,0001
Repetição (Bloco)	125	3,23901189	0,02591210	0,55	0,9999
Resíduo	426	20,00254700	0,04695434		
Total	569	50,81619692			
Coefficiente de Variação:		12,449			

Tabela 5-17: Análise de variância para a variável inchamento volumétrico máximo, classificadas segundo os tratamentos de termorreificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	2653,164646	530,632929	360,10	<0,0001
Bloco	13	477,269104	36,713008	24,91	<0,0001
Repetição (Bloco)	125	89,010310	0,712082	0,48	1,0000
Resíduo	426	627,736837	1,473561		
Total	569	3847,180896			
Coefficiente de Variação:		10,527			

Tabela 5-18: Análise de variância para a variável inchamento linear longitudinal máximo, classificadas segundo os tratamentos de termorreificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	3,84857025	0,76971405	276,05	<0,0001
Bloco	13	0,70731865	0,05440913	19,51	<0,0001
Repetição (Bloco)	125	0,25447733	0,00203582	0,73	0,9819
Resíduo	426	1,18780816	0,00278828		
Total	569	5,99817438			
Coefficiente de Variação:		21,111			

Tabela 5-19: Análise de variância para a variável inchamento linear radial máximo, classificadas segundo os tratamentos de termorreificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	124,4812532	24,8962506	131,08	<0,0001
Bloco	13	70,9896951	5,4607458	28,75	<0,0001
Repetição (Bloco)	125	14,9314556	0,1194516	0,63	0,9989
Resíduo	426	80,9108384	0,1899315		
Total	569	291,3132423			
Coefficiente de Variação:		12,530			

Tabela 5-20: Análise de variância para a variável inchamento linear tangencial máximo, classificadas segundo os tratamentos de termorreificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	1340,135306	268,027061	281,74	<0,0001
Bloco	13	296,092516	22,776347	23,94	<0,0001
Repetição (Bloco)	125	54,631920	0,437055	0,46	1,0000
Resíduo	426	405,258538	0,951311		
Total	569	2096,118279			
Coefficiente de Variação:		12,997			

Tabela 5-21: Análise de variância para as variáveis fatores anisotrópicos máximos, classificadas segundo os tratamentos de termorretificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	26,15017118	5,23003424	35,24	<0,0001
Bloco	13	45,23505716	3,47961978	23,44	<0,0001
Repetição (Bloco)	125	10,50635742	0,08405086	0,57	0,9999
Resíduo	426	63,2274817	0,1484213		
Total	569	145,1190675			
Coefficiente de Variação:		17,650			

Tabela 5-22: Análise de variância para a variável coeficiente de retratibilidade longitudinal a 12,0% de TUE, classificadas segundo os tratamentos de termorretificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	0,00246825	0,00049365	35,24	<0,0001
Bloco	13	0,00227020	0,00017463	12,47	<0,0001
Repetição (Bloco)	125	0,00178466	0,00001428	1,02	0,4373
Resíduo	426	0,00596806	0,00001401		
Total	569	0,01249116			
Coefficiente de Variação:		22,477			

Tabela 5-23: Análise de variância para a variável coeficiente de retratibilidade radial a 12,0% de TUE, classificadas segundo os tratamentos de termorretificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	0,01735930	0,00347186	20,99	<0,0001
Bloco	13	0,06835611	0,00525816	31,78	<0,0001
Repetição (Bloco)	125	0,01097335	0,00008779	0,53	1,0000
Resíduo	426	0,07047303	0,00016543		
Total	569	0,16716180			
Coefficiente de Variação:		8,246			

Tabela 5-24: Análise de variância para a variável coeficiente de retratibilidade tangencial a 12,0% de TUE, classificadas segundo os tratamentos de termorretificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	0,25423212	0,05084642	108,64	<0,0001
Bloco	13	0,16270353	0,01251566	26,74	<0,0001
Repetição (Bloco)	125	0,03006735	0,00024054	0,51	1,0000
Resíduo	426	0,19938762	0,00046805		
Total	569	0,64639062			
Coefficiente de Variação:		9,139			

APÊNDICE 6

ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA AS VARIÁVEIS DA RESISTÊNCIA DA MADEIRA A
FUNGOS.

Tabela 6-1: Análise de variância para a variável teor de umidade de equilíbrio dos corpos-de-prova antes do ensaio “agar-block”, classificadas segundo os tratamentos de termorretificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	268,9258334	53,7851667	225,64	<0,0001
Bloco	6	4,4202605	0,7367101	3,09	0,0081
Repetição (Bloco)	14	1,8703850	0,1335989	0,56	0,8894
Resíduo	100	23,8369941	0,2383699		
Total	125	299,0534730			
Coeficiente de Variação:		6,521			

Tabela 6-2: Análise de variância para a variável teor de umidade de equilíbrio dos corpos-de-prova depois do ensaio “agar-block”, classificadas segundo os tratamentos de termorretificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	18378,73229	3675,74646	2,71	0,0243
Bloco	6	12244,62300	2040,77050	1,51	0,1841
Repetição (Bloco)	14	8103,39732	578,81409	0,43	0,9626
Resíduo	100	135559,0844	1355,5908		
Total	125	174285,8370			
Coeficiente de Variação:		23,736			

Tabela 6-3: Análise de variância para a variável perda de massa dos corpos-de-prova no ensaio “agar-block”, classificadas segundo os tratamentos de termorretificação da madeira de *E. grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	2370,077778	474,015556	40,84	<0,0001
Bloco	6	491,279841	81,879974	7,05	<0,0001
Repetição (Bloco)	14	101,742222	7,267302	0,63	0,8377
Resíduo	100	1160,798889	11,607989		
Total	125	4123,898730			
Coeficiente de Variação:		27,533			

Tabela 6-4: Análise de variância para a variável teor de umidade de equilíbrio dos corpos-de-prova antes do ensaio “soil-block”, classificadas segundo os tratamentos de termorretificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	270,0530921	54,0106184	227,70	<0,0001
Bloco	6	6,5296651	1,0882775	4,59	0,0004
Repetição (Bloco)	14	2,2284556	0,1591754	0,67	0,7972
Resíduo	100	23,7199079	0,2371991		
Total	125	302,5311206			
Coeficiente de Variação:		6,508			

Tabela 6-5: Análise de variância para a variável teor de umidade de equilíbrio dos corpos-de-prova depois do ensaio “soil-block”, classificadas segundo os tratamentos de termorretificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	211109,3413	42221,8683	32,25	<0,0001
Bloco	6	61069,6187	10178,2698	7,77	<0,0001
Repetição (Bloco)	14	12366,8797	883,3485	0,67	0,7938
Resíduo	100	130928,0039	1309,2800		
Total	125	415473,8435			
Coeficiente de Variação:		17,055			

Tabela 6-6: Análise de variância para a variável perda de massa dos corpos-de-prova no ensaio “soil-block”, classificadas segundo os tratamentos de termorretificação da madeira de *E. grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	12058,81055	2411,76211	50,70	<0,0001
Bloco	6	2347,72654	391,28776	8,23	<0,0001
Repetição (Bloco)	14	371,89171	26,56369	0,56	0,8908
Resíduo	100	4756,65680	47,56657		
Total	125	19535,08560			
Coeficiente de Variação:		26,045			

APÊNDICE 7

ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA AS VARIÁVEIS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS
DA MADEIRA.

Tabela 7-1: Análise de variância para a variável dureza Janka normal às fibras (f_{H90}), classificadas segundo os tratamentos de termorreificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	216,1667544	43,2333509	8,06	<0,0001
Bloco	18	469,1529825	26,0640546	4,86	<0,0001
Resíduo	90	482,664912	5,362943		
Total	113	1167,984649			

Coefficiente de Variação: 12,972

Tabela 7-2: Análise de variância para a variável teor de umidade de equilíbrio dos corpos-de-prova submetidos ao ensaio de dureza Janka normal às fibras, classificadas segundo os tratamentos de termorreificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	613,8888947	122,7777789	443,74	<0,0001
Bloco	18	19,1479632	1,0637757	3,84	<0,0001
Resíduo	90	24,9018053	0,2766867		
Total	113	657,9386632			

Coefficiente de Variação: 5,493

Tabela 7-3: Análise de variância para a variável resistência em compressão paralela às fibras (f_{c0}), classificadas segundo os tratamentos de termorreificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	240,3577123	48,0715425	5,25	0,0003
Bloco	18	883,1665088	49,0648060	5,36	<0,0001
Resíduo	90	824,070954	9,156344		
Total	113	1947,595175			

Coefficiente de Variação: 7,477

Tabela 7-4: Análise de variância para a variável rigidez em compressão paralela às fibras (E_{c0}), classificadas segundo os tratamentos de termorreificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	8709463,8	1741892,8	0,68	0,6423
Bloco	18	340630560,4	18923920,0	7,35	<0,0001
Resíduo	90	231718819,0	2574653,5		
Total	113	581058843,2			

Coefficiente de Variação: 13,028

Tabela 7-5: Análise de variância para a variável teor de umidade de equilíbrio dos corpos-de-prova submetidos ao ensaio de compressão paralela às fibras, classificadas segundo os tratamentos de termorreificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	550,2222465	110,0444493	194,48	<0,0001
Bloco	18	21,0757281	1,1708738	2,07	0,0133
Resíduo	90	50,9261035	0,5658456		
Total	113	622,2240781			

Coefficiente de Variação:	8,240
----------------------------------	-------

Tabela 7-6: Análise de variância para a variável resistência em flexão estática (f_M), classificadas segundo os tratamentos de termorreificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	16458,89033	3291,77807	32,37	<0,0001
Bloco	18	7711,49396	428,41633	4,21	<0,0001
Resíduo	82	8337,68129	101,67904		
Total	105	32508,06558			

Coefficiente de Variação:	18,251
----------------------------------	--------

Tabela 7-7: Análise de variância para a variável rigidez em flexão estática (E_{M0}), classificadas segundo os tratamentos de termorreificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	22494883,70	4498976,74	5,31	0,0003
Bloco	18	67069795,55	3726099,75	4,40	<0,0001
Resíduo	82	69513665,5	847727,6		
Total	105	159078344,8			

Coefficiente de Variação:	8,562
----------------------------------	-------

Tabela 7-8: Análise de variância para a variável teor de umidade de equilíbrio dos corpos-de-prova submetidos ao ensaio de flexão estática, classificadas segundo os tratamentos de termorreificação da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Tratamento	5	449,0269756	89,8053951	249,95	<0,0001
Bloco	18	10,2326210	0,5684789	1,58	0,0843
Resíduo	82	29,4624185	0,3592978		
Total	105	488,7220151			

Coefficiente de Variação:	7,051
----------------------------------	-------

APÊNDICE 8

TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÕES MÚLTIPLAS DAS VARIÁVEIS
CLASSIFICADAS SEGUNDO OS TRATAMENTOS DE TERMORRETIFICAÇÃO.

Tabela 8-1: Teste de comparações de médias de Tukey para as variáveis de propriedades físicas classificadas segundo os tratamentos de termoretificação em madeira de *Eucalyptus grandis*.

Propriedade Física da Madeira	TRATAMENTO											
	Controle		140°C		160°C		180°C		200°C		220°C	
	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey
ρ 0%	0,477	A	0,460	B	0,467	B	0,445	C	0,462	B	0,427	D
ρ 12,0% (21°C-65%UR)	0,500	A	0,481	B	0,487	B	0,463	C	0,478	B	0,439	D
ρ 17,5% (23°C-83%UR)	0,508	A	0,489	B	0,496	B	0,471	C	0,486	B	0,444	D
ρ básica	0,418	A	0,407	B	0,416	A	0,401	B	0,420	A	0,400	B
TUE 12,0% (21°C-65%UR)	9,0	A	8,4	B	7,8	C	7,1	D	5,9	E	4,6	F
TUE 17,5% (23°C-83% UR)	13,2	A	12,1	B	11,5	C	10,5	D	9,2	E	6,8	F
Incha. Volum. a 12,0%TUE	4,06	A	3,62	B	3,22	C	2,78	D	2,40	E	1,69	F
Incha. Long. a 12,0%TUE	0,174	A	0,156	B	0,134	C	0,107	D	0,0850	E	0,0613	F
Incha. Radial a 12,0%TUE	1,44	A	1,35	B	1,18	C	1,05	D	0,98	E	0,72	F
Incha. Tangen. a 12,0%TUE	2,41	A	2,08	B	1,88	C	1,60	D	1,32	E	0,90	F
Incha. Volum. a 17,5%TUE	6,29	A	5,38	B	4,92	C	4,22	D	3,81	E	2,59	F
Incha. Long. a 17,5%TUE	0,205	A	0,183	B	0,157	C	0,126	D	0,0967	E	0,0678	F
Incha. Radial a 17,5%TUE	2,07	A	1,89	B	1,68	C	1,47	D	1,44	D	1,04	E
Incha. Tangen. a 17,5%TUE	3,92	A	3,24	B	3,03	C	2,58	D	2,23	E	1,47	F
Incha. Volum. Máximo	14,12	A	12,94	B	12,07	C	10,85	D	9,94	E	6,60	F
Incha. Long. Máximo	0,354	A	0,309	B	0,268	C	0,219	D	0,171	E	0,0801	F
Incha. Radial Máximo	3,93	A	3,93	A	3,53	B	3,26	C	3,32	C	2,37	D
Incha. Tangen. Máximo	9,42	A	8,34	B	7,96	C	7,11	D	6,22	E	4,05	F
Fator anisotrópico a 12,0%TUE	1,70	A	1,56	BC	1,61	B	1,54	C	1,35	D	1,25	E
Fator anisotrópico a 17,5%TUE	1,92	A	1,74	C	1,83	B	1,77	BC	1,56	D	1,43	E
Fator anisotrópico Máximo	2,44	A	2,17	C	2,33	AB	2,22	BC	1,91	D	1,74	D
Q Long. a 12,0%TUE	0,0193	A	0,0186	A	0,0171	B	0,0151	C	0,0143	C	0,0134	C
Q Radial a 12,0%TUE	0,159	A	0,160	A	0,151	B	0,148	B	0,163	A	0,158	A
Q Tangen. a 12,0%TUE	0,268	A	0,248	B	0,241	B	0,226	C	0,219	C	0,196	D

Tabela 8-2: Teste de comparações de médias de tukey para as variáveis de resistência da madeira a fungos classificadas segundo os tratamentos de termorretificação em *Eucalyptus grandis*.

Resistência da Madeira a Fungos	TRATAMENTO											
	Controle		140°C		160°C		180°C		200°C		220°C	
	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey
TUE dos c.p. antes do ensaio de “agar-block”	9,3	A	8,7	B	8,2	C	7,4	D	6,5	E	4,9	F
TUE dos c.p. depois do ensaio de “agar-block”	166,5	AB	158,5	AB	171,8	A	152,3	AB	144,9	AB	136,6	B
Perda de Massa no ensaio de “agar-block”	17,31	A	16,41	A	12,72	B	12,06	B	11,85	B	3,91	C
TUE dos c.p. antes do ensaio de “soil-block”	9,2	A	8,7	B	8,1	C	7,5	D	6,5	E	4,8	F
TUE dos c.p. depois do ensaio de “soil-block”	244,3	A	234,9	A	240,3	A	226,9	AB	200,0	B	126,5	C
Perda de Massa no ensaio de “soil-block”	34,32	A	33,19	A	32,57	A	28,95	AB	23,81	B	6,05	C

Tabela 8-3: Teste de comparações de médias de tukey para as variáveis de propriedades mecânicas classificadas segundo os tratamentos de termorretificação em madeira de *Eucalyptus grandis*.

Propriedade Mecânica da Madeira	TRATAMENTO											
	Controle		140°C		160°C		180°C		200°C		220°C	
	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey	Média	Tukey
Dureza Janka (MPa)	19,8	A	19,1	AB	18,2	ABC	17,4	BCD	16,8	CD	15,7	D
TUE em Dureza Janka (%)	12,5	A	11,0	B	10,8	B	9,8	C	8,0	D	5,4	E
Resistência em Compressão (MPa)	39,8	AB	40,6	A	41,5	A	41,3	A	42,0	A	37,6	B
Rigidez em Compressão (MPa)	12783	A	12350	A	12479	A	11922	A	12283	A	12079	A
TUE em Compressão (%)	12,2	A	10,3	B	10,0	BC	9,4	C	7,8	D	5,1	E
MOR em Flexão (MPa)	69,0	A	65,6	A	64,4	A	52,5	B	45,6	B	32,9	C
MOE em Flexão (MPa)	10670	AB	10802	A	11319	A	10905	A	10938	A	9768	B
TUE em Flexão (%)	11,6	A	9,8	B	9,1	C	8,4	D	7,2	E	4,8	F