

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**EFEITO DA RETIFICAÇÃO TÉRMICA NAS
PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS E BIOLÓGICA
DAS MADEIRAS DE *Pinus taeda* E *Eucalyptus
grandis***

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Karina Soares Modes

Santa Maria, RS, Brasil

2010

**EFEITO DA RETIFICAÇÃO TÉRMICA NAS PROPRIEDADES
FÍSICO-MECÂNICAS E BIOLÓGICA DAS MADEIRAS DE
Pinus taeda E *Eucalyptus grandis***

por

Karina Soares Modes

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Tecnologia de Produtos Florestais, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Florestal

Orientador: Prof. Dr. Elio José Santini

Santa Maria, RS, Brasil

2010

M691e

Modes, Karina Soares, 1984-

Efeito da retificação térmica nas propriedades físico-mecânicas e biológica das madeiras de *Pinus taeda* E *Eucalyptus grandis* / Karina Soares Modes. - 2010.
99 f. ; il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, 2010.
“Orientador: Prof. Dr. Elio José Santini”

1. Engenharia florestal 2. Termorretificação da madeira 3. Durabilidade biológica 4. Higroscopicidade 5. Resistência mecânica I. Santini, Elio José II. Título

CDU: 630*82

Ficha catalográfica elaborada por
Patrícia da Rosa Corrêa – CRB 10/1652
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal**

A comissão examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação
de Mestrado

**EFEITO DA RETIFICAÇÃO TÉRMICA NAS PROPRIEDADES FÍSICO-
MECÂNICAS E BIOLÓGICA DAS MADEIRAS DE *Pinus taeda* E
*Eucalyptus grandis***

elaborada por
Karina Soares Modes

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Florestal

COMISSÃO EXAMINADORA:

Elio José Santini, Dr.
(Presidente/Orientador)

Darci Alberto Gatto, Dr. (UFPEl)

Luciano Denardi, Dr. (CESNORS)

Santa Maria, 04 de março de 2010.

AGRADECIMENTOS

Em especial, ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (PPGEF-UFSM), pela oportunidade de realização do Mestrado e apoio na participação em eventos científicos.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Engenheiro Florestal Alencar Garlet do Laboratório de Produtos Florestais do Serviço Florestal Brasileiro, em Brasília, pela execução dos ensaios de resistência biológica a fungos apodrecedores.

Ao professor Janio Morais Santurio do Laboratório de Pesquisas Micológicas (LAPEMI), do Departamento de Microbiologia e Parasitologia, por oportunizar o tratamento do material em autoclave.

Ao Magnos, meu namorado, por sempre ter estado ao meu lado apoiando, incentivando e auxiliando em todas as etapas dessa pesquisa.

À minha família, pela paciência nas horas difíceis, e por sempre acreditarem em mim.

Ao professor Elio José Santini, pela orientação, apoio e confiança.

A todos os amigos e funcionários do Laboratório de Produtos Florestais, e também aos colegas do Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal, pelo agradável convívio.

A todos que contribuíram para a realização desse trabalho.

Muito Obrigada!

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Universidade Federal de Santa Maria

EFEITO DA RETIFICAÇÃO TÉRMICA NAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS E BIOLÓGICA DAS MADEIRAS DE *Pinus taeda* E *Eucalyptus grandis*

AUTOR: KARINA SOARES MODES

ORIENTADOR: ELIO JOSÉ SANTINI

Data e local da defesa: Santa Maria, 04 de março de 2010

A presente pesquisa objetivou investigar o efeito da técnica de retificação térmica, empregada sob duas condições de tratamento: madeira tratada em autoclave e após condicionamento, submetida ao tratamento em estufa (combinação), e madeira tratada pelo uso de estufa elétrica apenas (estufa), nas propriedades mecânicas, higroscópicas e biológicas das madeiras de *Pinus taeda* L. e *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, comparando-as com os resultados obtidos para a madeira sem tratamento. Para tanto, foram amostradas três árvores com 25 anos, para cada espécie, de onde se extraíram as duas primeiras toras, para confecção dos corpos de prova utilizados nas avaliações. No tratamento de combinação, as peças foram submetidas a termorretificação em autoclave a $130^{\circ}\text{C}/\pm 3^{\circ}\text{C}$ e pressão de $2\text{ kgf}/\text{cm}^2$, por 3 horas e, após um período de condicionamento, submetidas ao calor em estufa elétrica a $160^{\circ}\text{C}/\pm 1^{\circ}\text{C}$, pelo mesmo período; já as peças destinadas apenas ao tratamento em estufa foram submetidas a última condição. As propriedades físicas consistiram na avaliação da perda de peso e massa específica, atribuída ao tratamento, umidade de equilíbrio, taxa de absorção de água, efetividade de repelência à água, eficiência anti inchamento, inchamento tangencial, radial, volumétrico e coeficiente de anisotropia; as propriedades mecânicas consistiram na avaliação do módulo de elasticidade e ruptura em flexão estática, resistência máxima à compressão paralela, dureza de Janka, resistência ao impacto; por fim, para as propriedades biológicas, empregou-se o ensaio de apodrecimento acelerado em laboratório, utilizando fungos de podridão branca e parda. O efeito do tratamento térmico empregado sob as duas metodologias, provocaram resultados diferentes do esperado, no que se refere as propriedades mecânicas e biológicas. Os resultados obtidos indicaram que os tratamentos térmicos empregados, foram eficientes na redução da higroscopicidade e aumento da estabilidade dimensional de ambas as espécies, com os melhores resultados obtidos pelo método de combinação. Para as propriedades mecânicas, os tratamentos térmicos promoveram efeitos diversos, chegando a um incremento da resistência para certas propriedades e, em relação à durabilidade biológica das peças, os tratamentos favoreceram o apodrecimento aos fungos empregados, efeito mais pronunciado para o método combinado.

Palavras-chave: termorretificação da madeira; durabilidade biológica; higroscopicidade; resistência mecânica.

ABSTRACT

Master's Thesis
Master's Degree Program in Forest Engineering
Santa Maria Federal University

EFFECT OF THERMAL TREATMENT ON PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES AND BIOLOGICAL OF *Pinus taeda* and *Eucalyptus grandis* WOOD

AUTHOR: KARINA SOARES MODES

ADVISOR: ELIO JOSÉ SANTINI

Date and place of defense: Santa Maria, March 04th, 2010.

This study investigated the effect of thermal treatment technique, used in two treatment conditions: treated wood in an autoclave and after conditioning, subject to the treatment under electric heater (combination), and treated wood by using only electric kiln (oven) on mechanical, hygroscopic and biological properties of *Pinus taeda* L. and *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden woods, comparing them with the results obtained for the untreated wood. For that three trees with 25 years, were deployed for each species from which it drew the first two logs for making the samples used in the evaluations. In the combination treatment these parts were subjected to thermo treatment by autoclaving at 130°C/ ± 3°C and pressure of 2 kgf/cm² for 3 hours and after a conditioning period, subjected to electric heat in an oven at 160°C/ ± 1°C for the same period, already parts for just treatment in oven were exposed the last condition. The physical properties consisted in the evaluation of weight loss and specific weight assigned to treatment, equilibrium moisture content, rate of water absorption, effectiveness of water repellency, anti swelling efficiency, tangential, radial, and volumetric swelling and coefficient of anisotropy, the mechanical properties consisted in evaluating the modulus of elasticity and rupture in bending, maximum resistance to compression parallel, Janka hardness, impact resistance, and finally to the biological was employed accelerated decay test in the laboratory using white rot fungi and brown. The effect of heat treatment employed in the two methodologies resulted in different effects than expected with regard to the mechanical and biological. The results indicated that heat treatments used were effective in reducing the hygroscopicity and increased dimensional stability of both species, the best results for the combination method. To provide the mechanical properties of different effects, reaching an increase of resistance to certain properties and for durability of biological parts, treatments favored decay fungi employees, more pronounced effect for the combined method.

Key-words: thermal treatment of wood; biological durability; hygroscopicity; mechanical strength.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química aproximada dos constituintes da madeira.....	18
Tabela 2 - Testes mecânicos empregados na avaliação das peças tratadas e testemunha.....	41
Tabela 3 - Análise de variância para a perda de massa da madeira de <i>Pinus taeda</i> em função do tratamento de termorreificação.	87
Tabela 4 - Análise de variância para a perda de massa da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> em função do tratamento de termorreificação.	87
Tabela 5 - Análise de variância para a redução de massa específica da madeira de <i>Pinus taeda</i> em função do tratamento de termorreificação.	88
Tabela 6 - Análise de variância para a redução de massa específica da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> em função do tratamento de termorreificação.....	88
Tabela 7 - Análise de variância para a umidade de equilíbrio da madeira de <i>Pinus taeda</i> em função dos tratamentos de termorreificação.	89
Tabela 8 - Análise de variância para a umidade de equilíbrio da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> em função dos tratamentos de termorreificação.	89
Tabela 9 - Análise de variância entre o 1° e 2° ciclos para a Efetividade de Repelência a água da madeira de <i>Pinus taeda</i> em função do tratamento de combinação.....	90
Tabela 10 - Análise de variância entre o 1° e 2° ciclos para a Efetividade de Repelência a água da madeira de <i>Pinus taeda</i> em função do tratamento em estufa.	90
Tabela 11 - Análise de variância entre o 1° e 2° ciclos para a Eficiência Anti Inchamento da madeira de <i>Pinus taeda</i> em função do tratamento de combinação. .	90

Tabela 12 - Análise de variância entre o 1° e 2° ciclos para a Eficiência Anti Inchamento da madeira de <i>Pinus taeda</i> em função do tratamento em estufa.	90
Tabela 13 - Análise de variância entre o 1° e 4° ciclos para a Efetividade Repelência à água da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> em função do tratamento de combinação.	90
Tabela 14 - Análise de variância do 1° e 4° ciclo para a Efetividade Repelência à água da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> em função do tratamento em estufa.	90
Tabela 15 - Análise de variância do 1° e 4° ciclo para a Eficiência Anti Inchamento da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> em função do tratamento de combinação.	90
Tabela 16 - Análise de variância do 1° e 4° ciclo para a Eficiência Anti Inchamento da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> em função do tratamento em estufa.	90
Tabela 17 - Análise de variância para a resistência máxima em compressão paralela e Massa específica para a madeira de <i>Pinus taeda</i>	91
Tabela 18 - Análise de variância para a resistência máxima em compressão paralela e Massa Específica para a madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	91
Tabela 19 - Análise de variância para o Módulo de Elasticidade em flexão estática e Massa Específica para a madeira de <i>Pinus taeda</i> em função dos 3 tratamentos.	91
Tabela 20 – Comparação múltipla de médias para a massa específica da madeira de <i>Pinus taeda</i> submetida à flexão estática.	92
Tabela 21 – Análise de variância para o Módulo de Elasticidade em flexão estática e massa específica para a madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> em função dos 3 tratamentos.	92
Tabela 22 – Análise de variância para o Módulo de Ruptura em flexão estática para a madeira de <i>Pinus taeda</i>	92
Tabela 23 – Análise de variância para o Módulo de Ruptura em flexão estática para a madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	92
Tabela 24 - Análise de variância para a Resistência ao impacto da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	94
Tabela 25 - Análise de variância para a dureza de topo e Massa Específica da madeira de <i>Pinus taeda</i>	94
Tabela 26 - Análise de variância para a dureza de topo da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	95
Tabela 27 – Análise de variância para a dureza de superfície (tangencial) da madeira de <i>Pinus taeda</i>	95

Tabela 28 - Análise de variância para a dureza de superfície (tangencial) da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	95
Tabela 29 - Análise de variância para a dureza de superfície (radial) da madeira de <i>Pinus taeda</i>	95
Tabela 30 - Análise de variância para a dureza de superfície (radial) da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	96
Tabela 31 - Análise de variância para a perda de massa da madeira de <i>Pinus taeda</i> em ensaio com o fungo <i>Trametes versicolor</i>	97
Tabela 32 – Teste de médias da perda de massa da madeira de <i>Pinus taeda</i> em ensaio com o fungo <i>Trametes versicolor</i>	97
Tabela 33 - Análise de variância para a perda de massa da madeira de <i>Pinus taeda</i> em ensaio com o fungo <i>Gloeophyllum trabeum</i>	97
Tabela 34 - Análise de variância para a perda de massa da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> em ensaio com o fungo <i>Trametes versicolor</i>	97
Tabela 35 - Análise de variância para a perda de massa da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> em ensaio com o fungo <i>Gloeophyllum trabeum</i>	98
Tabela 36 - Valores médios, mínimos, máximos, coeficiente de variação e desvio padrão das propriedades mecânicas avaliadas para a madeira de <i>Pinus taeda</i>	100
Tabela 37 - Valores médios, mínimos, máximos, coeficiente de variação e desvio padrão das propriedades mecânicas avaliadas para a madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação das zonas amorfas e cristalinas de uma fibrila elementar.	26
Figura 2 – Mudanças decorrentes do tratamento térmico nos componentes da madeira.	27
Quadro 1 – Alterações sofridas pela madeira durante o tratamento térmico.....	27
Figura 3 - Interação das moléculas de água com os grupos OH pelos polímeros da madeira.	29
Figura 4 – Tipos de modificações dos polímeros da parede da célula pelo tratamento térmico da madeira.....	30
Figura 5 - Esquema de extração das duas pranchas por tora.....	35
Figura 6 - Fases dos tratamentos de combinação e estufa.....	36
Figura 7 - Vista externa e interna da autoclave utilizada no tratamento de termorreificação combinado.	37
Figura 8 - Vista externa e interna da estufa utilizada no tratamento de termorreificação combinado.	37
Figura 9 - Corte das ripas de madeira usadas na confecção dos corpos de prova...42	
Figura 10 - Máquina universal de ensaios hidráulica e Pêndulo de Charpy utilizados nos ensaios de resistência mecânica.....	43
Figura 11 - Perda de massa provocada pelo tratamento de termorreificação nas madeiras de <i>Pinus taeda</i> e <i>Eucalyptus grandis</i>	45
Figura 12 - Redução de massa específica advinda do emprego dos tratamentos térmicos sobre as madeiras de <i>Pinus taeda</i> e <i>Eucalyptus grandis</i>	46
Figura 13 - Umidade de equilíbrio obtida em câmara climatizada em condições controladas.....	48

Figura 14 - Taxa de absorção de água, inchamento volumétrico e massa específica da madeira de <i>Pinus taeda</i> e <i>Eucalyptus grandis</i> no decorrer dos ciclos.	50
Figura 15 - Valores de Efetividade de Repelência à Água (ERA) e Eficiência Anti Inchamento (EAI) apresentados pela madeira de <i>Pinus taeda</i> e <i>Eucalyptus grandis</i> no 1° e último ciclo de avaliação.	53
Figura 16 - Valores de Inchamento Tangencial (IT), Inchamento Radial (IR) e Coeficiente de Anisotropia (CA) da madeira de <i>Pinus taeda</i> em razão dos ciclos de avaliação.	55
Figura 17 - Valores de Inchamento Tangencial (IT), Inchamento Radial (IR) e Coeficiente de Anisotropia (CA) da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> em razão dos ciclos de avaliação.	56
Figura 18 - Percentagem de alteração das propriedades mecânicas da madeira de <i>Pinus taeda</i> em relação a testemunha.	60
Figura 19 - Percentagem de alteração das propriedades mecânicas da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> em relação a testemunha.	64
Figura 20 - Média de perda de massa e a respectiva classificação.	69
Figura 21 - Corpos de prova da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Pinus taeda</i> , utilizados nos testes de higroscopicidade.	82
Figura 22 - Frascos de ensaio contendo corpo-de-prova do tratamento de combinação já em fase de finalização do experimento.	83
Figura 23 - Detalhe dos corpos de prova removidos dos frascos junto com a placa suporte.	83
Figura 24 - Aspecto dos corpos de prova testemunha, combinação e estufa e blocos de referência das espécies <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Pinus taeda</i> após o ensaio de apodrecimento acelerado.	84
Figura 25 - Aspecto dos corpos de prova após o ensaio de resistência ao impacto.	85
Figura 26 - Detalhe do cisalhamento sofrido pelos corpos de prova no ensaio de resistência ao impacto.	86
Quadro 2 - Significância para a Resistência ao impacto da madeira de <i>Pinus taeda</i> pelo teste não paramétrico de Kruskal Wallis.	94
Quadro 3 - Significância para a massa específica da madeira de <i>Pinus taeda</i> submetida ao impacto pelo teste não paramétrico de Kruskal Wallis.	94

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice 1 - Aspecto dos corpos de prova de cada tratamento.	82
Apêndice 2 - Condução do ensaio de apodrecimento acelerado	83
Apêndice 3 - Corpos de prova submetidos ao ensaio de resistência ao impacto.....	85
Apêndice 4 - Análise de variância para a perda de massa das duas espécies em função dos tratamentos de termorretificação.	87
Apêndice 5 - Análise de variância para a redução de massa específica das duas espécies em função dos tratamentos de termorretificação.	88
Apêndice 6 - Análise de variância para a umidade de equilíbrio das duas espécies em função dos tratamentos.	89
Apêndice 7 - Análise de variância entre o primeiro e último ciclos para a Efetividade de Repelência a água (ERA) e Eficiência Anti Inchamento (EAI) para as duas espécies em função dos tratamentos de termorretificação.	90
Apêndice 8 - Análise de variância para as propriedades mecânicas e correspondente massa específica das duas espécies em função dos tratamentos.....	92
Apêndice 9 - Análise de variância para a perda de massa da madeira das duas espécies em função dos fungos <i>Trametes versicolor</i> e <i>Gloeophyllum trabeum</i> , no ensaio de apodrecimento acelerado para os 3 tratamentos.....	97
Apêndice 10 - Parâmetros estatísticos dos testes de resistência mecânica das duas espécies para os três tratamentos.	99

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1 Composição química da parede celular da madeira de folhosas e coníferas..	18
2.2 Retificação térmica da madeira.....	20
2.3 Fatores condicionantes do processo.....	23
2.4 Efeitos do tratamento térmico e modificações nas propriedades da madeira ..	25
3 MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1 Obtenção e preparo do material.....	35
3.2 Ensaio físicos	36
3.2.1 Perda de massa.....	37
3.2.2 Redução de massa específica.....	38
3.2.3 Taxa de absorção de água	38
3.2.4 Efetividade de repelência à água.....	39
3.2.5 Coeficiente de inchamento volumétrico	39
3.2.6 Eficiência Anti Inchamento (EAI).....	39
3.2.7 Inchamento linear	40
3.2.8 Coeficiente de Anisotropia de inchamento.....	40
3.2.9 Massa específica aparente	40
3.2.10 Umidade de equilíbrio	41
3.3 Ensaio de resistência mecânica.....	41
3.4 Ensaio de resistência biológica	43
3.5 Análise estatística dos dados.....	43
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1 Efeito do tratamento térmico nas propriedades físicas	45
4.1.1 Perda de Massa.....	45

4.1.2 Redução de massa específica	46
4.1.3 Umidade de equilíbrio	47
4.1.4 Taxa de absorção de água, inchamento volumétrico e massa específica em cada ciclo de mergulho/secagem da madeira.....	49
4.1.5 Efetividade de Repelência à Água (ERA) e Eficiência Anti Inchamento (EAI).....	52
4.1.6 Inchamento linear e anisotropia de inchamento	55
4.2 Efeito do tratamento térmico nas propriedades mecânicas	58
4.2.1 Correção das propriedades mecânicas	58
4.3 Efeito do tratamento térmico na resistência biológica	69
5 CONCLUSÕES	72
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
7 APÊNDICES.....	82

1 INTRODUÇÃO

A madeira, devido certas particularidades, tais como movimentação dimensional atribuída ao ganho e perda de umidade e susceptibilidade a degradação biológica e a intempéries, tem sua aptidão limitada para certos usos. Sendo assim, a modificação da madeira pretende melhorar algumas propriedades como a resistência à biodegradação e a estabilidade dimensional, mas também a resistência à radiação ultravioleta, entre outras, produzindo um material novo que no fim do ciclo de vida do produto não apresenta um perigo ambiental superior ao da madeira não tratada.

Nesse sentido, os processos de modificação da madeira podem ser divididos em quatro tipos: modificação química, modificação térmica, modificação de superfície e modificação por impregnação, sendo que a modificação térmica é o que mais tem evoluído em termos comerciais nos últimos anos, devido principalmente ao baixo custo do processo.

No que se referem a este tipo de modificação, os primeiros estudos que abordaram a ação do calor sobre a madeira partiram do final da década de 30 e início da década de 40, período da Segunda Guerra Mundial, quando se investigava a utilização desse material como substituto energético aos derivados do petróleo, e perduraram até o final da guerra, quando a distribuição desse último se estabilizou na Europa.

Uma nova crise nos preços dos combustíveis fósseis, nas décadas de 70 e 80, motivou a retomada de pesquisas para esse fim e, paralelamente, mostrou a obtenção de algumas propriedades de grande interesse para a construção civil, tanto que impulsionaram, especialmente entre 1985 e 2000, o desenvolvimento de processos de tratamento térmico da madeira, destinada ao uso estrutural em países como Finlândia, França, Alemanha e Holanda.

Esses processos têm, como princípio, a técnica de retificação térmica ou termorretificação, que consiste em submeter peças de madeira a temperaturas entre 120 e 200°C, faixa entre a secagem à alta temperatura e à temperatura de torrefação, com objetivo de promover sensíveis alterações químicas nos polímeros celulose, hemicelulose e lignina e, assim, obter um material com características

diferenciadas, comparativamente à madeira em condições normais; tais como, menor higroscopicidade, maior estabilidade dimensional e resistência biológica.

Além dessas, os trabalhos já desenvolvidos, com o propósito de identificar as modificações na madeira por este processo, acusa que o tratamento térmico aumenta a dureza superficial, melhora a compatibilidade da superfície com componentes orgânicos, reduz a flexibilidade da madeira, altera a cor e aumenta a resistência das madeiras a intempéries.

Diante dessas abordagens, nos países onde a técnica já é concretizada, os produtos retificados termicamente são empregados em revestimentos, instalações de paredes à prova de som, assoalhos, terraços, móveis para jardim, batentes de portas e janelas, móveis residenciais, decorações e, inclusive, na fabricação de instrumentos musicais, dentre outros, podendo, até mesmo, substituir o tratamento de espécies cuja impregnação com compostos químicos é proibida em função do seu uso final.

A madeira é um material que apresenta excelentes propriedades, mas possui também características por vezes indesejáveis como alta higroscopicidade, heterogeneidade e anisotropia, das quais derivam grande parte dos problemas apresentados em seu uso. Estas características, próprias da madeira, geram a necessidade da aplicação de tratamentos que permitam uma melhor utilização, principalmente em sua forma sólida.

Nesse sentido, o tratamento térmico da madeira surge como alternativa para melhorar a utilização que já é dada a madeiras consideradas problemáticas do ponto de vista tecnológico, diversificando-as para outros usos, e ampliando seu potencial econômico, questão onde se encaixam as madeiras dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*, que apesar de disponíveis em escala comercial, sofrem limitações quanto ao seu amplo emprego, devido à inadequação de uma ou mais propriedades para um fim específico.

Porém, o grau das transformações sofridas pelos polímeros constituintes da madeira e, conseqüentemente, dos efeitos atribuídos ao tratamento de retificação térmica, é condicionado por fatores como temperatura e duração do tratamento, taxa de aquecimento, atmosfera circundante, como uso de pressão, água ou apenas ar quente e também da sua interação com a espécie utilizada. Da mesma maneira, condicionam os efeitos negativos, advindos do emprego de temperaturas elevadas,

que promovem a degradação da estrutura interna da madeira e, conseqüente, perda de resistência mecânica.

Os trabalhos de pesquisa existente no Brasil ainda são bastante incipientes e, os pouco existentes, exploram principalmente a combinação de diferentes temperaturas e tempos de tratamento sobre as propriedades da madeira, o que demanda a condução de pesquisas que direcionem o foco de exploração para outras variáveis de influência nos resultados. No que se refere também ao meio de aquecimento, as abordagens efetuadas dão conta dos tratamentos aplicados ora em estufa elétrica, ora em autoclave.

Nesse sentido, desenvolveu-se a presente pesquisa, objetivando avaliar o efeito da técnica de retificação térmica, empregada sob duas metodologias de aquecimento, as madeiras de *Pinus taeda* L. e *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, comparando os parâmetros de avaliação obtidos para as madeiras tratadas com aqueles obtidos para a madeira sem tratamento.

Os objetivos específicos foram:

- Avaliar o efeito do tratamento térmico aplicado por meio da combinação do tratamento em autoclave e estufa elétrica e do tratamento em estufa elétrica apenas;
- Avaliar a influência do tratamento térmico sobre as propriedades físicas da madeira;
- Avaliar a influência do tratamento térmico sobre as propriedades mecânicas;
- Empregar ensaios de apodrecimento acelerado em laboratório com fungos de podridão branca e parda, a fim de avaliar o efeito do tratamento térmico sobre a durabilidade biológica da madeira.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Composição química da parede celular da madeira de folhosas e coníferas

A estrutura da madeira pode, contudo, ser compreendida não só em termos do arranjo de suas células, mas também, e mais fundamentalmente, com base na organização e química das substâncias da parede celular (MOREY, 1980).

No processo de divisão celular a primeira membrana de separação a aparecer entre o par de novas células é a lamela média, cuja função é unir as células umas às outras, e sobre esta se acumulam posteriormente, no interior da célula, microfibrilas de celulose, formando uma trama irregular que constitui a parede primária. Concluído o processo de diferenciação das células, depositam-se junto a essa membrana novas microfibrilas de celulose, agora obedecendo a certa orientação, as camadas distintas S1, S2 e S3, que passam a constituir a parede secundária da célula. Paralelamente a deposição da parede secundária, tem início o processo de lignificação que é mais intenso na lamela média e parede primária (BURGER e RICHTER, 1991).

Conforme Carvalho et al. (2009), a proporção entre os componentes da parede celular (celulose, hemicelulose e lignina) depende da espécie vegetal e varia de camada para camada. Em geral, enquanto a lignina responde por até 84% do peso da lamela média composta (LM + P), a parede secundária interna (S3) é constituída por até 87% de hemicelulose, com pouca ou nenhuma lignina. A parede secundária média (S2), usualmente mais espessa que as demais, apresenta em média 54% de celulose.

Segundo Morey (1980), as paredes celulares, primária e secundária, são formadas por três constituintes principais: celulose e hemicelulose, ambos polissacarídeos, e lignina, um polímero aromático. A celulose pode ser comparada a um esqueleto que dá forma e estrutura à parede celular e inicialmente se encontra embebida numa matriz porosa, amorfa de hemicelulose, sendo que mais tarde estes polissacarídeos são incrustados e aglutinados com lignina, que é considerado um polímero tridimensional muito estável.

Conforme Morey (1980), algumas diferenças marcantes ocorrem entre angiospermas e gimnospermas em termos da composição química bruta da

madeira, sendo que as hemiceluloses estão usualmente presentes em maiores quantidades na madeira de folhosas do que na de coníferas, ao passo que a lignina está presente em maior quantidade na madeira de coníferas e em menor quantidade em folhosas, já a celulose é a única que apresenta valores relativamente constantes, de 40 a 45%, para ambas as espécies.

A Tabela 1 mostra as proporções de celulose, hemicelulose, lignina e extrativos encontrados nas madeiras de coníferas e folhosas.

Tabela 1- Composição química aproximada, em %, dos constituintes da madeira (Adaptado de MORAIS et al., 2005).

Componentes		
Químicos	Madeiras de Coníferas	Madeiras de Folhosas
Celulose	42 ± 2	45 ± 2
Hemiceluloses	27 ± 2	30 ± 5
Lignina	28 ± 3	20 ± 4
Extrativos	3 ± 2	3 ± 2

Conforme Morais et al. (2005), dentre os componentes estruturais, o principal componente da parede celular de folhosas e coníferas é a celulose, um polímero linear de grau de polimerização elevado, responsável por grande parte das propriedades da madeira. As hemiceluloses são polímeros lineares ramificados com grau de polimerização baixo e que, à semelhança da celulose, funcionam como material estrutural, além de servirem como substância de reserva. O último componente estrutural é a lignina, uma substância amorfa com estrutura tridimensional que é responsável pela rigidez da parede celular e consequente resistência mecânica. Os extrativos são moléculas pequenas cuja designação advém de poderem ser retirados da madeira através de solventes. Muitas vezes exercem funções de defesa contra xilófagos, outras são responsáveis pela cor e cheiro das madeiras, mas na maioria das vezes não possuem qualquer função específica.

2.2 Retificação térmica da madeira

Existem alguns obstáculos quando se trabalha com a madeira, e a maioria desses, está associada com suas propriedades higroscópicas em combinação com a sua anisotropia de contração e inchamento, além da degradação biológica, também relacionada a mudanças no conteúdo de umidade (JOHANSSON, 2008).

Nesse sentido, de acordo com Mohebbi e Sanaei (2005), diferentes técnicas têm sido estudadas ou usadas com vistas à modificação de algumas propriedades da madeira, sendo o tratamento térmico conhecido como um dos mais antigos, fácil e barato, com melhoras no que se refere à capacidade de repelência à água, estabilidade dimensional e resistência biológica da madeira.

Segundo Rodrigues (2009), o tratamento térmico dado à madeira, varia desde a secagem (eliminação de água livre) até a gaseificação (produção de gás), sendo que, no gradiente entre esses dois extremos, há eliminação e formação de diversas substâncias, segundo reações simples e complexas, resultando em alterações químicas, físicas e mecânicas tão mais significativas com o aumento da temperatura.

A termorretificação ou retificação térmica é um processo em que o calor é aplicado a madeiras a temperaturas inferiores as que provocam o início da degradação de seus componentes químicos fundamentais, sobretudo as hemiceluloses, que são os mais sensíveis à ação do calor, resultando na obtenção de um produto sólido, com características diferenciadas, quando comparado com madeira em condições normais, algumas delas podendo tornar-se interessantes para aplicações diferenciadas da madeira (BRITO et al., 2006).

Para Mohebbi e Talaei (2005), na faixa em que se encontra o tratamento de termorretificação, os produtos de madeira podem ganhar, tecnologicamente, algumas importantes propriedades para serem aceitas no mercado.

Segundo Silva (2006), este sistema utiliza apenas calor e consiste em expor a madeira a temperaturas elevadas (120° a 200°C), porém que não provoquem a degradação dos componentes químicos fundamentais.

Já para Pessoa et al. (2006), o processo de retificação térmica ou termorretificação, é aquele conduzido nas temperaturas inferiores àquelas usadas na torrefação (na faixa de temperatura entre 200 e 280°C).

A madeira retificada termicamente é obtida pelo princípio da termodegradação de seus constituintes químicos, na ausência de oxigênio ou forte

deficiência de ar. É definida também como o produto de uma pirólise controlada, interrompida, antes de atingir o patamar das reações exotérmicas (que se iniciam aproximadamente a temperatura de 280°C), quando tem início a combustão espontânea da madeira (BORGES E QUIRINO, 2004).

Apesar dos estudos envolvendo o tratamento térmico da madeira terem começado em 1946, com o trabalho de Stamm et al., somente nas últimas décadas foi sistematicamente pesquisado e industrialmente aplicado em alguns países da Europa (ESTEVES et al., 2008).

Segundo Rodrigues (2009) em face às inúmeras vantagens que o tratamento térmico traz às propriedades físico-mecânicas da madeira, esse tratamento, já é um processo em escala industrial em vários países europeus, mais em voga na Finlândia, França, Alemanha e Holanda, respectivamente denominados Finnish Thermowood, French Retification e Bois Perdure, Oil Heat Treatment e Dutch Plato Wood. Esse mesmo autor informa que em 2001, a capacidade de produção estimada de madeira termicamente tratada na Europa era de 165.000 m³.

De acordo com Esteves et al. (2008), o processo finlandês utiliza vapor (Thermowood), o holandês usa uma combinação de vapor e ar quente (Plato Wood), o francês um gás inerte (Rectification) e ar quente (Bois Perdure) e o alemão óleo aquecido (OHT) .

Conforme Esteves e Pereira (2009), nesses países, a madeira tratada por esses processos tem uma larga aplicação para usos ao ar livre, decks, móveis para jardim, molduras de janelas, bem como para uso interno, como na confecção de armários para cozinhas, parquet, painéis decorativos e, principalmente, para o interior de saunas.

A descrição de cada etapa desses processos de tratamento é realizada por Nunes (2009), e seguem descritas abaixo:

(1) Retifiction (Bois Retifié): Essa tecnologia é aplicada quando a madeira apresenta um teor de umidade inicial de 12 %, a qual é tratada com temperaturas variando entre 210 e 240°C, na presença de nitrogênio;

(2) Bois Perdure: processo também desenvolvido na França como o anterior, no qual a madeira verde é tratada à 230°C, sob o vapor gerado pela água contida na própria madeira;

(3) Oil Heat Treatment - OHT: Processo bastante diferenciado, em que a madeira é tratada em um tanque fechado imersa em óleo quente, com temperaturas

variando entre 180 e 220°C, durante 2-4 horas, não considerando o tempo de aquecimento inicial e resfriamento pós-tratamento;

(4) PLATO WOOD: Essa tecnologia é baseada em quatro etapas: (a) hidrotermólise: tratamento térmico a 150-180°C, em condição aquosa sob pressão atmosférica (4-5 horas); (b) secagem convencional (3-5 dias); (c) tratamento térmico a 150-190°C sob condições secas (14-16 horas); e (d) condicionamento (2-3 dias);

(5) THERMOWOOD: Esse tratamento apresenta três diferentes fases: (a) secagem da madeira verde à alta temperatura (100-130°C); (b) tratamento térmico a $190 \pm 2^\circ\text{C}$ (Madeira Thermo-S) ou $212 \pm 2^\circ\text{C}$ (Madeira Thermo-D), durante 2-4 horas, dependendo do produto final que se deseja obter; e (c) resfriamento e reumidificação da madeira a 4-8%.

A letra “S” no Thermo-S indica estabilidade, já a letra “D” no Thermo-D indica durabilidade, ambos referentes a propriedade utilizada na classificação dos produtos nessa classe de tratamento.

De acordo com Esteves e Pereira (2009), o processo Thermowood, desenvolvido pela VTT, é provavelmente o mais bem sucedido na Europa. De acordo com os mesmos autores, produziram-se cerca de 130.800 m³ de madeira tratada termicamente em 2007, representando a madeira tratada pelo processo Thermowood mais de 50%, tanto que as vendas de madeira tratada por este processo aumentaram de 18.799 m³ em 2001 para 72.485 m³ em 2007. A maioria da madeira em 2007 (92%) foi vendida na Europa, sendo 19% na Finlândia e 73% em outros países europeus.

Já a madeira produzida pelo processo Plato, desenvolvido e comercializado pela Plato Internacional, possui uma fábrica com a capacidade de produção de 15 000 m³ localizada em Arnhem (Holanda), sendo que em 2007, foram produzidos 7000 m³.

Na França, o processo Rectification foi desenvolvido pela École des Mines de Saint-Etienne, e a patente adquirida pela Companhia NOW (New Option Wood), também conhecida como RETITECH, cuja industrialização teve início em 1997 e a madeira é vendida com a marca Retiwood, porém, não existem dados sobre os volumes de madeira tratada e vendida. Já o processo Bois Perdure pertence à companhia BCI- MBS, que em 2003 abriu uma unidade em St-Ambroise (Quebeque) e outra em Cacouna (Quebeque). Em 2005 abriu em Dolbeau (Quebeque) uma unidade pertencente à empresa Kisis Technologies. Da mesma forma que na

tecnologia Rectification, não informa dados sobre o volume de madeira tratada e comercializada.

Na Alemanha a primeira fábrica, propriedade da companhia Menz Holz, em Reulbach na Alemanha, iniciou-se em Agosto de 2000, existindo atualmente 3 companhias na Alemanha: a Menz Holz que produziu 800 m³ em 2007, a Thermoholz que produziu 4.000 m³ e a Bad Essen (Hagensieker) que tem a capacidade de produzir 10.000 m³ da madeira tratada, e atualmente já se encontra em funcionamento embora não existam estatísticas das quantidades comercializadas.

2.3 Fatores condicionantes do processo

Para Pincelli et al. (2002), a ação dos vários processamentos industriais da madeira pelo calor, pode-se dar de forma mais ou menos intensa, segundo as transformações estruturais necessárias pelos constituintes da madeira. No entanto, nem sempre esse é, isoladamente, o único responsável pelas modificações sofridas pela madeira, podendo existir fatores adicionais, influenciando o processo, tais como: o tempo de tratamento, a velocidade de aquecimento, a pressão utilizada, etc.

Para Korkut et al. (2008) a temperatura tem uma influência maior que a duração do tratamento sobre muitas propriedades da madeira, sendo que tratamentos a menores temperaturas, por longos períodos, não fornecem, contudo, resultados similares a tratamentos com temperaturas mais elevadas.

Cabe informar ainda que a extensão das alterações nas propriedades da madeira durante o tratamento térmico, depende da espécie de madeira, da umidade inicial, da atmosfera circundante e do tempo de exposição à temperatura máxima utilizada (KORKUT e BEKTAS, 2008).

No que se refere à atmosfera circundante, no decorrer do processo, Wangaard (1950), cita que o comportamento da degradação da madeira é diferenciado, conforme o meio de aquecimento utilizado. Na presença de vapor, a madeira pode ser mais facilmente degradada do que na presença de água líquida, que, por sua vez, é maior que a degradação, em função apenas da temperatura, sendo que esse fenômeno ocorre, porque as hemiceluloses e celulose são despolimerizadas via hidrólise, na presença da água, sendo esta a principal causa de perda da resistência à degradação por estes polímeros.

Hillis (1975) corrobora com Wangaard (1950) ao afirmar que a madeira é degradada mais rapidamente quando aquecida na presença de vapor ou água, quando comparada ao tratamento em condições secas.

Para Yildiz et al. (2006), o aquecimento da madeira na presença de ar também tende a promover reações de degradação, porque a taxa de degradação térmica é também dependente da atmosfera circundante, especialmente com relação a presença ou ausência de oxigênio.

Stamm (1956) mostrou que a madeira aquecida em atmosfera com a presença de oxigênio é degradada mais rapidamente que a madeira aquecida em atmosfera livre desse, devido às reações de oxidação.

Esteves et al., (2008), explica que isso acontece porque o ácido acético, produzido nesse processo, atua como um catalizador das reações de depolimerização, e isso é possível, visto que existe um alto conteúdo de ácido acético liberado num ambiente oxidante.

De acordo com Johansson (2008), diferenças na degradação dos componentes da madeira também têm sido encontradas entre amostras tratadas em sistemas abertos e fechados. Isso é porque existirá um acúmulo de compostos como o ácido acético em sistemas fechados, que podem então interagir com as reações químicas ocorrendo. Para o mesmo autor, existem interações não apenas entre os componentes encontrados dentro da madeira, mas também interações entre a madeira e a atmosfera de tratamento.

O resultado do tratamento térmico é altamente dependente da presença de oxigênio e água. A presença do primeiro levará a reações de oxidação, que podem ser prevenidas pelo tratamento em uma atmosfera inerte como óleo, nitrogênio, água ou vapor. O uso de vapor é um modo eficiente e econômico de criar uma atmosfera inerte, mas que também influencia as reações que ocorrem durante o tratamento (JOHANSSON, 2008).

Segundo Severo e Tomaselli (2003), em alta umidade relativa a madeira degrada predominantemente por hidrólise ácida e a taxa de degradação, nesse caso, é maior que a degradação térmica ou pirolítica. Na primeira, a água faz com que sejam quebrados os grupos acetilas, com a formação de ácido acético, responsável pela degradação da madeira. Deve-se, no entanto, considerar que o excesso de água reduz a quantidade de oxigênio no ar, podendo retardar a reação da hidrólise.

2.4 Efeitos do tratamento térmico e modificações nas propriedades da madeira

Segundo Figueroa (2008), na faixa de temperatura em que se encaixa a termorreificação, ocorre uma decomposição térmica parcial dos constituintes hemicelulose, celulose e lignina, visto que a sua volatilização intensa somente vai acontecer em distintas faixas de temperatura: hemiceluloses entre 200 e 300°C, celulose entre 240 e 350°C e lignina entre 250 e 300°C.

Para Poncsak et al. (2006), a hemicelulose degrada primeiro (entre 160 e 260°C), devido ao seu baixo peso molecular e estrutura amorfa (menos densa), o que facilita a sua mais rápida degradação comparada com outros componentes presentes na madeira; a eliminação da hemicelulose ramificada, com temperatura entre 160 e 220°C, resulta em um aumento no índice de cristalinidade da celulose. Contudo, a temperaturas maiores que 220°C, esta sofre redução também. De acordo com o mesmo autor, a celulose é composta de cadeias lineares que podem cristalinizar e a hemicelulose, possui uma estrutura ramificada amorfa. Já a lignina, segundo Morey (1980) é um polímero rígido e estável.

Entre os componentes do material madeira, as hemiceluloses têm demonstrado ser os menos estáveis, por isso pode ser facilmente degradada nos estágios iniciais do aquecimento, resultando em perda direta da resistência da madeira. Essa perda de resistência das hemiceluloses a ação de temperaturas elevadas deve-se à ausência de cristalinidade, baixa massa molecular, configuração irregular e ramificada, o que facilita a absorção de água e, conseqüentemente a degradação (SEVERO e TOMASELLI, 2003).

A Figura 1 ilustra uma seção longitudinal hipotética de uma fibrila elementar, com destaque para a região amorfa e cristalina. Os elementos longos representam as moléculas da celulose.

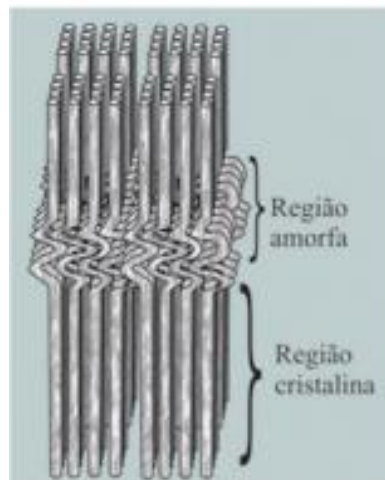


Figura 1 – Representação das zonas amorfas e cristalinas de uma fibrila elementar (Adaptado de SILVA et al., 2009).

Assim, dependendo da temperatura máxima aplicada, diferentes tipos de reações químicas podem ocorrer na madeira: desidratação, depolimerização, degradação, termo-oxidação, levando a alterações químicas nos principais constituintes da madeira, o que resulta em mudanças nas propriedades físicas e mecânicas, assim como, a reatividade química das substâncias formadas (PARYSEK e ZAKRZEWSKI, 2006).

As mudanças desejáveis iniciam aproximadamente aos 150°C e continuam com o aumento da temperatura em estágios (GUNDUZ et al., 2009). Mas, segundo Esteves et al., (2008), a temperatura, à qual a degradação começa, depende da massa molecular e cristalinidade dos componentes da madeira.

A Figura 2 ilustra a magnitude das alterações provocadas aos constituintes celulose, hemicelulose, lignina e extrativos da madeira, a partir da temperatura de 0°C até a temperatura de carbonização. Dentro da faixa em que se encaixa o tratamento de retificação térmica (120 a 200°C), observa-se que a hemicelulose sofre alterações consideradas fortes, a celulose pequenas alterações e a lignina com princípio de fortes alterações químicas.

Embora a lignina comece a sofrer alterações químicas e estruturais severas em um patamar anterior a celulose, essa reação é mais lenta, ultrapassando os limites da temperatura de torrefação da madeira, por isso, vem a ser considerada como mais resistente a ação de altas temperaturas.

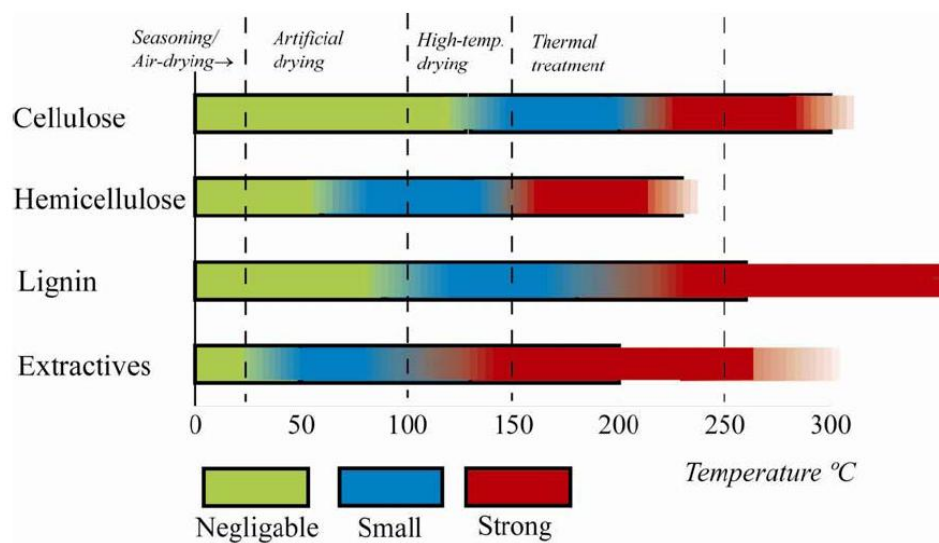


Figura 2 – Mudanças decorrentes do tratamento térmico nos componentes da madeira (Adaptado de SUNDQVIST, 2004).

A Figura 2 pode ser melhor compreendida pela observação do Quadro 1, elaborado por Schaffer (1973), que apresenta as alterações sofridas pela madeira quando submetida a temperaturas superiores a 50 °C.

Temperatura (°C)	Alterações na Madeira
55	A estrutura natural da lignina é alterada. A hemicelulose começa a amolecer.
70	Começa a retração transversal da madeira.
110	A lignina lentamente começa a perder peso.
120	O teor de hemicelulose começa a diminuir, e alfa celulose começa a aumentar. A lignina começa a amolecer.
140	A água de impregnação é liberada.
160	A lignina se funde e começa a ressolidificar.
180	A hemicelulose começa rapidamente a perder peso depois de ter perdido 4 %. A lignina da membrana de pontuação escoa.
200	A madeira começa perder peso rapidamente. As resinas fenólicas começam a se formar e celulose a se desidratar.
210	A lignina solidifica. A celulose amolece e despolimeriza-se. As reações endotérmicas transformam-se em exotérmicas.
225	A cristalinidade da celulose diminui é retomada.
280	A lignina atinge 10 % de perda de peso. A celulose começa a perder peso.
288	Temperatura adotada para carbonização da madeira.
300	O cerne amolece irrecuperavelmente.
320	A hemicelulose é completamente degradada.
370	A celulose tem perda de 83 % do seu peso inicial.
400	A madeira é completamente carbonizada.

Quadro 1 – Alterações sofridas pela madeira durante o tratamento térmico (Adaptado de SCHAFFER, 1973).

Para Figueroa (2008), o efeito do aquecimento sobre os polímeros da madeira pode ser classificado em cinco diferentes fases. A primeira fase situa-se entre a temperatura ambiente e 100°C, e corresponde à saída da chamada água-livre e água higroscópica da madeira, que permanecia retida no lume e parede das células, respectivamente. A segunda fase ocorre entre 100 e 250°C que continua com a eliminação da água higroscópica, adsorvida junto às hidroxilas das cadeias de polissacarídeos e da lignina, além da chamada água de constituição, cuja eliminação é acompanhada por uma degradação irreversível da madeira, sobretudo de seus grupos hidroxílicos. Por fim, a terceira fase situa-se entre 250 e 330°C, na qual ocorre, em geral, a destruição da hemicelulose; a quarta fase situa-se entre 330 e 370°C, em que se supõe ocorrer à destruição da celulose e na quinta e última fase manifesta-se a temperaturas acima de 370°C, quando o carvão vegetal é produzido e está fortemente ligada ao início da degradação da lignina.

As alterações são acompanhadas por várias mudanças desejáveis nas propriedades físicas, incluindo a redução da contração e inchamento, diminuição do conteúdo de umidade de equilíbrio, melhora na resistência às intempéries, coloração escura decorativa e superior resistência ao apodrecimento (KORKUT e BEKTAS, 2008).

De acordo com Jones e Hill (2007), as propriedades da madeira que são modificadas pelos tratamentos de calor incluem: mudança na coloração, a qual transita entre escura e marrom; redução do conteúdo de umidade de equilíbrio em até 50%; redução da contração e inchamento entre 50 e 90%; aumento da durabilidade natural; e redução nas propriedades mecânicas em até 30%.

O comportamento hidrofílico da madeira pode ser melhor explicado pela Figura 3. Os polímeros da parede das células da madeira são constituídos de celulose, hemicelulose e lignina, que contém grupos hidroxilos (OH) por onde ocorre a interação com a água. Se a madeira ganha umidade do ambiente circundante, abaixo do PSF, as moléculas de água se instalam entre esses polímeros da madeira, formando pontes de hidrogênio entre os grupos hidroxilos e moléculas individuais de água que, necessitando de espaço entre os componentes da parede da célula, causam o afastamento das microfibrilas de celulose, resultando no inchamento da madeira (HOMAN et al., 2000).

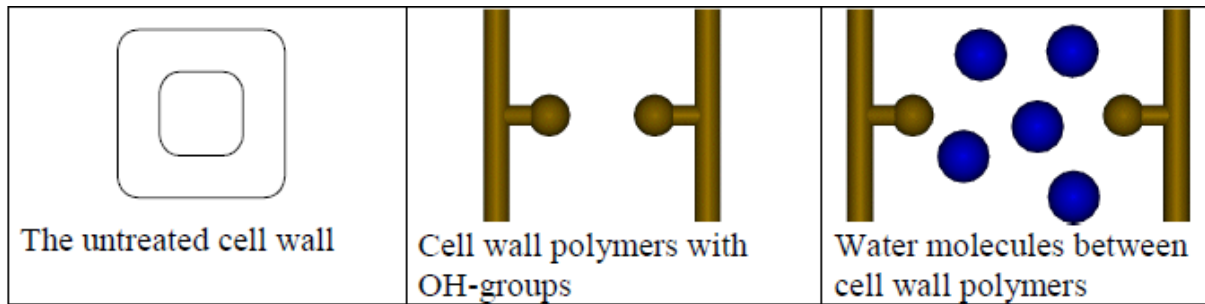


Figura 3 - Interação das moléculas de água com os grupos OH pelos polímeros da madeira (Adaptado de HOMAN et al., 2000).

Durante o aquecimento, os polissacarídeos mais hidrofílicos da madeira (hemiceluloses) volatizam-se, reduzindo os grupos hidroxílicos livres (OH), onde normalmente se fixariam moléculas de água (MOURA et al., 2008).

A redução da higroscopicidade da madeira acontece, pela modificação da estrutura química de alguns de seus componentes, em maior ou menor grau, impedindo a reabsorção de água (Poncsak et al. 2006).

Para Charani et al. (2007), a redução da acessibilidade da água aos grupos OH livres presentes nas moléculas de hemicelulose, tem efeito mais pronunciado sobre as propriedades físicas da madeira, conduzindo para uma limitada interação com a água em comparação com a madeira não tratada pela ação do calor.

Segundo Homan et al. (2000), o tratamento de termorreificação da madeira age sobre essas regiões dos polímeros da madeira, provocando alterações, seja por fenômenos como recombinação (cross-linking), substituição dos grupos OH por outros de caráter hidrofóbico, eliminação de grupos OH ou indesejável quebra de cadeias (Figura 4), todas resultando em restrição da capacidade da madeira de trocar água com o meio circundante.

Segundo Poncsak et al. (2006), a substituição dos grupos OH por outros de caráter hidrofóbico é devido, nesses tratamentos, o número de grupos OH hidrofílicos sofrer redução e por serem substituídos por grupos hidrofóbicos O-acetil. De acordo com Sundqvist (2004), esses grupos são formados pela degradação da hemicelulose, e liberados da madeira na forma de ácido acético.

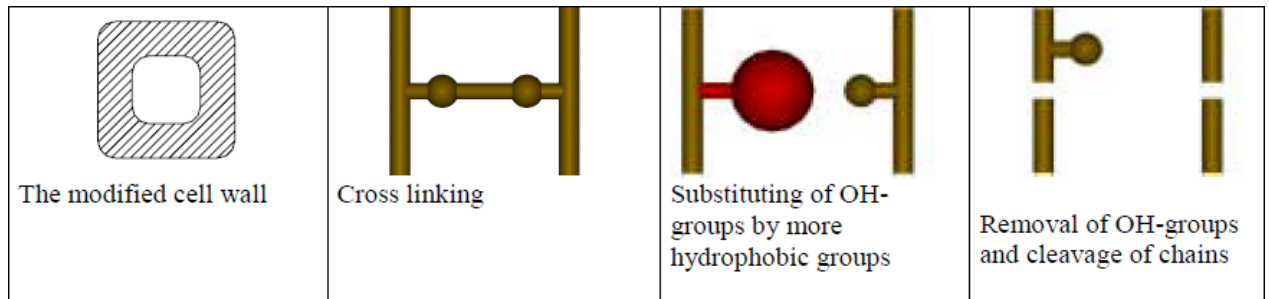


Figura 4 – Tipos de modificações dos polímeros da parede da célula pelo tratamento térmico da madeira (Adaptado de HOMAN et al., 2000).

Transformações como essas são responsáveis pela menor higroscopicidade da madeira de modo que a umidade de equilíbrio alcançada pela madeira tratada pode estabilizar por volta de 4 – 5% de umidade, enquanto que, a não-tratada, alcança valores entre 10 – 20%, quando submetida às mesmas condições. Entretanto, o material passa a apresentar maior porosidade depois de tratada e quando é mergulhada em água pode absorver mais de 20%, no entanto, quando seca, novamente, perde água facilmente (VERNOIS, 2000).

Os benefícios do tratamento térmico sobre a resistência ao apodrecimento da madeira têm sido relatados por muitos autores. De acordo com Weiland e Guyonnet (2003), existem três principais razões para esse aumento de durabilidade: o tratamento térmico estimula a formação de novas substâncias, os quais atuam como biocida, modificando o substrato que passa a não ser mais reconhecido pelos fungos; e degrada a hemicelulose, a principal fonte de alimento dos fungos.

Para Silva et al. (2008), a melhor durabilidade da madeira tratada, termicamente contra o ataque de fungos, pode ser explicada por quatro razões diferentes: geração de novos extrativos, durante o tratamento térmico que pode atuar como fungicida; modificação química dos polissacarídeos e lignina da madeira, que leva a uma inibição das enzimas digestivas dos fungos, decorrente da perda de capacidade dessas enzimas em reconhecer o seu substrato; significativa degradação das hemiceluloses que constituem uma das principais fontes de nutrientes para os fungos e, por fim, um aumento na característica hidrofóbica da madeira, que reduz a absorção de água, o que não favorece o desenvolvimento de certos fungos.

No que se refere à resistência ao ataque de cupins, Pessoa (2002) constatou que o tratamento de termorreificação não foi suficiente para oferecer total imunidade a estes agentes, apesar dos menores danos à madeira, bem como o aumento da mortalidade de insetos, a medida da elevação da temperatura de termorreificação.

A resistência da madeira a intempéries é resultado da superior resistência da superfície das peças a molhabilidade, adquirida pelo tratamento, com início a temperatura de 135°C e, aumentando ligeiramente nos estágios seguintes com a elevação da temperatura. Esteves e Pereira (2009) sugerem que as possíveis razões para a mudança na interação da superfície da madeira com a água, aconteça devido a um aumento da cristalinidade da celulose, a modificação na conformação dos arranjos dos biopolímeros da madeira resultado da perda de água residual ou mais a partir da plasticização da lignina. Para o mesmo autor, a consequência dessa maior resistência da madeira a ação de intempéries é decorrente do significativo aumento do ângulo de contato das gotas de água com a superfície da madeira tratada sob calor.

Segundo Mohebbi e Sanaei (2005), muitas das técnicas usadas para aumentar as propriedades desejáveis da madeira, como o uso de preservativos químicos e biocidas, tintas absorventes de radiação UV, etc., têm impactos negativos sobre o meio ambiente, por esta razão, desde as últimas décadas os pesquisadores estão em busca de técnicas para modificar a estrutura química da madeira e materiais lignocelulósicos para alcançar melhores propriedades.

Portanto, a modificação térmica da madeira é uma maneira ecologicamente correta de acesso a modificação da estrutura química da parede das células da madeira, para se alcançar um aumento de estabilidade dimensional e resistência biológica, sem a adição de substâncias químicas protetivas (KOCAEFE et al., 2007).

A retificação térmica da madeira, apesar de melhorar a resistência ao apodrecimento e a estabilidade dimensional, tem efeito de redução das propriedades mecânicas. Portanto, os parâmetros do tratamento devem ser otimizados para manter essa perda em um nível mínimo, enquanto melhora outras propriedades, sendo que disso vai depender o uso final da madeira (PONCSAK et al., 2006).

As mudanças ocorridas na estrutura da madeira em temperaturas inferiores a 160°C são desprezíveis (SILVA et al., 2008).

A madeira se torna mais rígida e frágil, e certas propriedades mecânicas reduzem-se, dependendo dos parâmetros, como: temperatura máxima de tratamento, taxa de aquecimento, duração do tratamento à temperatura máxima e umidade, podem aparecer rachaduras e a estrutura da parede celular pode ser parcialmente degradada, também; assim, otimizações individuais desses parâmetros

podem ser conduzidas separadamente, para cada tipo de madeira, e, até o mesmo tipo tratado em diferentes condições, podendo ter diferenças significantes em sua estrutura celular; portanto, exigindo diferentes condições de tratamento (PONCSAK et al., 2006).

Além disso, um dos fatores que contribuem para a perda de resistência é que o tratamento de termorreificação resulta em perda de peso pela madeira, dependendo da temperatura e tempo de exposição ao tratamento (GUNDUZ et al., 2009).

Segundo Esteves e Pereira (2009), a degradação das hemiceluloses, em produtos voláteis, e a evaporação de extrativos sejam as principais razões para a redução da massa específica da madeira. Durante a termorreificação há uma perda de umidade de aproximadamente 30% de massa, constituída pelos subprodutos, provenientes da degradação da madeira e da umidade contida na mesma, sendo esta massa composta por 50,4 % de água, 20,7% de condensáveis (ácido pirolenhoso, furfural, ácido acético) e 28,9% de gases não condensáveis (CO₂, N₂, CO) (AZEVEDO e QUIRINO, 2006).

A degradação da hemicelulose também tem sido proposta como o principal fator para a perda de resistência mecânica da madeira, bem como a cristalinidade da celulose amorfa (ESTEVES e PEREIRA, 2009).

Segundo o mesmo autor, o menor conteúdo de umidade de equilíbrio pode afetar positivamente as propriedades de resistência da madeira tratada, mas esse efeito é superado pela degradação dos componentes químicos da madeira.

Porém, conforme Azevedo e Quirino (2006), os resultados dos estudos demonstrando o efeito da temperatura nas propriedades mecânicas da madeira, até o momento, mostram-se contraditórios em alguns aspectos, principalmente no que diz respeito aos benefícios ou prejuízos causados pela temperatura. Essa divergência nos resultados está relacionada principalmente às diferentes formas, com as quais foram conduzidos os tratamentos.

De acordo com Unsal et al. (2003), em relação as propriedades de resistência, o efeito é claramente alcançado com tratamentos prolongados, observando-se um menor efeito sobre o módulo de elasticidade e, maior, sobre a resistência ao impacto e à flexão estática (MOR).

De acordo com Vernois (2000), dependendo da madeira utilizada, as propriedades mecânicas a temperaturas de até 210°C permanecem com valores

próximos dos originais. Já à temperatura de 230°C decréscimos nos módulos de ruptura (MOR), podem chegar perto de 40%, tornando-a mais frágil e quebradiça. Em espécies de maior densidade, essa redução é mais acentuada, devido à tendência do tratamento térmico induzir a formação de rachaduras nas peças.

A madeira tratada pelo calor também adquire uma coloração escura similar a maioria das madeiras tropicais, o qual é uma vantagem estética para muitas aplicações (ESTEVES et al., 2008).

De acordo com Johansson (2008), essa mudança de cor frequentemente é vista como um efeito positivo, especialmente em hardwoods, já que a mudança de coloração cria um potencial para a madeira alcançar novos mercados onde são mais normalmente utilizadas.

Para o mesmo autor, a coloração adquirida pela madeira informa, em linhas gerais, a qualidade do tratamento térmico utilizado, como a previsão de várias mudanças nas propriedades da madeira, como alterações químicas e perda de resistência e de massa devido à degradação térmica.

A parede das células da madeira é uma estrutura complexa formada por camadas de celulose, hemicelulose e lignina e, em menor quantidade, compostos orgânicos como pentosanas, sendo que, no tratamento térmico, as cadeias de moléculas desses polissacarídeos sofrem diferentes mudanças, dependendo do tipo de molécula e nível de temperatura. Em altas temperaturas, os grupos acetilas de hemicelulose reagem formando o ácido acético que divide as cadeias de celulose em pequenas partes e, ao mesmo tempo, o calor produz reações de desidratação e oxidação na celulose e causa condensação da lignina. Essas reações geram combinações que alteram drasticamente as propriedades mecânicas e químicas da madeira. O escurecimento da madeira é devido à combinação das reações acima (SILVA et al. 2008).

Atualmente, esse efeito é considerado como um dos principais argumentos para adoção dessa tecnologia, pois espécies com irregularidades naturais de cores, tornam-se esteticamente e tecnologicamente valiosas e, portanto, atrativas para uso na confecção de parquet, pela possibilidade de se obter diferentes cores acastanhadas, pela variação de parâmetros do processo (ZIVKOVIC et al., 2008).

Korkut et al. (2008), verificou uma redução da aspereza da superfície das amostras tratadas em função da intensidade do tratamento, o que se traduz em um maior acabamento de superfície em madeira que serão submetidas ao

resseramento. Ainda destaca que o tratamento térmico resultou em uma plasticização da superfície da madeira sólida e que altas temperaturas, acima de 160°C, leva a lignina a uma condição termoplástica e, assim, densifica e compacta superfície da madeira sólida.

As mudanças decorrentes do tratamento sobre as propriedades da superfície da madeira, melhora sua compatibilidade com componentes orgânicos, como as resinas ou polímeros, o que facilita as operações de impregnação, aderência, fabricação de derivados e o uso de produtos para revestimento de superfície (AZEVEDO e QUIRINO, 2006).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Obtenção e preparo do material

As madeiras de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e *Pinus taeda* L. foram obtidas de plantios pertencentes à Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária – FEPAGRO FLORESTAS, localizada em Boca do Monte, distrito de Santa Maria – RS.

Para cada espécie foram amostradas três árvores, com aproximadamente 25 anos de idade e, de cada uma, retiradas as duas primeiras toras com 2 m de comprimento, das quais se obteve duas pranchas de dimensão 7,0 x 20,0 cm (espessura x largura) diametralmente opostas (Figura 5), pelo método de desdobro tangencial, utilizando uma serra-de-fita vertical.

Em seguida, essas pranchas foram encaminhadas ao Laboratório de Produtos Florestais da UFSM e, com auxílio de uma serra circular, realizada a confecção dos corpos-de-prova correspondentes a todas as avaliações.

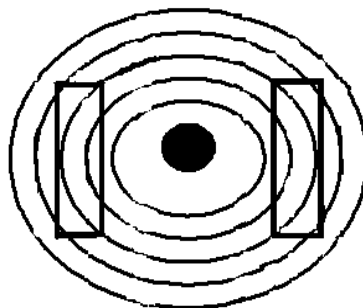


Figura 5 - Esquema de extração das duas pranchas por tora

Após esta etapa, os corpos-de-prova permaneceram em câmara climatizada a temperatura de 20°C e umidade relativa de 65%, até alcançarem peso constante, considerado como ponto de partida para o início dos tratamentos de termorreificação, ao passo que as peças consideradas testemunhas permaneceram na câmara climatizada.

Para cada espécie utilizada, a madeira foi submetida a 2 tratamentos de termorreificação: madeira tratada previamente em autoclave e, após um período de climatização, submetida ao tratamento em estufa (denominado combinação) e madeira tratada somente em estufa (denominado estufa), além da testemunha

(madeira sem tratamento), num total de 3 tratamentos. A temperatura e duração dos tratamentos de termorreificação constam na Figura 6. O tempo de duração dos tratamentos passou a ser contabilizado depois de atingida a temperatura requerida.

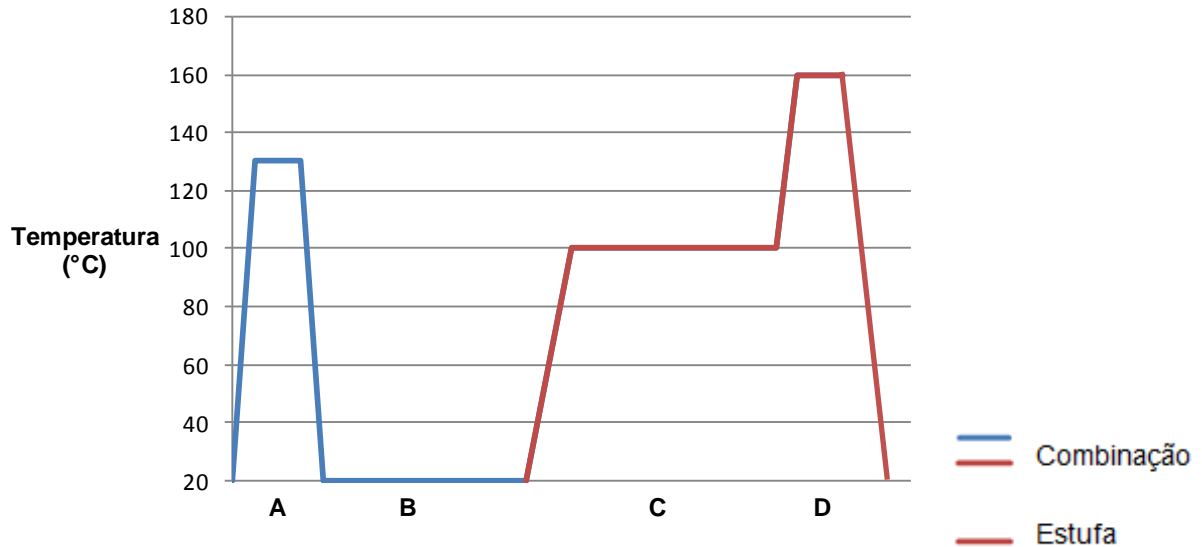


Figura 6 - Fases dos tratamentos de combinação e estufa. Tratamento de termorreificação em autoclave a temperatura de $130^{\circ}\text{C}/\pm 3^{\circ}\text{C}$ e pressão de $2 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ por 3 horas (A); Período de condicionamento em câmara climatizada a 20°C 65% UR até peso constante (B); Secagem prévia em estufa a $100^{\circ}\text{C}/\pm 1^{\circ}\text{C}$ por 24 horas (C); Tratamento de termorreificação em estufa elétrica a $160^{\circ}\text{C}/\pm 1^{\circ}\text{C}$ por 3 horas (D) (Fonte: o autor).

Para o tratamento térmico do material, utilizou-se uma autoclave de laboratório com dimensões internas aproximadas de $79 \times 85 \times 125 \text{ cm}$ (capacidade de 225 l) e uma estufa elétrica, com circulação de ar e controle digital de temperatura (Figuras 7 e 8).

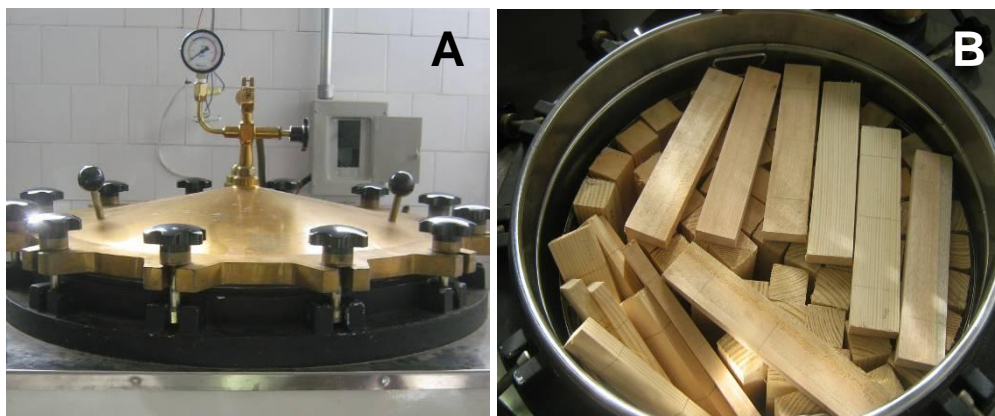


Figura 7 - Vista externa (A) e interna (B) da autoclave utilizada no tratamento de termorreificação combinado (Fonte: o autor).



Figura 8 - Vista externa (A) e interna (B) da estufa utilizada no tratamento de termorreificação (Fonte: o autor).

Depois de submetidos aos tratamentos de termorreificação, os corpos de prova retornaram à câmara de climatização e permaneceram sob tal condição até novo equilíbrio higroscópico com o meio, que foi considerado como ponto de partida para início das avaliações.

3.2 Ensaio físicos

Para a realização dos ensaios físicos foram utilizados corpos de prova de 2,5 x 2,5 x 5,0 cm, com orientação na direção radial, tangencial e axial, respectivamente, e consistiram na determinação das seguintes variáveis:

3.2.1 Perda de massa

Essa determinação se deu apenas para as peças submetidas aos tratamentos de termorreificação (combinação e estufa), e consistiu na determinação do peso constante das amostras em câmara climatizada (20°C e 65% de umidade relativa), anteriormente a termorreificação, e pela pesagem imediata das peças, depois de finalizado o tratamento, ambas utilizando uma balança digital.

$$R = \frac{M_{NT} - M_T}{M_{NT}} \times 100$$

Equação 1.

R = Perda de massa, %; M_{NT} = Massa da madeira antes do tratamento de termorreificação, g; M_T = Massa da madeira após o tratamento de termorreificação, g.

3.2.2 Redução de massa específica

Para esta determinação, tomou-se como base a diferença entre a massa específica das peças em equilíbrio com as condições da câmara climatizada (20°C e 65% UR), antes do tratamento de termorreificação, e após o tratamento, com o acondicionamento das mesmas peças. A massa dos corpos de prova foi determinada em balança digital e o volume com auxílio de paquímetro digital.

$$\rho = \frac{M_{12\%}}{V_{12\%}}$$

Equação 2.

ρ = massa específica das amostras antes e após o tratamento de retificação térmica na umidade de equilíbrio de 12% (20°C e 65% UR), g/cm³; M = massa das amostras na mesma condição, g; V = volume das amostras na mesma condição, cm³.

3.2.3 Taxa de absorção de água

Este procedimento teve início após estabilização de massa do material tratado e não tratado em câmara climatizada a 20°C e 65% de umidade relativa. Todas as peças foram submetidas de 2 a 4 ciclos (imersão/secagem), que consistiram de: imersão total das amostras em água por 24 horas, utilizando uma bacia plástica, seguida de secagem do material em estufa a 60°C até peso constante.

Assim, determinou-se ao final de cada condição, o peso das amostras em balança digital e, com base nestes dados analisado o comportamento das amostras dos três tratamentos, após comparação entre o primeiro e o último ciclo quanto às seguintes variáveis:

$$t = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100$$

Equação 3.

t = taxa de absorção de água das amostras, %; M_u = massa das amostras após imersão em água por 24 h, g; M_s = massa das amostras secas em forno a 60°C, g.

3.2.4 Efetividade de repelência à água (ERA)

Com base nos valores de taxa de absorção das amostras tratadas sob as duas condições (combinação e estufa) e não tratada (testemunha), calculou-se a efetividade de repelência à água atribuída ao tratamento de termorreificação.

$$ERA = \frac{t_1 - t_2}{t_1} \times 100$$

Equação 4.

ERA = efetividade de repelência à água, %; t_1 = taxa de absorção de água das amostras não tratadas; t_2 = taxa de absorção de água das amostras teste.

3.2.5 Coeficiente de inchamento volumétrico

Essa determinação deu-se nas direções radial, tangencial e axial, de modo que, ao final de cada etapa de mergulho das amostras em água, bem como, ao final da secagem em estufa a 60°C, fossem tomadas as medições sobre a mesma posição, com auxílio de paquímetro digital.

$$I = \left(\frac{V_2 - V_1}{V_1} \right) \times 100$$

Equação 5.

I = coeficiente de inchamento volumétrico, %; V_2 = volume da madeira tratada após mergulho em água por 24 h, cm^3 ; V_1 = volume da madeira, após secagem a 60°C, cm^3 .

3.2.6 Eficiência Anti Inchamento (EAI)

Com base no cálculo anterior foi determinada a existência de redução do inchamento das peças atribuído ao tratamento térmico.

$$EAI = \left(\frac{I_2 - I_1}{I_2} \right) \times 100$$

Equação 6.

EAI = eficiência anti inchamento, %; I_1 = coeficiente de inchamento volumétrico da madeira tratada, %; I_2 = coeficiente de inchamento volumétrico da madeira não tratada, %;

3.2.7 Inchamento linear

Com base nos valores obtidos para as direções tangencial e radial nas medições executadas para cálculo da variável anterior, determinou-se o inchamento linear nos dois planos, ao final de cada ciclo para os 3 tratamentos utilizados.

$$IL = \frac{L_u - L_s}{L_s} \times 100$$

Equação 7.

IL = Inchamento, %; L_u = Dimensão tangencial ou radial, após imersão em água por 24h, mm; L_s = Dimensão tangencial ou radial, após secagem a 60°C, mm.

3.2.8 Coeficiente de Anisotropia de inchamento

Com base no cálculo anterior para o inchamento linear nos planos tangencial e radial calculou-se também o coeficiente de anisotropia ao final de cada ciclo de avaliação.

$$C.A = \frac{IT}{IR}$$

Equação 8.

C.A = coeficiente de anisotropia; IT = Inchamento tangencial, %; IR = Inchamento radial, %.

3.2.9 Massa específica aparente

Com base no peso e volume das amostras, determinados em cada etapa de secagem das mesmas em estufa até peso constante, foram calculadas suas massas

específicas, para verificação de alguma oscilação, no decorrer dos ciclos de avaliação.

$$\rho = \frac{M}{V}$$

Equação 9.

ρ = massa específica das amostras, na condição de secagem a 60°C, g/cm³; M = peso das amostras nessa condição, g; V = volume das amostras, cm³.

3.2.10 Umidade de equilíbrio

Para esta determinação depois de finalizadas as avaliações descritas anteriormente, as amostras foram secas em estufa a 103°C até massa constante e, com base no peso constante do material em câmara climatizada, obtido antes do início das avaliações, calculou-se o teor de umidade de equilíbrio das amostras dos 3 tratamentos.

$$UE = \frac{M_C - M_0}{M_0} \times 100$$

Equação 10.

UE = Umidade de equilíbrio na condição de 20°C e 65% de umidade relativa, %;

M_C = Massa constante na condição de equilíbrio higroscópico, g; M₀ = Massa constante na condição de secagem em estufa a 103°C, g.

3.3 Ensaio de resistência mecânica

Na confecção dos corpos de prova para os ensaios de resistência mecânica, tomou-se o cuidado de identificá-los com a numeração da ripa, obtida no desdobro das pranchas e sequência de retirada nessa (Figura 9), de maneira a, posteriormente, distribuir os corpos de prova adjacentes entre os tratamentos, evitando o efeito da posição diametral e longitudinal nos pranchões sobre os resultados.

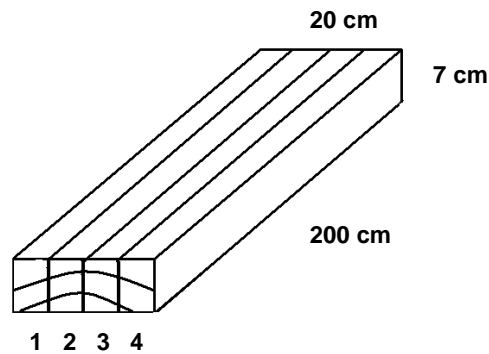


Figura 9 - Corte das ripas de madeira usadas na confecção dos corpos de prova.

Na Tabela 2 constam as propriedades mecânicas testadas com respectiva dimensão dos corpos-de-prova.

Tabela 2 – Testes mecânicos empregados na avaliação das peças tratadas e testemunha, juntamente com a respectiva dimensão (cm) dos corpos-de-prova orientados segundo os 3 planos anômicos .

Propriedade	Dimensões
Módulo de Elasticidade (MOE) e Ruptura (MOR) em flexão estática	2,5 x 2,5 x 41 cm*
Dureza de Janka	5,0 x 5,0 x 15,0 cm*
Resistência máxima em compressão paralela às fibras	5,0 x 5,0 x 20,0 cm*
Resistência máxima ao impacto	2,0 x 2,0 x 30 cm**

*= Segundo a norma ASTM 143 (ASTM, 1994); **= Segundo a norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

Essas peças, depois de tratadas sob as condições já citadas, retornaram a sala de climatização e, após novo condicionamento à umidade de equilíbrio de 12%, foram submetidas aos testes mecânicos, conforme procedimentos preconizados pela norma ASTM D 143 (ASTM, 1994), em máquina universal de ensaios hidráulica com capacidade de 20 ton. (Figura 10A). Já o teste de resistência máxima ao impacto, cujo procedimento seguiu a norma NBR 7190 (ABNT, 1997), foi executado em um equipamento denominado Pêndulo de Charpy (Figura 10B).

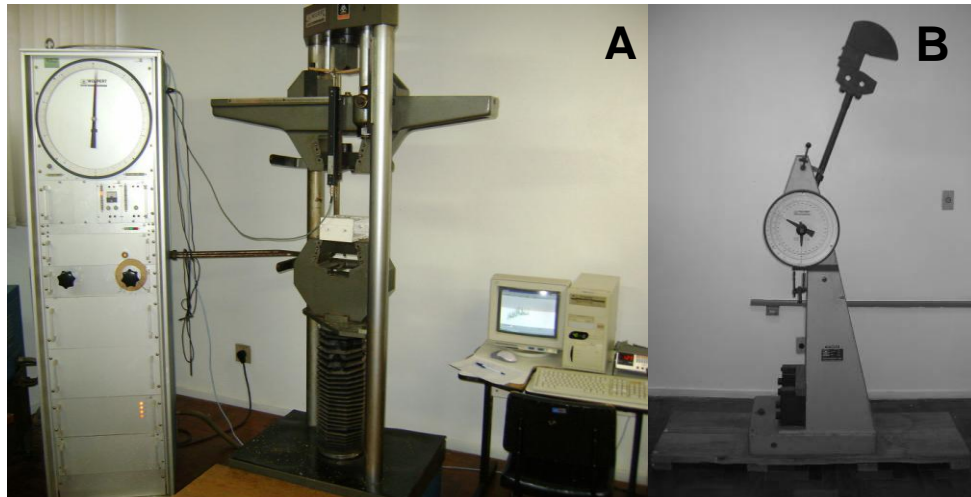


Figura 10 - Máquina universal de ensaios hidráulica (A), e Pêndulo de Charpy (B), utilizados nos ensaios de resistência mecânica (Fonte: o autor).

3.4 Ensaio de resistência biológica

O ensaio de apodrecimento acelerado foi conduzido no Setor de Biodegradação e Preservação da Madeira do Laboratório de Produtos Florestais (LPF), em Brasília, DF, seguindo a metodologia proposta pela norma ASTM D 2017 (ASTM, 2005).

Para tanto, corpos-de-prova de dimensão 2,5 x 2,5 x 41,0 cm foram confeccionados e, após o tratamento, resserados no sentido longitudinal, para obtenção de corpos-de-prova nas dimensões 2,5 x 2,5 x 0,9 cm. Para cada tratamento foram ensaiadas 36 peças, sendo 12 para podridão-branca (*Trametes versicolor* (Linnaeus ex Fries) Pilat, 12 para podridão-parda (*Gloeophyllum trabeum* (Persoon. ex Fries) Murr.) e 12 blocos de correção. Esses últimos foram introduzidos em frascos de ensaio não inoculados (sem fungos) e receberam o mesmo tratamento e manipulação dos demais, com objetivo de determinar a perda de massa resultante da manipulação dos corpos-de-prova e oscilações no teor de umidade, antes e após o ataque e, portanto, para determinar a perda de massa não atribuída à ação dos fungos.

3.5 Análise estatística

Os dados referentes ao presente estudo foram processados e analisados de forma eletrônica, a partir da construção de um banco de dados utilizando-se o

programa Excel® 2000, e de um programa de análise específico para o cumprimento dos objetivos da pesquisa, o software Statistical Package for Social Science 15.0 (SPSS).

As médias das variáveis foram analisadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade de erro e o método não-paramétrico de Kruskal-Wallis, adotado quando observada não normalidade dos dados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Efeito do tratamento térmico nas propriedades físicas

4.1.1 Perda de massa

A percentagem de perda de massa provocada pelas duas metodologias de tratamento térmico aplicado nas madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis* é mostrada na Figura 11. Observa-se que a perda de massa foi muito similar para as duas espécies com relação ao tratamento utilizado, verificando-se que os valores médios de redução de massa foram ligeiramente maiores nas peças tratadas pela combinação do uso de autoclave e estufa elétrica.

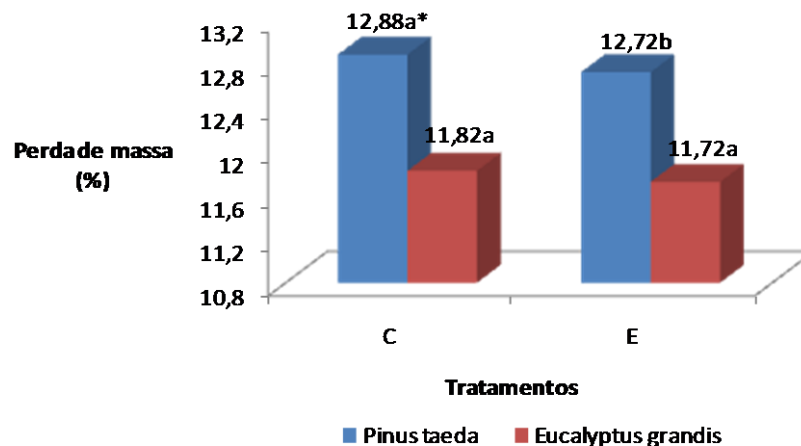


Figura 11 - Perda de massa provocada pelo tratamento de termorreificação nas madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis*. (C=Combinação; E=Estufa). *= Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Observa-se que as médias entre 11,7% e 12,9% encontradas para as duas espécies estão acima dos valores indicados pela patente do processo Thermowood da Finlândia, que segundo Esteves et al. (2008), recomenda uma perda de massa mínima de 3% para aumentar a estabilidade dimensional e ao menos de 5% para incrementar a durabilidade natural da madeira.

Mohebbi e Sanaei (2005) esclarecem que a perda de massa sofrida pelas madeiras tratadas termicamente provavelmente pode estar relacionada à pirólise

leve e/ou deterioração dos polímeros da parede da célula, especialmente as hemiceluloses.

Valores inferiores de perda de massa, comparativamente com o presente trabalho foram registrados por Brito et al. (2008), avaliando as madeiras de *P. caribaea* var. *hondurensis* e *E. saligna*, tratadas a 180°C em condições secas, com uma redução de massa de 9,6% e 8,7%, respectivamente.

4.1.2 Redução de massa específica

A redução média da massa específica nos dois tratamentos térmicos empregados é mostrada na Figura 12. Observam-se para ambas as espécies que as maiores percentagens de redução de massa específica, ocorreram nas peças tratadas pelo método combinando autoclave e estufa elétrica. Para a madeira de pinus, esse tratamento promoveu o dobro em redução de massa específica em relação ao tratamento em estufa. Já para a madeira de eucalipto, a redução de massa específica, resultante para esse tratamento, foi aproximadamente três vezes maior que o tratamento em estufa.

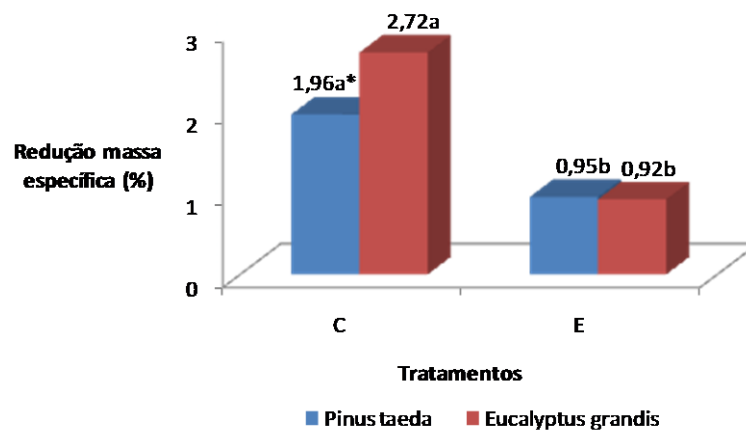


Figura 12 - Redução de massa específica advinda do emprego dos tratamentos térmicos sobre as madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis* (C=Combinação; E=Estufa). * = Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Valores superiores de redução em massa específica foram encontrados por Charani et al. (2007), estudando os efeitos do tratamento de termorreificação a

madeira de *Fagus orientalis*, aplicado a temperatura de 160°C, por 3h, na presença de vapor de água. Os autores encontraram uma redução de 5,17% na massa específica a 12%, para a madeira de dessa espécie.

Já valores mais próximos de redução foram obtidos por Gunduz et al. (2009B), ao submeterem a madeira de *Abies nordmanniana* subsp. *bornmülleriana* Mattf. a 170°C, por 4h, em forno, que obtiveram para as mesmas condições controladas uma redução de massa específica de 1,96%.

Em tratamento térmico empregando condições próximas a utilizada na presente pesquisa, temperatura de 160°C, por um período de 2 e 4 h, em atmosfera seca, Gunduz et al. (2009a), encontraram mesma percentagem de redução de massa específica aproximadamente em 2,66% para os dois tempos de duração.

Unsal et al. (2003), encontraram para a madeira de *E. camaldulensis* tratada a 150°C, por 2 h, uma redução dessa variável em 4,41%, bem superior ao registrado para a madeira de *E. grandis*.

Esteves e Pereira (2009), acreditam que a redução da massa específica da madeira após o tratamento térmico, tem como razões a degradação da hemicelulose em produtos voláteis, bem como a evaporação dos extrativos.

4.1.3 Umidade de equilíbrio

Na Figura 13, constam os teores de umidade de equilíbrio da madeira das duas espécies para os três tratamentos, após estabilização do peso em condições controladas de temperatura e umidade relativa.

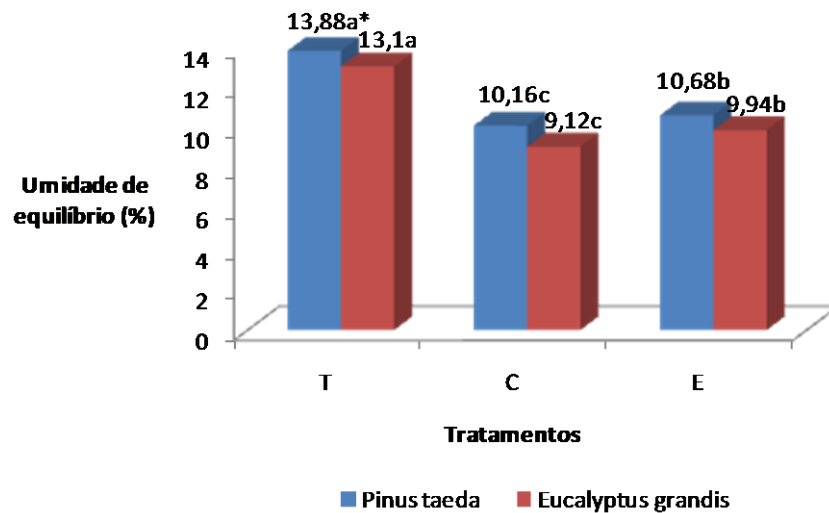


Figura 13 - Umidade de equilíbrio obtida em câmara climatizada em condições controladas (temperatura de 20°C e umidade relativa de 65%). (T=Testemunha; C=Combinação; E=Estufa). *= Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Observa-se que o tratamento de termorreificação, pelas duas metodologias testadas, foi eficiente na redução da umidade de equilíbrio para ambas as espécies, traduzindo-se em uma restrição da capacidade das madeiras em trocar umidade com o meio circundante. Em pinus, essa redução foi de 26,80% e 23,05% para o tratamento combinado e em estufa, respectivamente, em relação a madeira sem tratamento, passando no eucalipto, a uma redução mais acentuada, em 30,38% e 24,12% para os mesmos tratamentos. Ou seja, para ambas as espécies o tratamento combinado foi mais eficiente na redução da umidade de equilíbrio das peças.

Valores de redução similares e na ordem de 20,3%, 17,9%, 15,9%, e 25,5% foram encontrados por Akyildiz e Ates (2008), em madeiras de *Quercus petraea* Lieb., *Castanea sativa* Mill., *Pinus brutia* Ten. e *Pinus nigra* Arnold., tratadas em estufa a 180°C, por 2 horas.

Assim como na presente pesquisa, em que a madeira de *P. taeda* sofreu uma menor redução do seu teor de umidade de equilíbrio em relação à madeira de *E. grandis*, o autor também observou o mesmo comportamento para a madeira de *Pinus brutia* Ten., em relação as demais, e justifica que isso aconteceu devido a presença de resina na madeira desta espécie.

Já Azevedo e Quirino (2006), também trabalhando com a madeira de *E. grandis*, submetida ao tratamento térmico em autoclave a temperatura de 160°C, por 2h, e à mesma condição de equilíbrio a aqui utilizada, observaram uma redução na higroscopicidade em 18,17%, inferior aos valores observados no presente estudo, em ambos os tratamentos empregados.

Borges e Quirino (2004), com a madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, empregando o mesmo tratamento térmico anterior, observaram uma redução de 21,20% no teor de umidade em relação as amostras de referência, portanto mais próximo aos obtidos para a madeira de *P. taeda*.

A diminuição da umidade de equilíbrio deve-se à menor quantidade de água adsorvida pelas paredes da célula em consequência da mudança química, com uma diminuição de grupos hidroxilo, mas também devido à diminuição da acessibilidade por aumento da cristalinidade da celulose e aumento das ligações cruzadas na lignina que por sua vez levam a um aumento da estabilidade dimensional (BOONSTRA e TJEERDSMA, 2006).

4.1.4 Taxa de absorção de água, inchamento volumétrico e massa específica em cada ciclo de mergulho/secagem da madeira

Na Figura 14, constam as percentagens de absorção de água e inchamento volumétrico correspondente, da madeira de *P. taeda* e *E. grandis*, juntamente com as variações de massa específica a 12% de umidade, apresentadas no decorrer dos ciclos de mergulho das amostras em água e posterior secagem em estufa.

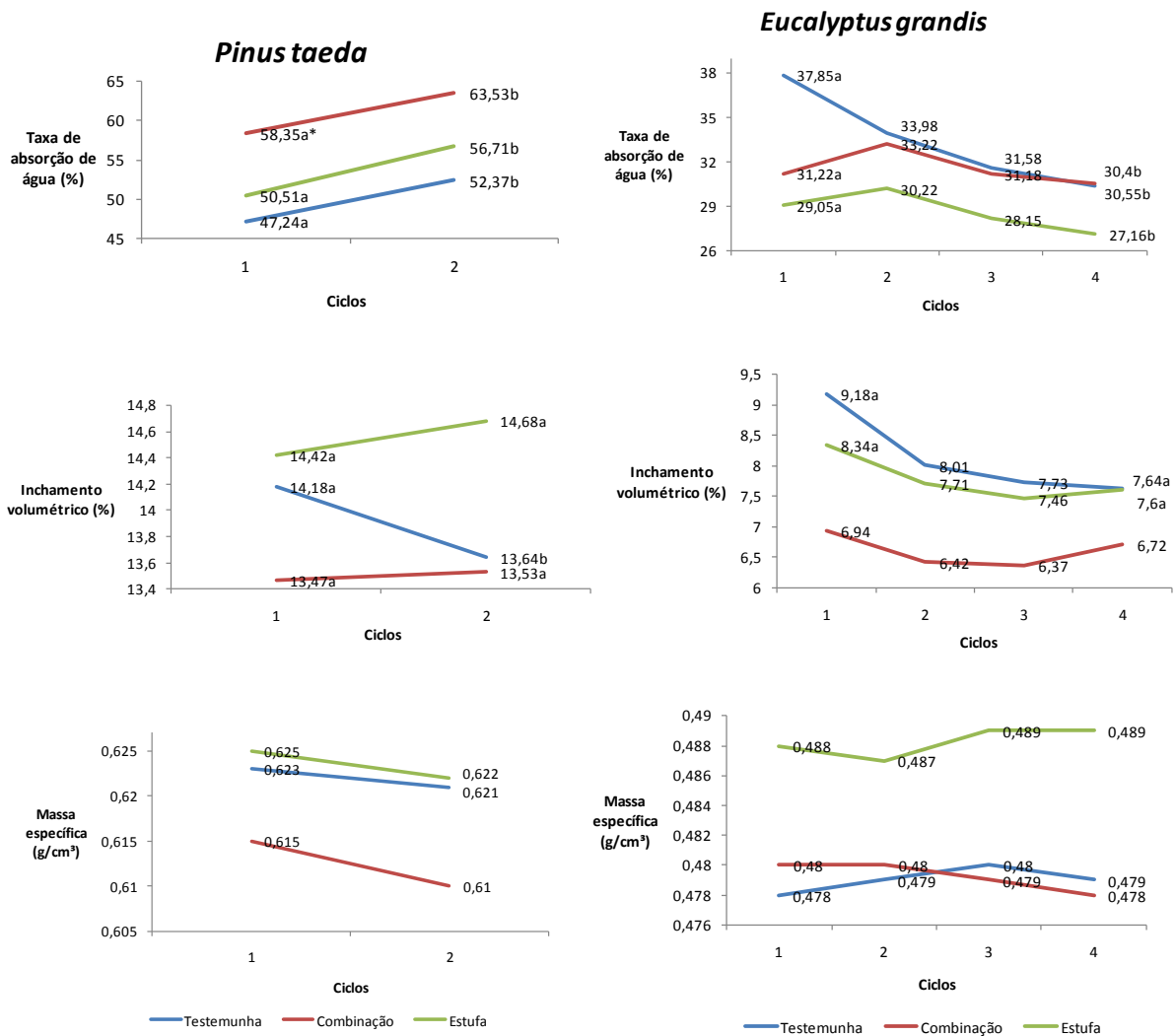


Figura 14 - Taxa de absorção de água, inchamento volumétrico e massa específica da madeira de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis* no decorrer dos ciclos. *= Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

A madeira de pinus apresentou uma grande quantidade de rachaduras já ao final do 2º ciclo de mergulho das amostras em água e, posterior, secagem em estufa, o que impossibilitou a continuidade das observações. Segundo Esteves e Pereira (2009), as madeiras de coníferas são as mais suscetíveis a rachaduras tangenciais na porção de lenho adulto e nas porções de anéis anuais estreitos e/ou de abrupta transição entre lenho primaveril e outonal.

Com relação a essa madeira, o efeito do tratamento térmico não foi o esperado. Nos tratamentos de combinação e em estufa, o aumento da taxa de absorção de água, foi acompanhado por um correspondente aumento do

inchamento volumétrico das peças. Já a testemunha, embora também tenha apresentado um aumento da taxa de absorção do 1º para o 2º ciclo, demonstrou correspondente redução do inchamento volumétrico.

Quanto ao comportamento da madeira de eucalipto, percebe-se um efeito mais claro dos benefícios dos tratamentos de termorreificação, sobre a redução da higroscopicidade da madeira, visto que a testemunha apresentou valores de inchamento volumétrico superiores e, correspondentes a taxa de absorção de água sofrida em comparação com as madeiras tratadas.

Já para os tratamentos de termorreificação, observa-se um comportamento inverso entre os ciclos 1 e 2, em que houve uma redução do inchamento volumétrico das peças, embora essas tenham absorvido uma quantidade maior de umidade. Nos ciclos seguintes há uma redução do inchamento promovido por uma correspondente redução da taxa de absorção e, ao final da avaliação, fica clara a perda da eficiência do tratamento térmico, com o aumento do inchamento volumétrico das peças, embora a absorção de água tenha sofrido redução.

Para Mohebbi e Sanaei (2005), a absorção de água pelas madeiras tratadas pelo calor acontece, porque a madeira se torna mais porosa devido a rachaduras de raios e remoção das hemiceluloses. Já a redução na absorção de água pelas amostras não tratadas está relacionada ao fenômeno de histerese que acontece na madeira quando do emprego dos ciclos.

Já Esteves e Pereira (2009), sugerem que as dimensões dos poros da madeira aumentam com o tratamento térmico, talvez devido a remoção dos componentes da parede celular, embora os autores não tenham encontrado grandes diferenças entre as dimensões das células. Esse fato pode indicar o motivo pelo qual a madeira tratada sofre uma maior absorção de água.

Para Charani et al. (2007), geralmente a absorção de água diminui para todas as madeiras tratadas termicamente por exemplo, para a madeira tratada em condições hidrotérmicas; mas quando rachaduras vão surgindo, são a causa do aumento da absorção de água, resultante dos danos causados a estrutura física da madeira pelo aumento da temperatura do tratamento.

Porém os mesmos autores concluíram, que a absorção de água não teve um aumento absolutamente paralelo ao acréscimo da duração e temperatura do tratamento, já que na pesquisa utilizando diferentes combinações desses parâmetros, concluiu que as amostras tratadas em condições de temperatura menos

drástica sofreram maiores taxas de absorção de água que outras mais elevadas e que certos tratamentos passaram a absorver uma menor quantidade de água em relação a testemunha.

Por isso, salientam que esse comportamento se deu aos efeitos primários do tratamento sobre a estrutura química das amostras que causaram a redução da higroscopicidade da madeira.

Quanto à massa específica, verifica-se para ambas as espécies, que as oscilações foram bastante sutis, podendo ser atribuídas ao procedimento de medição, não mostrando uma tendência que pudesse ser indicada como tendo influenciado o comportamento higroscópico das amostras.

A menor massa específica, quando observada em amostras tratadas, após o último passo de mergulho das amostras e secagem pode estar relacionada à lixiviação de extrativos formados durante o tratamento térmico (MOHEBBY e SANAEI, 2005).

4.1.5 Efetividade de Repelência à Água (ERA) e Eficiência Anti Inchamento (EAI)

Com relação às alterações promovidas pelos tratamentos térmicos em comparação com as amostras testemunha, os efeitos podem ser mais claramente compreendidos pela visualização da Figura 15, em que constam os resultados dos testes de efetividade de repelência à água (ERA) e eficiência anti inchamento (EAI) da madeira de *P. taeda* e *E. grandis*, juntamente com o teste de médias. Os valores são correspondentes ao primeiro e último ciclos de avaliação apenas das madeiras submetidas às duas metodologias de tratamento térmico.

Segundo Norimoto e Gril (1993) citado por Del Menezzi (2006), um valor de 0% destas variáveis significa que o tratamento não teve qualquer efeito sobre a estabilização dimensional, um valor negativo significa um efeito deletério do tratamento (aumento da movimentação dimensional), enquanto um valor de 100% significa madeira perfeitamente estabilizada e, portanto, alta eficiência do tratamento aplicado.

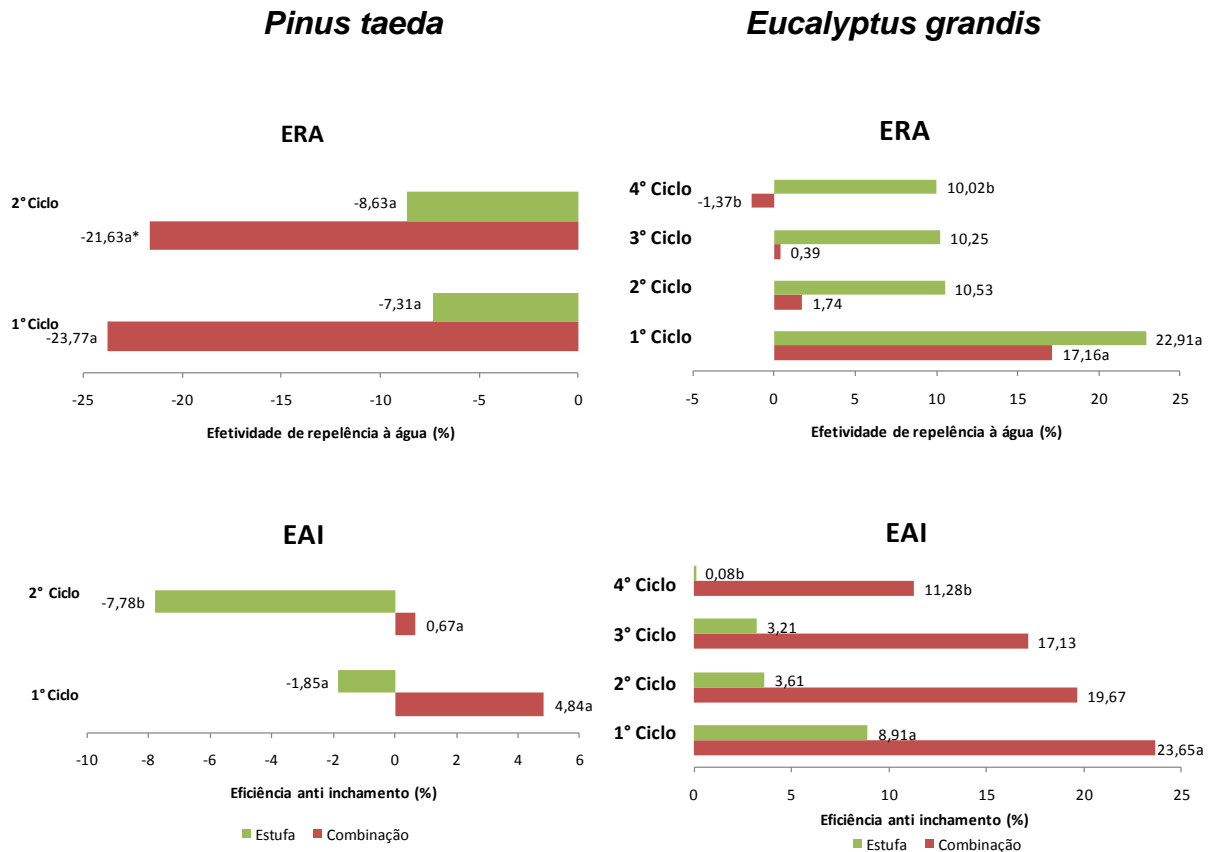


Figura 15 - Valores de Efetividade de Repelência à Água (ERA) e Eficiência Anti Inchamento (EAI) apresentados pela madeira de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis* no 1° e último ciclo de avaliação. *= Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Para a efetividade de repelência à água da madeira de pinus, observa-se que os tratamentos de termorreificação favoreceram a absorção de água pela madeira, refletida pelos valores negativos apresentados pela variável, principalmente naquelas tratadas pelo método de combinação, que tenderam a promover um aumento da efetividade ou redução da absorção de água do 1° para o 2° ciclos.

Já no tratamento em estufa a absorção de água favorecida pelo tratamento foi bem mais reduzida e, ao contrário do tratamento de combinação, tendeu a um pequeno aumento de absorção, ou redução da efetividade ao longo dos mesmos ciclos.

Quanto a eficiência anti inchamento da madeira tratada dessa espécie, fica claro a maior vantagem do tratamento de combinação sobre a estabilização dimensional das peças, com uma redução do inchamento volumétrico, constatada

pelos valores positivos dessa variável, que sofreram uma drástica redução da eficiência entre os ciclos. Já o tratamento em estufa resultou em um aumento da instabilidade dimensional das peças, bastante acentuada do 1º para o 2º ciclos, de tal forma que os valores diferiram estatisticamente entre si, conforme consta na Tabela 12 do Apêndice 7.

Para a efetividade de repelência à água da madeira de eucalipto observa-se que ambos os tratamentos promoveram efeitos positivos, principalmente pelo tratamento em estufa, cujos valores também sofreram uma menor redução ao longo dos últimos ciclos, mantendo-se com valores de efetividade acima de 10%. Já no tratamento de combinação a efetividade foi menor e sofreu também uma redução bem mais acentuada ao longo das avaliações, chegando a ter um efeito deletério no último ciclo de avaliação.

Quanto a eficiência anti inchamento sobre a madeira dessa espécie, o tratamento de combinação agregou uma maior estabilidade dimensional às peças, mantendo-se com uma redução do inchamento acima de 10%, enquanto no tratamento em estufa a eficiência foi bem mais reduzida chegando ao último ciclo a produzir efeito quase nulo.

Mohebbi e Sanaei (2005) encontraram para a madeira de *Fagus orientalis* Lipsky tratada a 160°C por 4 h na presença de vapor, valores de EAI de 11% após o último ciclo de imersão/secagem das amostras, praticamente o mesmo valor encontrado para a madeira de *E. grandis* no presente estudo.

Já o valor de 23,65% encontrado no 1º ciclo para a madeira de *E. grandis* é similar aos 24% de EAI encontrado por Santos (2000), que trabalhou com madeira de *Eucalyptus*, mas a temperatura de 180°C, sem mencionar o tempo.

As percentagens de redução de inchamento volumétrico encontradas entre o 1º e último ciclos de avaliação foram inferiores aos relatados por Charani et al. (2007), que observaram para a madeira de *Fagus orientalis* tratada a 160°C por um período de 3 h na presença de vapor, uma EAI no 1º ciclo de aproximadamente 35% reduzindo para uma percentagem de 18,99% após o 7º ciclo de imersão/secagem das amostras.

Esses autores, no mesmo trabalho, ao empregar diferentes tempos e temperaturas de tratamento, também observaram uma redução da EAI das amostras com a aplicação de mais de um ciclo consecutivo, como os empregados às amostras, após o tratamento.

Nas Tabelas 9 a 16 do Apêndice 7 são apresentadas a Análise de variância para a ERA e EIA para as duas espécies estudadas em função dos tratamentos térmicos aplicados.

4.1.6 Inchamento linear e anisotropia de inchamento

Nas Figuras 16 e 17 constam as médias de Inchamento Tangencial (IT), Inchamento Radial (IR) e Coeficiente de Anisotropia (CA) da madeira de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis* obtidas nos ciclos de imersão/secagem para cada tratamento.

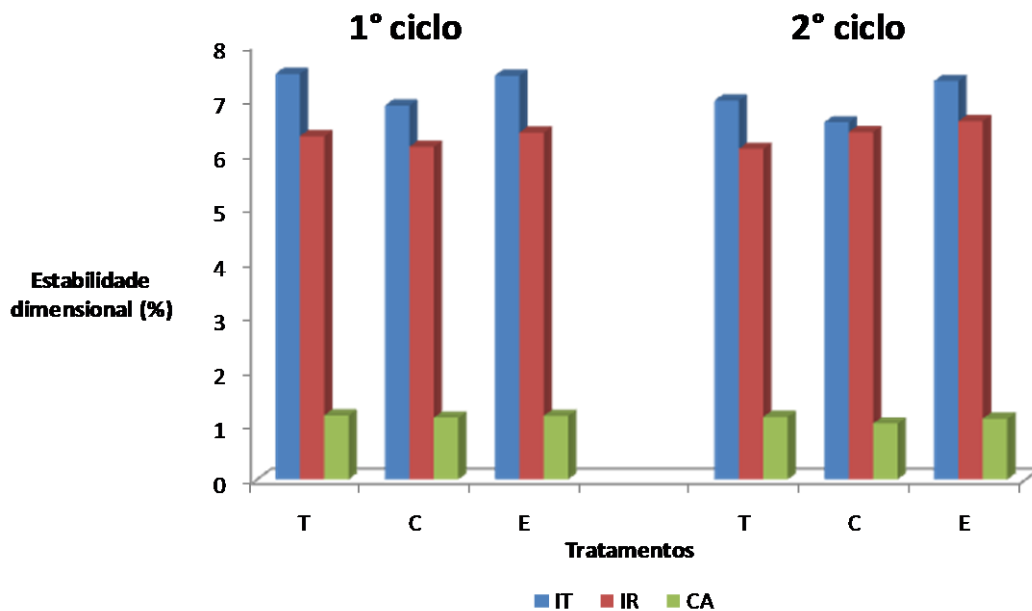


Figura 16 - Valores de Inchamento Tangencial (IT), Inchamento Radial (IR) e Coeficiente de Anisotropia (CA) da madeira de *Pinus taeda* em razão dos ciclos de avaliação. (T= testemunha; C= combinação; E= estufa).

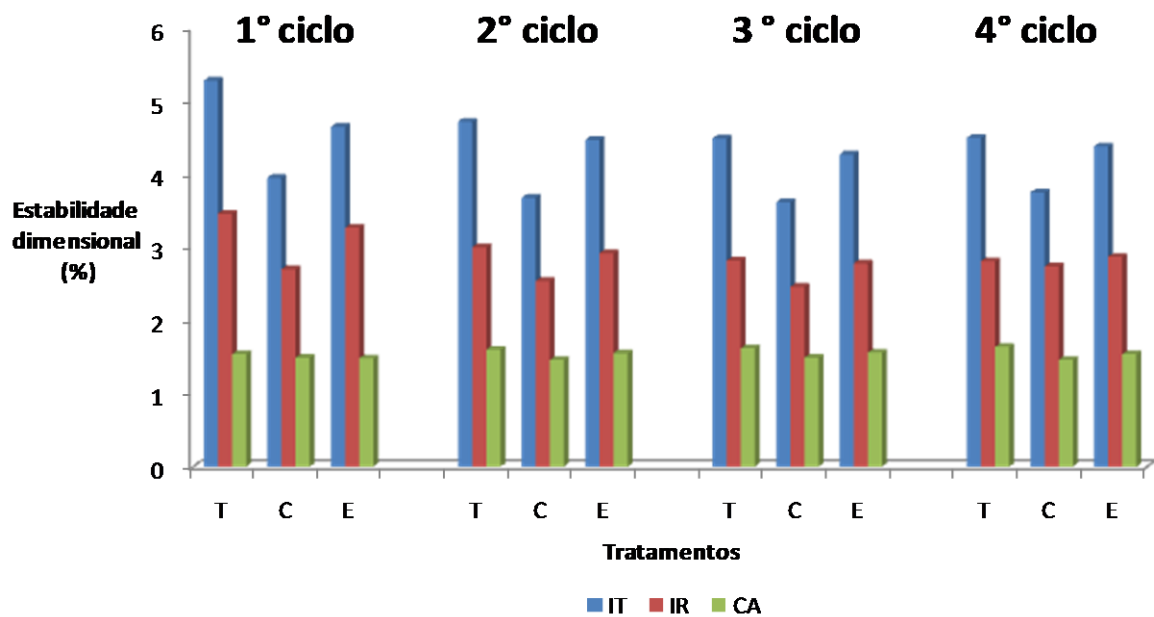


Figura 17 - Valores de Inchamento Tangencial (IT), Inchamento Radial (IR) e Coeficiente de Anisotropia (CA) da madeira de *Eucalyptus grandis* em razão dos ciclos de avaliação. (T= testemunha; C= combinação; E= estufa).

Os valores observados na Figura 16 para *P. taeda* mostram que o tratamento de combinação promoveu uma restrição do inchamento tangencial das peças, tanto no primeiro como no segundo ciclo, com reduções de 7,8% e 5,7%, respectivamente, em relação às madeiras sem tratamento. Já no tratamento em estufa a variação dimensional conferida pelo tratamento térmico nessa mesma direção, no 1º ciclo, foi praticamente o mesmo da testemunha, traduzindo-se num aumento quase nulo da estabilidade dimensional das peças nessa direção. No 2º ciclo já se observa um aumento da movimentação dimensional das peças em 5,2% por esse tratamento.

Quanto ao inchamento radial (IR) observa-se que o tratamento em estufa continuou ineficiente no aumento da estabilidade dimensional da madeira, visto que os valores encontrados foram superiores a testemunha em 1,1% no 1º ciclo, passando no 2º ciclo a um acréscimo da movimentação dimensional em 8,4%. O método combinado no 1º ciclo reduziu o inchamento radial em 3%, porém no 2º ciclo, o tratamento passou a promover um aumento em 5,1% da movimentação dimensional das peças nesse plano.

Valores inferiores de redução foram encontrados por Ates et al. (2009), em estudo com madeira de *P. brutia*, tratada a 180°C por 2h, com percentagens de redução no inchamento tangencial e radial de 2,6 e 2,4%, respectivamente.

Esteves e Pereira (2009) trabalhando com madeira de *Pinus sylvestris* tratada a 200°C em ar quente, também encontraram uma maior estabilidade dimensional para o plano tangencial até 2,7%, seguido da direção radial, com valor de 1,95%.

No geral, para a anisotropia de inchamento, ambos os tratamentos promoveram uma redução dessa variável, principalmente pelo método combinado, com percentagens de redução de 3,4% no 1º ciclo, aumentando para 10,4% no 2º ciclo. Para o tratamento em estufa, essa redução também presente, embora inferior, foi também mais acentuada no 2º ciclo, com percentagens de 0,9% e 2,6%, respectivamente.

Assim, a anisotropia de inchamento foi reduzida do 1º para o 2º ciclo pelos dois tratamentos empregados, refletindo-se num maior equilíbrio das movimentações dimensionais entre o plano tangencial e o radial, conferido pelos tratamentos térmicos.

Na Figura 17 percebe-se que a redução do inchamento tangencial da madeira de eucalipto foi mais acentuada pelo tratamento de combinação, com valor superior a 25% no 1º ciclo passando a uma redução contínua até a percentagem de redução de 16,7% no 4º ciclo. No tratamento em estufa observou-se a mesma tendência, porém com uma percentagem de redução de 11,9% e finalizando com uma redução em inchamento de 2,7% no último ciclo de avaliação.

Para o inchamento radial, o tratamento combinado foi capaz de produzir uma redução de 22%, que foi reduzida drasticamente ao longo dos ciclos até alcançar uma percentagem de apenas 2,5% de restrição à movimentação dimensional nesse plano. O tratamento em estufa forneceu uma estabilidade dimensional bastante inferior ao tratamento combinado, com valores de inchamento nesse plano apenas 5,5% inferior a madeira sem tratamento, chegando no 4º ciclo a ser observado um inchamento superior ao observado para a testemunha em 2,1%.

A anisotropia de inchamento, da mesma forma que na espécie anterior, foi reduzida principalmente pelo tratamento combinado, e essa redução foi crescente ao longo dos ciclos, começando com valores inferiores a testemunha em 3,2% e finalizando com valores 11% inferiores. O tratamento em estufa resultou em peças com um equilíbrio dimensional nas direções tangencial e radial superior a

testemunha em 3,9%, portanto superior ao observado para o tratamento combinado, porém finalizou com uma percentagem de redução de 6,1%.

Percentagens similares de redução no inchamento foram obtidos por Korkut et al. (2008), estudando os efeitos do tratamento de calor aplicado em estufa a 150°C por 2 e 6h a madeira de *Corylus colurna* L., que registraram para o inchamento tangencial e radial uma redução de 11,36% e 11,64% para o tempo de 2h, respectivamente, e de 8,45% e 9,51% para o tempo de 6h, nos mesmos planos.

Mohebbi e Sanaei (2005) após submeterem a madeira de *Fagus orientalis* ao tratamento térmico a 160°C por 4, 5 e 6 h na presença de vapor de água, e após por um período de 16 horas às mesmas temperaturas sob condições secas, também observaram para todas as condições um decréscimo nos valores de inchamento em relação a testemunha principalmente no plano tangencial. Da mesma forma, as diferenças encontradas entre a testemunha e os tratamentos foram reduzidas do primeiro para o último ciclo, principalmente para a direção radial das peças.

Os autores encontraram, para o tratamento a 160°C por 4 h, valores de inchamento nas direções tangencial e radial da ordem de 6,3% e 3% no 1° ciclo passando no 7° ciclo a valores de 7,8% e 4%.

Para os mesmos autores, esse aumento do inchamento pelas peças pode ser explicado pela lixiviação dos extrativos durante os ciclos em que as amostras foram submetidas, cuja formação ocorreu durante a aplicação de duas condições distintas de tratamento da madeira, resultando, portanto na perda da eficiência do tratamento.

Como observado, Esteves e Pereira (2009), mencionam que apesar da considerável melhora na estabilidade dimensional atribuída ao plano tangencial das peças de madeira, a anisotropia do inchamento ainda permanece na madeira tratada.

4.2 Efeito do tratamento térmico nas propriedades mecânicas

4.2.1 Correção das propriedades mecânicas

Para comparação entre os valores de resistência mecânica, foram corrigidas as propriedades mecânicas das amostras testemunha para o teor de umidade de 12%, relativa à condição de equilíbrio higroscópico, em que as peças foram mantidas, visando eliminar a influência do teor de umidade nos resultados.

Para isso, por uma questão de adequação dos dados, o valor de resistência das amostras testemunha de *Pinus taeda* foram corrigidas por meio da Equação 11, proposta pela USDA (1987), e as amostras testemunha de *Eucalyptus grandis*, com base na Equação 12, proposta pela NBR 7190 (ABNT, 1997).

$$\text{Ln}\sigma = \text{Ln}\sigma_t + \frac{U_t - U}{U_p - U_{12}} \text{Ln} \frac{\sigma_{12}}{\sigma_v}$$

Equação 11.

σ = resistência (ou outra propriedade mecânica); σ_t = Valor da propriedade no teor de umidade ensaiado; U_t = Umidade do corpo de prova no momento do ensaio (%); U = teor de umidade (12%); U_p = logaritmo da relação entre resistência e umidade, considerado 25% para madeiras desconhecidas; U_{12} = teor de umidade (12%); σ_{12} = propriedade da madeira a 12% de umidade (tabelado); σ_v = propriedade da madeira verde (tabelado).

$$f_{12=f_{u\%}} \left[1 + 3 \frac{(U\% - 12)}{100} \right]$$

Equação 12.

f_{12} = Valor da resistência no teor de 12% de umidade; $f_{u\%}$ = Valor da resistência encontrado no teor de umidade ensaiado; $U\%$ = Umidade do corpo de prova no momento do ensaio (%).

As Figuras 18 e 19 mostram a percentagem de alteração das propriedades mecânicas das madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis*, termorretrificadas pelos dois tratamentos utilizados, em relação a testemunha. Os valores negativos e positivos indicam que a média da propriedade da madeira tratada foi, respectivamente, menor ou maior que a média da testemunha.

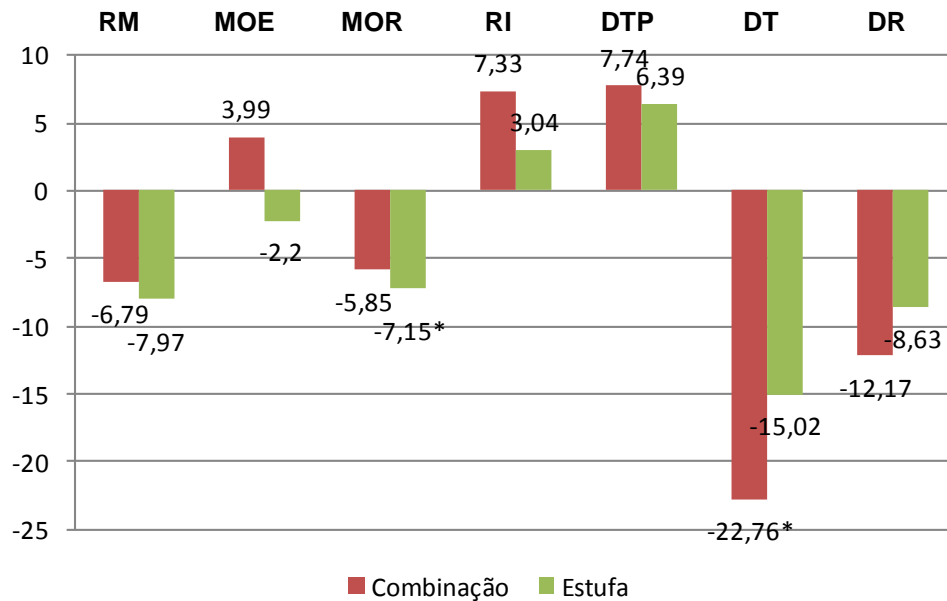


Figura 18 - Percentagem de alteração das propriedades mecânicas da madeira de *Pinus taeda* em relação a testemunha. (RM= Resistência máxima a compressão paralela, kgf/cm²; MOE = Módulo de Elasticidade em flexão estática, kgf/cm²; MOR = Módulo de Ruptura em flexão estática, kgf/cm²; RI = Resistência ao impacto, kJ m²; DTP = Dureza de topo, kgf; DT = Dureza de superfície (tangencial), kgf; DR = Dureza de superfície (radial), kgf; *=médias estatisticamente diferentes da testemunha ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey.

Com relação à resistência máxima a compressão paralela (RM), para a madeira de *Pinus taeda*, o tratamento térmico, embora sem influência significativa, reduziu os valores dessa variável em maior grau para o tratamento em estufa, 7,97%, inferior a testemunha, seguido do tratamento combinado, inferior a testemunha em 6,79%.

Já Yildiz et al. (2006), para a madeira de *Picea orientalis*, tratada a 180°C por 2 h, obtiveram uma redução inferior em aproximadamente 5,90% em relação a madeira sem tratamento.

Porém Boonstra et al. (2007) encontrou um acréscimo no valor de resistência a compressão paralela em estudo com a madeira de *Pinus sylvestris* L., em que a madeira tratada apresentou um valor de resistência superior a testemunha em 28,7%.

Korkut et al. (2007) ao submeterem a madeira de *Pinus sylvestris* L. a temperatura a 150°C por 2 horas encontraram uma redução de 8,02% na resistência máxima a compressão, ou seja, superior a obtida no presente estudo.

Quanto ao MOE da madeira de pinus, constatou-se um aumento devido ao tratamento combinado, superando em 3,99% a carga obtida para a testemunha, ao passo que o tratamento em estufa reduziu o valor dessa propriedade em 2,20%. Esse valor foi praticamente o mesmo encontrado por Esteves et al. (2008), estudando o efeito da temperatura de 180°C por 2h sobre o MOE da madeira de *Pinus pinaster* Aiton. em flexão estática, obtendo uma redução de 2%.

Boonstra et al. (2007), em estudo com a madeira de *Picea abies* Karst, tratada na presença de vapor e pressão a 165°C por 30 min, seguido de tratamento de calor em condições secas e à pressão atmosférica a 180°C por 6 h, também encontrou um acréscimo no MOE da madeira tratada, mas em 5,21%, um pouco inferiores aos aqui registrados.

O MOR em flexão estática para a madeira de pinus foi menor nos dois tratamentos térmicos em relação a testemunha, sendo encontrado no tratamento em estufa uma maior redução (-7,15%), e significativamente diferente da observada para o tratamento testemunha ao nível de 5% de probabilidade, conforme consta na Tabela 22 do Apêndice 8.

O ponto fraco do tratamento é a degradação de algumas propriedades mecânicas. O efeito no MOE é pequeno, mas a diminuição da tensão de ruptura pode ser significativa. A madeira torna-se mais quebradiça com a deterioração das propriedades de fratura devido à perda de polissacarídeos amorfos (ESTEVES e PEREIRA, 2009).

Conforme Tabela 21 do Apêndice 8, observa-se que essa diferença estatística nas resistências entre as madeiras da testemunha e estufa ocorreu de fato devido ao efeito do tratamento empregado, visto que as diferenças estatísticas observadas para a massa específica se deram entre a madeira da testemunha e do tratamento de combinação, que não acusaram diferença estatística entre os valores.

Também estudando o efeito do tratamento sobre o MOR, Boonstra et al. (2007) encontraram no mesmo estudo mas com a madeira de *Pinus sylvestris* L. , uma redução de 3,16% dessa propriedade, atribuída ao tratamento empregado.

Já Korkut et al. (2007), observaram para a madeira de *Pinus sylvestris* L. uma maior redução no MOR, da ordem de 11,08% inferior a madeira sem tratamento.

No que se refere a resistência ao impacto, a madeira de pinus apresentou maiores valores de resistência depois dos tratamentos térmicos, sendo essa diferença mais pronunciada em relação a testemunha no tratamento de combinação.

Para o pinus, o valor de carga para romper a madeira tratada pelo tratamento combinado superou a testemunha em 7,33%, e o tratamento em estufa necessitou uma carga superior em 3,04%.

Nessa espécie, principalmente, bem como na madeira de eucalipto, pode-se observar que os tratamentos empregados, especialmente o de combinação, tornaram as peças quebradiças, devido a força aplicada ter provocado um forte cisalhamento das mesmas, conforme pode ser visualizado nas Figuras 25 e 26 do Apêndice 3.

Johansson (2008) também observou um cisalhamento das amostras submetidas ao teste de resistência ao impacto, e informa que altas temperaturas e longos tempos de duração do tratamento resultam em alta percentagem de fratura de cisalhamento, e essas mudanças no tipo de fratura, são provavelmente devido a redução da resistência entre as fibras, que é altamente dependente da estrutura da lignina. Isso quer dizer que a redução na força de cisalhamento pode ser resultado de fatores como: mudanças na estrutura da lignina, isso é, alteração em como a lignina é unida com a hemicelulose, ou a um aumento da fragilidade devido a um aumento das ligações cruzadas dentro do complexo de lignina.

Já para a dureza de topo da madeira de pinus foi observado maior incremento de carga requerida pelo tratamento combinado, seguido daquele em estufa, proporcionando uma elevação dos valores de carga em 7,74% e 6,39%, respectivamente em relação a testemunha.

Da mesma forma, Ates et al. (2009), após tratarem a madeira de *Pinus brutia* Ten. a 180°C por 2 h também observaram um aumento da dureza de topo em 7% em relação a madeira em condições normais, valor similar ao encontrado para a madeira estudada.

De acordo com Boonstra et al. (2007) o tratamento térmico pode, portanto, contribuir positivamente nas propriedades mecânicas pelo fato de que, a madeira tratada termicamente tem sua capacidade de trocar água reduzida com o meio e, assim, o baixo conteúdo de umidade torna a madeira mais resistente a esforços mecânicos, compensando os efeitos atribuídos a perda de massa. Desse modo, como a madeira tende a perder mais umidade pelos topos o aumento da dureza no plano transversal pode ser justificado.

Com relação ao aumento de algumas propriedades mecânicas verificadas na madeira, Sundqvist (2004), cita que parece possível aumentar ligeiramente a

resistência e dureza da madeira em comparação com a madeira em condições normais dentro de certos domínios da relação tempo/temperatura. Segundo o mesmo autor, um aumento inicial na resistência e dureza podem ser devido aos processos de condensação da lignina e celulose como moléculas degradadas, podendo formar novas ligações químicas.

Quanto a dureza de Janka, nos planos tangencial e radial da madeira de pinus, observa-se que os tratamentos térmicos promoveram a redução nas resistências das peças, mais pronunciada pelo tratamento combinado, cujos valores no plano tangencial diferiram estatisticamente da testemunha, conforme consta na Tabela 27 do Apêndice 8.

Para o ensaio de dureza de Janka no plano transversal, observa-se que as médias obtidas das peças tratadas foram inferiores a testemunha em 22,76% e 15,02% no tratamento combinado e em estufa, respectivamente, e no plano radial esses tratamentos forneceram valores inferiores em 12,17 e 8,63%.

Da mesma forma que para o MOR, pode-se inferir que a diferença estatística apresentada por essa propriedade em relação a testemunha é atribuída ao efeito do tratamento térmico empregado, já que a análise de variância da massa específica média dos corpos de prova de cada tratamento, não acusou diferença estatística entre os mesmos, conforme pode ser observado por meio da Tabela 25 do Apêndice 8.

Sundqvist (2004) cita que a 160°C quase não são observadas mudanças nas propriedades originais da madeira, mas que, entretanto, a dureza é afetada a temperaturas tão baixas quanto essa.

Percentagens de redução similares para a dureza no plano tangencial e radial também foram encontradas por Korkut et al. (2008), para a madeira de *Pinus sylvestris* L., submetida ao tratamento a 150°C. Os autores encontraram reduções em 14,68% e 18,31% no plano tangencial para o tratamento de 2 e 6 h, respectivamente e 10,65% e 13,80% no plano radial.

Em relação ao comportamento da compressão paralela em madeiras tratadas de *Eucalyptus grandis*, percebe-se que, ao contrário de *Pinus taeda*, o tratamento térmico possibilitou maior resistência das peças, visto que o tratamento de combinação apresentou os maiores valores seguido do tratamento em estufa. O tratamento de combinação forneceu um acréscimo dos valores de carga em relação à testemunha em 8,47% e o tratamento em estufa superou em 6,07% a mesma.

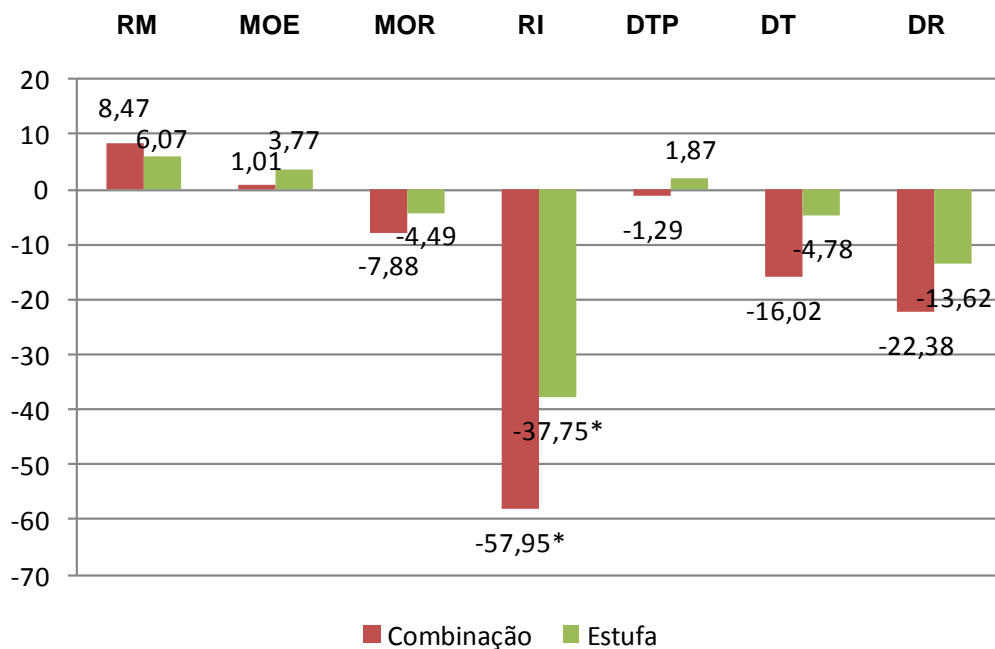


Figura 19 - Percentagem de alteração das propriedades mecânicas da madeira de *E. grandis* em relação a testemunha. (RM= Resistência máxima a compressão paralela, kgf/cm²; MOE = Módulo de Elasticidade em flexão estática, kgf/cm²; MOR = Módulo de Ruptura em flexão estática, kgf/cm²; RI = Resistência ao impacto, kJ m²; DTP = Dureza de topo, kgf; DT = Dureza de superfície (tangencial), kgf; DR = Dureza de superfície (radial), kgf; *=médias estatisticamente diferentes da testemunha ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey.

Efeito contrário foi encontrado por Unsal e Ayrilmis (2005), para a madeira de *Eucalyptus camaldulensis*, com o tratamento térmico aplicado a temperatura de 150°C por 2 e 6h, encontrando uma redução dessa mesma propriedade em 4,29 e 8,40%, respectivamente.

Também Gunduz et al. (2009b), ao submeteram a madeira de *Carpinus betulus* L. ao tratamento em estufa a 170°C por 4 h, encontraram uma carga inferior em 6,54% em relação a madeira sem tratamento.

Efeito diferenciado também foi obtido por Gunduz et al. (2009a), investigando o efeito do tratamento térmico a 160°C por 2 h, a madeira de *Pyrus elaeagnifolia* Pall., encontraram uma redução desta variável na ordem de 7,42%.

Segundo Boonstra et al. (2007) essa maior resistência atribuída ao tratamento térmico pode ser explicada pelo aumento do montante de celulose cristalina altamente ordenada, devido à degradação e/ou cristalização da celulose amorfa.

Essa celulose cristalina mostra significativa anisotropia, e sua estrutura rígida pode ser responsável pelo aumento da resistência à compressão longitudinal. Outra explicação talvez seja devido a um aumento nas ligações cruzadas da rede polimérica da lignina.

Para os mesmos autores, a lignina atua como um reforçador das microfibrilas de celulose, e um aumento da ligação cruzada desse polímero, parece impedir ou limitar o movimento perpendicular a grã (que ocorre durante a compressão paralela a grã). Além disso, a lignina é o principal componente da lamela média e um aumento desse fenômeno melhora a resistência da lamela média que, consequentemente, afeta as propriedades de resistência da peça de madeira como um todo.

Nesse mesmo sentido, Yildiz et al. (2006), examinando as mudanças na estrutura química (celulose, hemicelulose e lignina) da madeira tratada sob diferentes temperaturas e duração do tratamento, concluiu que o conteúdo de lignina, ao contrário da celulose e hemicelulose exibiu um aumento com os tratamentos mais agressivos.

Para o MOE da madeira de eucalipto, os tratamentos pelas duas metodologias forneceram um acréscimo nos valores dessa propriedade, principalmente em estufa, superior em 3,77% seguido do tratamento combinado, 1,01% superior à madeira sem tratamento. Santos (2000) também verificou um aumento no módulo de elasticidade da madeira de eucalipto tratada a 180°C.

Valor intermediário de aumento dessa mesma propriedade foi encontrado por Gunduz et al. (2009), que observaram um acréscimo no MOE em 2,11% para a madeira de *Pyrus elaeagnifolia* Pall., tratada em forno a 160°C por 4 h.

O mesmo autor justifica esse resultado pelo aumento das ligações cruzadas (vinculação) na rede de lignina, uma vez que é esperado que esse fenômeno melhore a estrutura rígida em torno das microfibrilas de celulose e da resistência característica da lamela média, como já citado. Também, outro fenômeno que pode afetar essa propriedade são as propriedades termoplásticas da madeira: acima de certa temperatura as características físicas da hemicelulose (127–235°C), lignina (167–217°C) e celulose (231–253°C) mudam para um estado similar a borracha ou plástico, embora o vapor possa reduzir a extensão destas faixas, devido a água atuar como um agente plastificante. No resfriamento as fases desses componentes se tornam mais rígidas e a estrutura molecular do polímero pode ser alterada, o que

provavelmente afeta a interação entre os principais componentes de madeira e, por conseguinte, as propriedades de resistência.

Esteves e Pereira (2009) inferem que o módulo de elasticidade aumenta com o aumento da cristalinidade da celulose e com a redução do conteúdo de umidade. O efeito da cristalinidade prevalece no início do tratamento, mas com sua continuidade a degradação térmica é dominante, levando a uma redução dessa variável.

Para o MOR também foram observadas reduções nos valores de carga requerida para ruptura, sendo que as maiores reduções se deram pelo tratamento combinado, inferior a testemunha em 7,88%, e o tratamento em estufa com uma redução de 4,49%.

Gunduz et al. (2009) ao tratarem a madeira de *Pyrus elaeagnifolia* Pall. por meio do tratamento térmico por 2 horas a temperatura de 160°C, observaram também uma redução dessa propriedade pelos tratamentos térmicos empregados em 7,56%, bem próximo ao obtido para a madeira de pinus.

A explicação de Boonstra et al. (2007) para esse efeito sobre o MOR é que as mudanças no teor e estrutura da hemicelulose com o tratamento térmico são as principais responsáveis pela perda da resistência da madeira à flexão. O aumento da temperatura e/ou do tempo de tratamento causa uma redução mais acentuada desse polímero com correspondente perda da resistência. Também a resistência a flexão é uma combinação das tensões internas na madeira (estresse de tração, compressão e cisalhamento), de maneira que também deve ser explorada como essas forças são afetadas pela degradação da hemicelulose.

Foram marcantes para ambas as espécies submetidas aos tratamentos térmicos, a falha ou rompimento abrupto da madeira, enquanto nas não tratadas essa falha foi gradual. Segundo Boonstra et al. (2007), a energia consumida até a fratura total é menor nas amostras tratadas do que para as amostras não tratadas. As forças externas que a madeira tratada pelo calor pode suportar após a falha são muito menores do que para a madeira não tratada.

Em relação a resistência ao impacto de *E. grandis* ocorreu um efeito contrário ao obtido para a madeira de pinus. Para a madeira de eucalipto tratada por ambos os tratamentos, observou-se uma redução drástica e estatisticamente significativa da resistência ao impacto em relação a madeira sem tratamento, como mostrado na

Tabela 24 do Apêndice 8, o qual também foi mais pronunciada no tratamento combinado.

Nessa espécie, a madeira tratada pelos métodos em estufa e combinação necessitou, para seu rompimento, de cargas inferiores a testemunha em 37,75% e 57,95%, respectivamente. Por meio da Tabela 24 do Apêndice 8, tem-se que a massa específica dos corpos de prova submetidos ao testes também não mostraram diferenças estatísticas entre os tratamentos.

Valores similares de redução da resistência ao impacto foram encontrados por Sundqvist et al. (2003) aplicando o tratamento de 160°C por 2,5h a madeira de *Betula pubescens* na presença de água, observando uma redução dos valores de resistência ao choque na ordem de 31,03% em relação a madeira original.

Conforme Gunduz et al. (2009), alguns métodos de tratamento provocam forte redução da resistência ao impacto e resistência à flexão, enquanto outros não resultam em efeito sobre essa propriedade ou acontecem em menor extensão.

Para Davis e Thompson (1964) a degradação das hemiceluloses é o principal responsável para a diminuição da tenacidade da madeira, outra forma de denominação dessa propriedade.

Segundo os mesmos autores, uma vez que as interações entre celulose e hemicelulose são baseadas em ligações secundárias, isso implica que deve ser a quebra dessas ligações que determina a resistência ao impacto. Contudo, contribui na redução bastante elevada da força de impacto a quebra de ligações covalentes entre a hemicelulose e lignina durante o processo térmico bem como a quebra de ligações covalentes nas microfibrilas/fibras de celulose (despolimerização). Um aumento da quantidade de celulose cristalina devido a degradação e/ou cristalização da celulose amorfa também pode ter um efeito negativo sobre a força de impacto.

Para as cargas médias resistidas pelos corpos de prova de eucalipto no ensaio de dureza de Janka na direção longitudinal (topo), o tratamento em estufa resultou numa maior resistência mecânica deste plano pelo tratamento em estufa, superior a testemunha em 1,87% e, em contrapartida, o tratamento combinado causou uma redução nos valores de carga em 1,29%.

Quanto aos valores de carga para a dureza de Janka na madeira de eucalipto tem-se que no plano tangencial estes valores foram, para o tratamento de combinação, inferior a testemunha em 16,02% e o tratamento em estufa inferior em

4,78%, enquanto para o plano radial o método de combinação foi inferior a testemunha em 22,38% e o tratamento em estufa inferior em 13,62%.

Sundqvist et al. (2003) empregando temperatura de 160°C por 2,5 h citam que não foram observadas alterações nas propriedades mecânicas originais da madeira testada, porém no que se refere a dureza, foi a propriedade mais afetada.

Assim como no presente estudo, Korkut (2008) aplicando a temperatura de 150°C por 2h na madeira de *Abies bornmuellerinana* Mattf., também encontrou uma menor redução nos valores de dureza para o plano anatômico radial, seguida da tangencial e da longitudinal, com valores inferiores a testemunha em 16,46%, 9,34% e 4,04%, respectivamente.

Já Unsal et al. (2003) trabalhando com a madeira de *Eucalyptus camaldulensis*, tratada a temperatura de 150°C por 2 h, registrou uma redução de 9,94%, 8,51% e 7,33% para os mesmos planos anatômicos.

Com relação as diferenças observadas nas propriedades de resistência entre espécies submetidas a mesmo tratamento de calor, Boonstra et al. (2007) esclarecem que essas podem estar relacionadas às diferenças de estrutura anatômica e ultraestrutural, maior conteúdo de hemicelulose ou composição química diferenciada dessa, que afeta o mecanismo de reação química durante o tratamento, e maior percentagem de madeira juvenil, que por sua vez contém maior conteúdo de hemicelulose, lignina e maior ângulo microfibrilar, resultando em uma maior contração longitudinal e menor transversal, causando tensões internas agravadas pela agressividade na secagem pelos tratamentos.

De maneira geral para Esteves e Pereira (2009), a degradação da hemicelulose tem sido proposta como o principal fator para a perda da resistência mecânica da madeira, afetando especialmente a flexão e resistência à tração, mas também a cristalização da celulose amorfa pode ter um importante papel. Já as reações de policondensação da lignina, resultando em ligações cruzadas são mencionadas como tendo um impacto positivo, principalmente nos esforços da direção longitudinal da madeira, e diferenças entre a resistência à compressão paralela a fibra (aumento) e a compressão radial (redução), são atribuídas a anisotropia da celulose cristalina.

Segundo os mesmos autores, o menor conteúdo de umidade de equilíbrio pode afetar positivamente as propriedades de resistência da madeira tratada, mas esse efeito é muitas vezes superado pela degradação dos componentes químicos.

4.3 Efeito do tratamento térmico na resistência biológica

A Figura 20 mostra as médias de perda de massa sofrida pela madeira de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis*, durante o ensaio de apodrecimento acelerado com os fungos *Trametes versicolor* (podridão-branca) e *Gloeophyllum trabeum* (podridão-parda) para os três tratamentos.

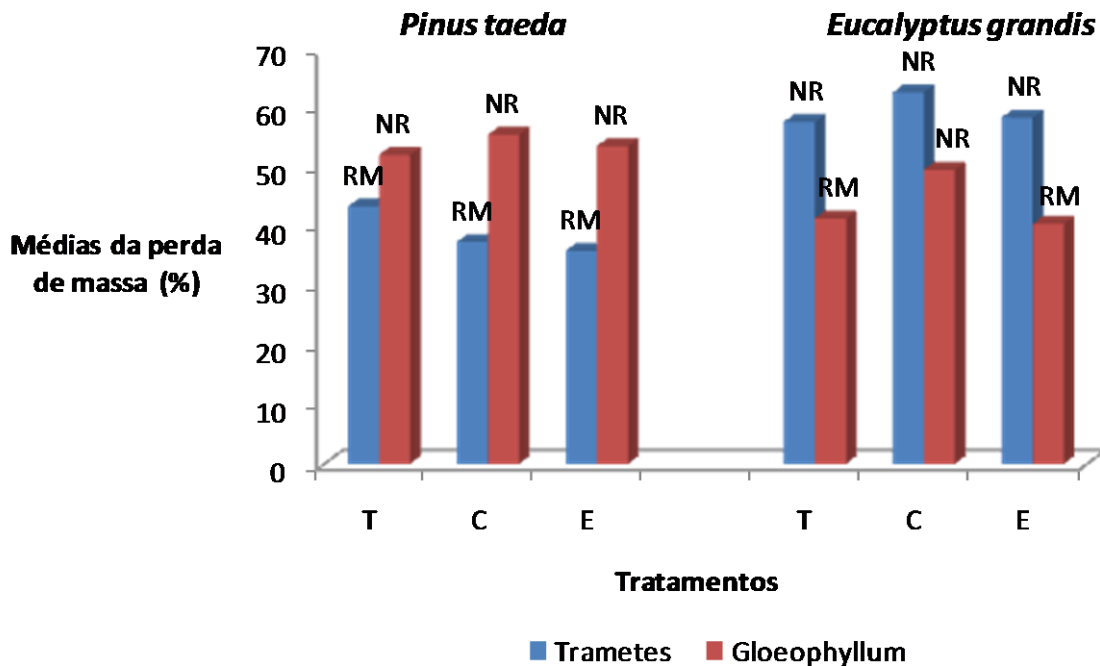


Figura 20 - Média de perda de massa e a respectiva classificação. (T= Testemunha; C= Combinação; E= Estufa; RM= resistência moderada; NR= não Resistente).

A Figura 20 mostra que, independente do tratamento térmico aplicado, na madeira de eucalipto, as maiores perdas de massa foram causadas pelo fungo *Trametes versicolor*, enquanto na madeira de pinus, as maiores perdas de massa foram provocadas pelo fungo *Gloeophyllum trabeum*. Esses dados devem-se ao fato de que fungos de podridão branca se desenvolvem melhor em madeira de folhosas, enquanto fungos de podridão parda causam maiores perdas de massa em coníferas (MARTÍNEZ et al., 2005).

Observa-se para a madeira de *P. taeda* que o fungo *Trametes versicolor* provocou as maiores perdas de massa nas amostras sem tratamento (testemunha), de modo que os tratamentos térmicos aplicados foram eficientes no aumento da

resistência das madeiras à degradação biológica, principalmente pelo tratamento em estufa que promoveu um aumento na resistência biológica das peças em 17,19 %, cujos valores demonstraram diferença estatística significativa com a testemunha, como mostra a Tabela 32 do Apêndice 9. Já para o tratamento combinado, essa resistência foi agregada na ordem de 13,76%.

Quanto ao comportamento da madeira, frente ao apodrecimento pelo fungo *Gloeophyllum trabeum*, observa-se que os tratamentos térmicos, ao contrário, promoveram uma menor resistência biológica às peças, efeito mais pronunciado no tratamento combinado, de modo que as peças de madeira tiveram sua resistência reduzida em 6,53%, seguido do tratamento em estufa, com uma percentagem de redução da resistência biológica das peças em 2,83%.

Assim, observa-se para a madeira de *Pinus taeda* que o tratamento de combinação não produziu benefícios no que se refere ao aumento da resistência biológica atribuída ao tratamento térmico da madeira, visto que resultou em uma perda de massa superior a madeira tratada em estufa, quando observado a vantagem do tratamento térmico sobre a testemunha, bem como resultou numa maior perda de massa quando observada a ineficácia da técnica.

Da mesma forma, Doi et al. (2005), constataram a mesma susceptibilidade com a madeira de *Larix leptolepis* ao apodrecimento pelo fungo *Fomitopsis palustris*, depois de tratada a 120 e 130°C, por 48 h a seco e na presença de vapor, e explica que isso, possivelmente, tenha ocorrido, devido a produção de fragmentos de açúcares de baixo peso molecular, quando da degradação da hemicelulose, durante os processos a alta temperatura, incluindo o tratamento com vapor.

Com relação a madeira de *E. grandis*, e sua interação com o fungo *Trametes versicolor*, constatou-se um aumento da perda de massa das peças tratadas termicamente, para ambas as metodologias testadas, principalmente para o tratamento de combinação, refletindo-se num aumento da susceptibilidade ao apodrecimento da madeira. Para esse fungo, o tratamento combinado forneceu às peças uma resistência inferior a testemunha em 8,64%, passando no tratamento em estufa, a uma resistência inferior em 1,30%. Na interação do fungo *Gloeophyllum trabeum* com as peças tratadas pelo método combinado, o tratamento térmico favoreceu a degradação da peças em 19,83%, de tal forma que a madeira passou de moderadamente resistente (MR) a não resistente (NR), conforme classificação pela ASTM D 2017 (ASTM, 2005).

Em contrapartida, o tratamento em estufa resultou numa sensível melhora na resistência biológica das peças tratadas em 2,22%, em relação ao tratamento em estufa.

Prates et al. (2008), ao submeterem as madeiras de marupá, louro-vermelho e jequitibá-rosa, tratadas a 150°C, por 1 e 2 h, ao apodrecimento acelerado com os mesmos fungos, observaram que, para a madeira de louro-vermelho, os tratamentos térmicos a tornaram mais susceptível ao ataque do fungo *Trametes versicolor*, sendo que, para as demais espécies, não aumentaram de forma significativa a resistência contra o apodrecimento pelos dois fungos, quando comparados com as amostras não tratadas termicamente (testemunhas), portanto, constatando os mesmo efeitos do tratamento térmico aqui empregado.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados do presente estudo para as espécies *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis*, tratadas sob as duas metodologias de tratamento térmico, conclui-se que:

O tratamento térmico que combina o uso de autoclave e estufa promove maiores reduções de massa, massa específica, e umidade de equilíbrio para as madeiras de ambas as espécies;

Para *Pinus taeda* o tratamento de termorretificação aumenta a absorção de água pelas amostras, principalmente pelo método de combinação que, em contrapartida, resulta numa redução do inchamento volumétrico das mesmas.

Para o *Eucalyptus grandis*, os tratamentos de termorretificação reduzem a absorção de água pelas amostras, em especial pelo tratamento em estufa, no entanto, os menores inchamentos volumétricos são observados para o tratamento de combinação.

O tratamento de combinação resulta num menor inchamento tangencial e radial da madeira de *Pinus taeda*, enquanto o tratamento em estufa fornece valores superiores de inchamento nestes mesmos planos em relação à testemunha. A anisotropia de inchamento é reduzida por ambos os tratamentos empregados, mas principalmente pelo tratamento de combinação.

Para a madeira de *Eucalyptus grandis*, o inchamento nos planos tangencial e radial das amostras é reduzido pelos tratamentos de termorretificação, efeito mais pronunciado para o tratamento de combinação, também superior ao tratamento em estufa na redução da anisotropia de inchamento.

Na madeira de *Pinus taeda*, observa-se que o tratamento em estufa promove redução de um maior número de propriedades, e, quando verificado um acréscimo

nos valores de carga, o tratamento combinado fornece as maiores diferenças em relação a testemunha.

Na madeira de *Eucalyptus grandis* o tratamento combinado reduz a resistência mecânica de um número maior de propriedades, bem como as maiores reduções em valores, já o tratamento em estufa promove um acréscimo nos valores de resistência de um maior número de propriedades.

Os tratamentos térmicos são eficiente na redução da degradação da madeira de *Pinus taeda* pelo fungo *Trametes versicolor*, principalmente pelo tratamento em estufa; enquanto para o fungo *Gloeophyllum trabeum*, observa-se que os tratamentos térmicos favorecem o apodrecimento da madeira, sendo este efeito mais pronunciado pelo tratamento de combinação.

Os tratamentos térmicos favorecem a degradação da madeira de *Eucalyptus grandis* ao fungo *Trametes versicolor*, principalmente pelo tratamento combinado; para o fungo *Gloeophyllum trabeum*, apenas o tratamento em estufa, fornece um aumento da resistência biológica das peças.

De uma maneira geral, o tratamento térmico combinado fornece os melhores resultados em relação às propriedades de higroscopicidade e estabilidade dimensional das amostras, ao passo que em relação às propriedades mecânicas o comportamento dos tratamentos é diferenciado conforme a espécie; já em relação à resistência biológica das madeiras, o tratamento em estufa resulta em peças mais resistentes a degradação biológica.

Sugere-se a condução de estudos aplicando na etapa de autoclave a mesma temperatura utilizada no tratamento em estufa, a fim de se observar melhor a contribuição desta etapa sobre os parâmetros avaliados, bem como empregar uma análise colorimétrica em diferentes profundidades nas peças, de modo a se prever qual o comportamento deste parâmetro durante o processo de usinagem.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKYILDIZ, M. H.; ATES, S. Effect of heat treatment on equilibrium moisture content (EMC) of some wood species in Turkey. **Research Journal of Agriculture and Biological Sciences**, v. 4, n. 6, p. 660-665, 2008. Disponível em: <<http://www.insipub.com/rjabs/2008/660-665.pdf>>. Acesso em: 21 dez. 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2017**. Standard method for accelerated laboratory test of natural decay resistance of woods. Philadelphia, 2005. 5 p.

_____. **ASTM D 143**. Standard methods of testing small clear specimens of timber. Philadelphia, 1995. 31 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**. Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.

ATES, S.; AKYILDIZ, M. H.; OZDEMIR, H. Effects of heat treatment on calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) wood. **Bioresources**, v. 4, n. 3, p. 1032-1043, 2009.

AZEVEDO, A. C. S.; QUIRINO, W. F. Aumento da estabilidade na madeira de eucalipto através de tratamento térmico. **Revista da Madeira**, Curitiba, ano 16, n. 98, p. 50-58, ago. 2006.

BOONSTRA, M. J. et al. Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. **Annals of forest science**, v. 64, n. 7, p. 679-690, 2007.

BOONSTRA, M. J.; TJEERDSMA, B. F. Chemical analysis of heat-treated softwoods. **Holz Roh-Werkst**, v. 64, n. 1, p. 204-211, 2006.

BORGES, M. B.; QUIRINO, W. F. Higroscopicidade da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* tratado termicamente. **Revista Biomassa & Energia**, v. 1, n. 2, p. 173-182, 2004. Disponível em: <<http://www.funtec.org.br/arquivos/higroscopicidade.pdf>>. Acesso em: 21 dez. 2009.

BRITO, J. O. et al. Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* submetida a diferentes temperaturas de termorreificação. **Revista Cerne**, v. 12, n. 2, p. 182-188, 2006.

BRITO, J. O. et al. Chemical composition changes in eucalyptus and pinus woods submitted to heat treatment. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 18, p. 8545-8548, 2008. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V24-4SW85B5-1&_user=687358&_coverDate=12%2F31%2F2008&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1195398406&_rerunOrigin=google&_acct=C000037899&_version=1&_urlVersion=0&_userid=687358&md5=d0c734f96a3d5ae5e2444ccc69dfd2db>. Acesso em: 5 fev. 2010.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154p.

CARVALHO, W. et al. Uma visão sobre a estrutura, composição e biodegradação da madeira. **Química Nova**, v. 32, n. 8, p. 2191-2195, 2009.

CHARANI, P. R. et al. Influence of hydrothermal treatment on the dimensional stability of beech wood. **Caspian Journal of Environmental Sciences**, v. 5, n. 2, p. 125-131, 2007.

DAVIS, W. H.; THOMPSON, W. S. Influence of thermal treatments of short duration on the toughness and chemical composition of wood. **Forest Products Journal**, v. 14, n. 8, p. 350–356, 1964.

DEL MENEZZI, C. H. S. **Instabilidade dimensional da madeira e de seus subprodutos**: causas, conseqüências e prevenção. Brasília: Comunicações Técnicas Florestais, 2006. 37 p.

_____. Modificação das propriedades e da qualidade da matéria-prima para produção de painéis de madeira. In: SIMPÓSIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 1., 2008, Seropédica. **Anais...** Seropédica: UFFRJ, 2008. p. 1 - 2.

DOI, S. et al. Changes of decay and termite durabilities of Japanese larch (*Larix leptolepis*) wood due to high temperature kiln drying processes. **Journal Wood Science**, v. 51, n. 5, p. 526-530, 2005. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/content/p322316117218ln3/fulltext.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2010.

ESTEVES, B. M.; DOMINGOS, I. L.; PEREIRA, H. M. Pine wood modification by heat treatment in air. **BioResources**, v. 3, n. 1, p. 142-154, 2008.

ESTEVEES, B. M.; PEREIRA, H. M. Wood modification by heat treatment: a review. **BioResources**, v. 4, n. 1, p. 370-404, 2009.

FIGUEROA, M. J. M. **Influência da temperatura sobre a resistência mecânica do Paricá**. 2008. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

GUNDUZ, G.; AYDEMIR, D.; KARAKAS, G. The effects of thermal treatment on the mechanical properties of wild Pear (*Pyrus elaeagnifolia* Pall.) wood and changes in physical properties. **Materials & Design**, v. 30, n. 10, p. 4391-4395, 2009. Disponível em: <
http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TX5-4W26GCD-2&_user=687358&_coverDate=12%2F31%2F2009&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1194972193&_rerunOrigin=google&_acct=C000037899&_version=1&_urlVersion=0&_userid=687358&md5=5bf6d8f5b97c826e8ff1560959c10c4b#secx2>. Acesso em: 5 fev. 2010 a.

GUNDUZ, G. et al. The density, compression strength and surface hardness of heat treated hornbeam (*Carpinus betulus*) wood. **Maderas. Ciencia y Tecnologia**, v. 11, n. 1, p. 61-70, 2009. Disponível em: <
<http://www.scielo.cl/pdf/maderas/v11n1/art05.pdf>>. Acesso em: 21 julho 2009 b.

GUNDUZ, G.; NIEMZ, P.; AYDEMIR, D. Specific gravity and equilibrium of moisture content changes in heat treated fir (*Abies nordmanniana* subsp. bornmülleriana Mattf.) wood. **Drying Technology: An International Journal**, v. 26, n. 9, p. 1135-1139, 2008. Disponível em: <
<http://www.informaworld.com/smpp/ftinterface~db=all~content=a901523087~fulltext=713240928>>. Acesso em: 3 jan. 2010.

HILLIS, W. E. The role of wood characteristics in high temperature drying. **Journal of the Institute of Wood Science**, v. 7, n. 2, p. 60-67, 1975.

HOMAN, W. et al. Structural and other properties of modified wood. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 5., 2000, Switzerland. **Anais eletrônicos...** Switzerland: CIB-W18 Meeting 33, 2000. Disponível em: <
<http://oregonstate.edu/conferences/wcte2006/>. Acesso em: 23 dez. 2009.

JOHANSSON, D. **Heat treatment of solid wood**: effects on absorption, strength and colour. 2008. 142 f. Doctoral thesis (Divisions of wood Physics) – Lulea University of Technology, Sweden, 2008.

JONES, D.; HILL, C. A. S. Wood modification – a brief overview of the technology. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON BONDING OF MODIFIED WOOD, 5., 2007, Slovenia. **Anais eletrônicos...** Slovenia: Bled, 2007. Disponível em: <http://www1.uni-hamburg.de/cost/e34/conference/2007Bled/Proceedings_Bled_2007.pdf>. Acesso em: 9 ago. 2009.

KOCAEFE, D. et al. Preliminary study of thermal treatment effects on mold growth of selected Quebec wood species. **Forest Products Journal**, v. 57, n. 12, p. 30-33, 2007.

KORKUT, D. S. et al. The effects of heat treatment on the physical properties and surface roughness of Turkish hazel (*Corylus colurna* L.) wood. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 9, n. 9, p. 1772-1783, 2008. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1422-0067/9/9/1772>>. Acesso em: 10 set. 2009.

KORKUT, S.; AKGUL, M.; DUNDAR, T. The effects of heat treatment on some technological properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 1, p. 1861–1868, 2008. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MIAMIURL&_imagekey=B6V24-4NNPCCV-6-9&_cdi=5692&_user=687358&_pii=S0960852407002908&_check=y&_orig=search&_coverDate=04%2F30%2F2008&view=c&wchp=dGLbVzW-zSkzk&md5=44bb12108688b36bfedbf73b063948d7&ie=/sdarticle.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2010.

KORKUT, S.; BEKTAS, I. The effects of heat treatment on physical properties of Uludag fir (*Abies bornmuelleriana* matf.) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood. **Forest Products Journal**, v. 58, n. 3, p. 95-99, 2008.

KORKUT, S. The effects of heat treatment on some technological properties in Uludag fir (*Abies bornmuelleriana* Mattf.) wood. **Building and Environment**, v. 43, n. 4, p. 422-428, 2008.

MARTÍNEZ, A.T. et al. Biodegradation of lignocellulosics: microbial, chemical, and enzymatic aspects of the fungal attack of lignin. **International Microbiology**, v. 8, n. 3, p. 195-204, 2005. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16200498>>. Acesso em: 3 jan. 2010.

MOHEBBY, B.; SANAEI, I. Influences of the hydro-thermal treatment on physical properties of beech Wood (*Fagus orientalis*). In: ANNUAL MEETING BANGALORE, 36., 2005, India. **Anais eletrônicos...** India: Tarbiat Modarress University, 2005. Disponível em: <<http://www.modares.ac.ir/file/IRG05->

Mohebbi.pdf?p=UxFL0ISRzA1LU1vaGViYnkucGRmLjI1NDY4MV9QQVRI&n=SVJHMDUtTW9oZWJieS5wZGY->. Acesso em: 25 dez. 2009.

MOHEBBY, B.; TALAEI, A. Smoke analysis of acetylated beech layers. In: EUROPEAN CONFERENCE ON WOOD MODIFICATION, 2., 2005, Germany. **Anais eletrônicos...** Germany: Tarbiat Modarress University, 2005. Disponível em: <http://www.modares.ac.ir/file/ECWM_05b.pdf?p=L3VwbG9hZHMvVEFSQkIBVC9UQkxfUEFHVRV9GSUxFL0VDV01fMDUtYi5wZGYuMjU0NjQ0X1BBVEg&n=RUNXTV8wNS1iLnBkZg>. Acesso em: 25 dez. 2009.

MORAIS, S. A. L. de; NASCIMENTO, E. A. do; MELO, D. C. de. Análise da madeira de *Pinus oocarpa* parte I – estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, p. 145-155, 2005.

MOREY, P. **O crescimento das árvores**. São Paulo: E.P.U, 1980. 72 p.

MOURA, L. F. de, et al. Efeito da termorreificação sobre as propriedades de usinagem de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. In: SIMPÓSIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 1., 2008, Seropédica. **Anais...** Seropédica: UFFRJ, 2008. p. 7 - 8.

NUNES, C. S. **Estabilidade dimensional e modificações químicas da madeira termorreificada de *Corymbia citriodora* (Hook.) K. D. Hill & L.A.S. Johnson**. 2009. 32 f. Monografia (Título de Engenheiro Florestal) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2009.

PARYSEK, M.; ZAKRZEWSKI, R. Investigations on the chemical composition of pine wood subjected to hydrothermal modification. **Folia Forestalia Polonica**, v. B, n. 37, p. 3-7, 2006. Disponível em: <<http://laser.t28.net/ffp/pdf/39/Folia%20Forestalia%20Pol%20391%20Parysek%20Zakrzewski.pdf>>. Acesso em: 26 dez. 2009.

PESSOA, A. M. C.; FILHO, E. B.; BRITO, J. O. Avaliação da madeira termorreificada de *Eucalyptus grandis* submetida ao ataque de cupim de madeira seca *Cryptotermes brevis*. **Scientia Forestalis**, v. 1, n. 72, p. 11–16, 2006.

PINCELLI, A. L. P. S. M.; BRITO, J. O.; CORRENTE, J. E. Avaliação da termorreificação sobre a colagem da madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea* var. *Hondurensis*. **Scientia Forestalis**, v. 1, n. 61, p. 122-132, 2002.

PONCSÁK, S. et al. Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). **Wood Sci Technol**, v. 1, n. 40, p. 647–663, 2006. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/content/g225xlxr896u1422/fulltext.pdf>>. Acesso em: 14 dez. 2009.

PRATES, E. M. B. COSTA, A. F. da; GARLET, A. Efeito de tratamentos térmicos sobre a resistência biológica da madeira de marupá, louro vermelho e jequitibá rosa. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, 15., 2008, Brasília. **Anais eletrônicos...** Brasília: UnB, 2008. Disponível em: <http://www.unb.br/administracao/decanatos/dpp/pibic/Programacao_de_Iniciacao_cientifica_2009.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2010.

RODRIGUES, T., O. **Efeitos da torrefação no condicionamento de biomassa para fins energéticos**. 2009. 71 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

ROWELL, R. M. et al. Understanding decay resistance, dimensional stability and strength changes in heat treated and acetylated wood. In: EUROPEAN CONFERENCE ON WOOD MODIFICATION, 1., 2009, Sweden. **Anais eletrônicos...** Sweden: ECWM, 2009. Disponível em: <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2009/fpl_2009_rowell001.pdf>. Acesso em: 3 jan. 2009.

ROWELL, R. M. ; YOUNGS, R. L. **Dimensional stabilization of wood in use**. Washington: USDA, 1981. 8 p.

SANTOS, J. A. Mechanical behaviour of Eucalyptus wood modified by heat. **Wood Science and Technology**, v. 34, n. 1, p. 39-43, 2000. Disponível em: <<http://joyx.joensuu.fi/~karenlam/petri/mechan/4487Sant.pdf>>. Acesso em: 3 jan. 2010.

SCHAFFER, E. L. Effect of pyrolytic temperatures on the longitudinal strenght of dry Douglas fir. **Journal of Testing and Ealuation**, v. 1, n. 4, p. 319-329, 1973.

SEVERO, E. T. D.; TOMASELLI, I. Efeito do tratamento de vaporização em toras e madeira serrada de *Eucalyptus dunnii* sobre a flexão estática. **Revista Floresta**, v. 29, n. 3, p. 37-51, 2003.

SILVA, M. R. da; MACHADO, G. de, O.; JUNIOR, C. C. Efeito do tratamento térmico nas propriedades mecânicas de *Pinus elliotti*. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM

MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 11., 2008, Londrina. **Anais...** Londrina: UEL - EBRAMEM, 2008.

SILVA, P. H. M. Tratamentos prolongam uso da madeira. **Revista da Madeira**, Curitiba, ano 17, n. 100, p. 78 – 80, nov. 2006.

SILVA, R. et al. Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. **Química Nova**, v. 32, n. 3, p. 661-671, 2009.

STAMM, A. J. Thermal degradation of wood and cellulose. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 48, n. 3, p. 413-417, 1956.

SUNDQVIST, B. **Colour changes and acid formation in wood during heating**. 2004. 154 f. Doctoral thesis (Divisions of wood material science) – Lulea University of Technology, Sweden, 2004. Disponível em: < <http://epubl.luth.se/1402-1544/2004/10/LTU-DT-0410-SE.pdf>>. Acesso em: 3 jan. 2010.

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. **Journal of Wood Science**, v. 52, n. 2, p. 30-37, 2003.

TJEERDSMA, B. F.; BOONSTRA, M.; MILITZ, H. Thermal modification of non-durable wood species. In: ANNUAL MEETING MAASTRICHT, 29., 1998, Stockholm. **Anais eletrônicos...** Stockholm: International Research Group On Wood Preservation , 1998. Disponível em: <<http://www2.spm.slu.se/bitwon/Others/IRG+98-40124%5B1%5D.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2009.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Wood handbook**: wood as an engineering material. Washington: Department of Agriculture, 1987. 466 p.

UNSAL, O.; AYRILMIS, N. Variations in compression strength and surface roughness of heat-treated Turkish river red gum (*Eucalyptus camaldulensis*) wood. **Journal Wood Science**, v. 51, n. 4, p. 405–409, 2005. Disponível em: < <http://sciencelinks.jp/j-east/article/200520/000020052005A0753596.php> >. Acesso em: 12 jan. 2010.

UNSAL, O.; KORKUT, S.; ATIK, C. The effect of heat treatment on some properties and colour in eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis* Dehn.) wood. **Maderas, Ciência y Tecnología**, v. 5, n. 2, p. 145-152, 2003.

VERNOIS, M. **Heat treatment of wood in France – stat of the art**. Paris: Centre Technique du Bois et de l'Ameublement, 2000. 6 p. Disponível em: <http://www.bfafh.de/inst4/43/pdf/heat_fra.pdf>. Acesso em: 08 mar. 2008.

WANGAARD, F. F. **The mechanical properties of wood**. London: Chapman & Hall, 1950. 377p.

YILDIZ, S.; GEZER, E. D.; YILDIZ, U. C. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. **Building and Environment**, v. 41, n. 1, p. 1762–1766, 2006. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MiamiImageURL&_imagekey=B6V23-4H0BSSH-2-5&_cdi=5691&_user=687358&_pii=S0360132305003045&_check=y&_orig=search&_coverDate=12%2F31%2F2006&view=c&wchp=dGLbVzW-zSkzk&md5=acfb475ea3fb2a5d7edd31a24ffe0f9a&ie=/sdarticle.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2010.

ZIVKOVIC, V. et al. Dimensional stability of heat treated wood floorings. **Drvna Industrija**, v. 59, n. 2, p. 69-73, 2008.

7 APÊNDICES

Apêndice 1 – Aspecto dos corpos de prova de cada tratamento.

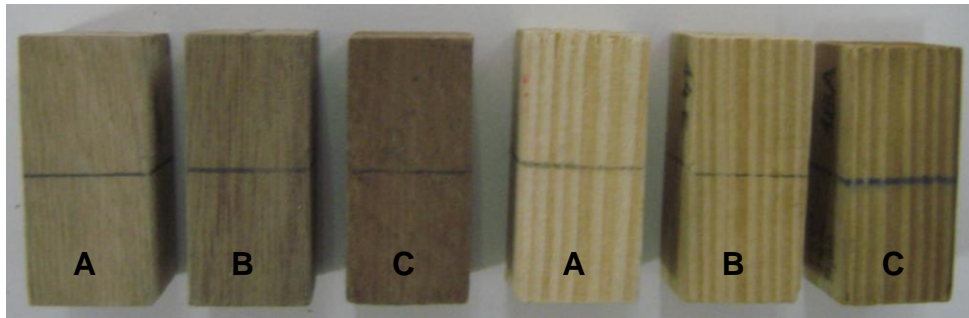


Figura 21 - Corpos de prova da madeira de *Eucalyptus grandis* (à esquerda) e *Pinus taeda* (à direita), utilizados nos testes de higroscopicidade. (A = testemunha; B = madeira tratada em estufa; C = madeira tratada pela combinação de autoclave e estufa).

Apêndice 2 - Condução do ensaio de apodrecimento acelerado.



Figura 22 - Frascos de ensaio contendo corpos-de-prova do tratamento de combinação já em fase de finalização do experimento. À esquerda o fungo *Gloeophyllum trabeum* e à direita o fungo *Trametes versicolor*.

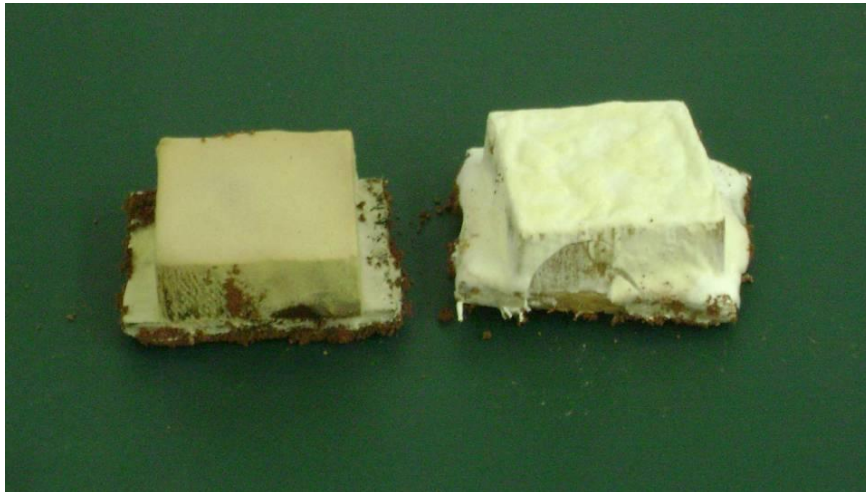


Figura 23 - Detalhe dos corpos-de-prova removidos dos frascos junto com a placa suporte, à esquerda corpos de prova recobertos pelo micélio do fungo *Gloeophyllum trabeum* e a direita, corpos de prova recobertos pelo micélio do fungo *Tramete versicolor*.

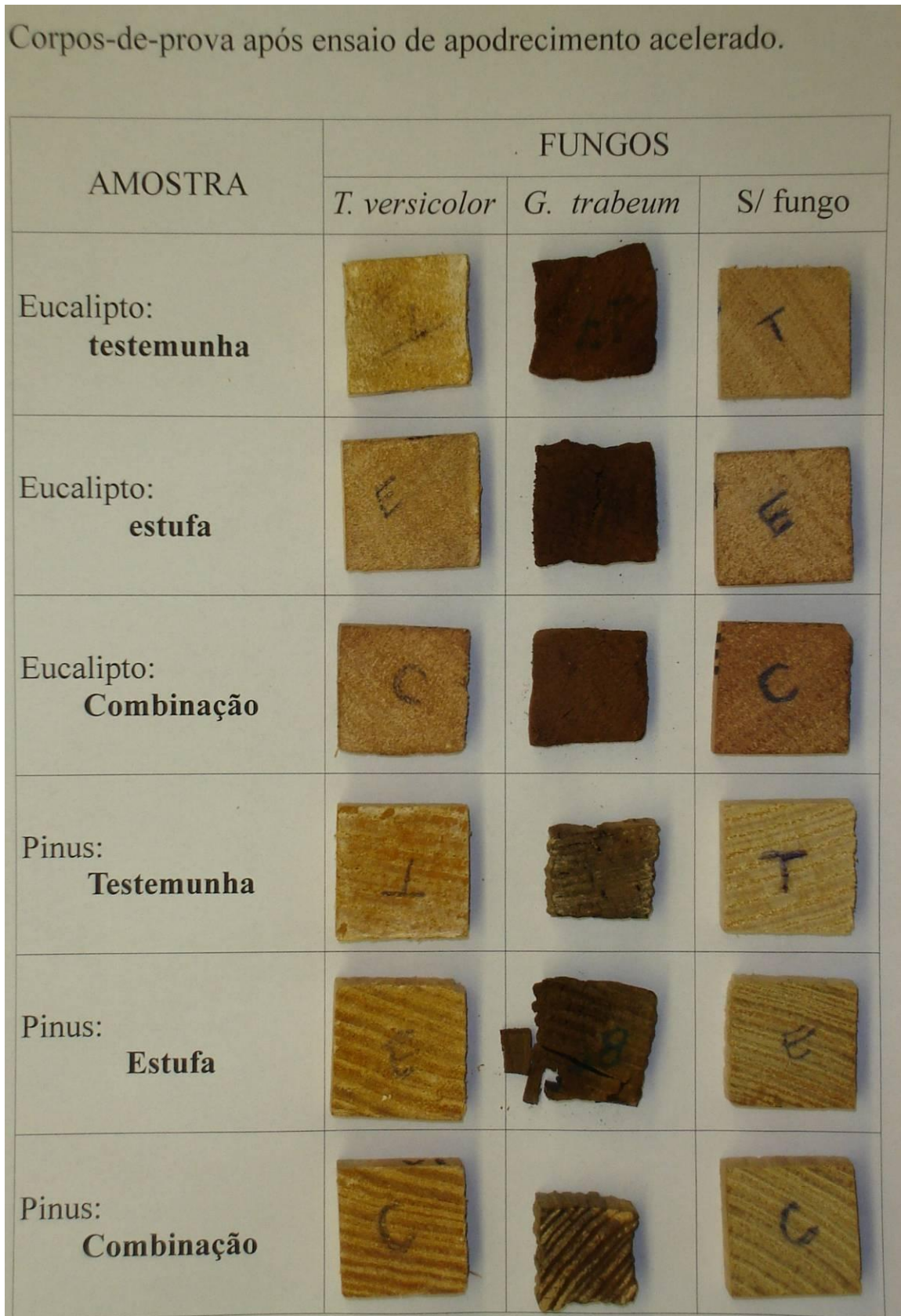


Figura 24 - Aspecto dos corpos-de-prova testemunha, combinação e estufa e blocos de referência das espécies *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda* após o ensaio de apodrecimento acelerado.

Apêndice 3 - Corpos de prova submetidos ao ensaio de resistência ao impacto.

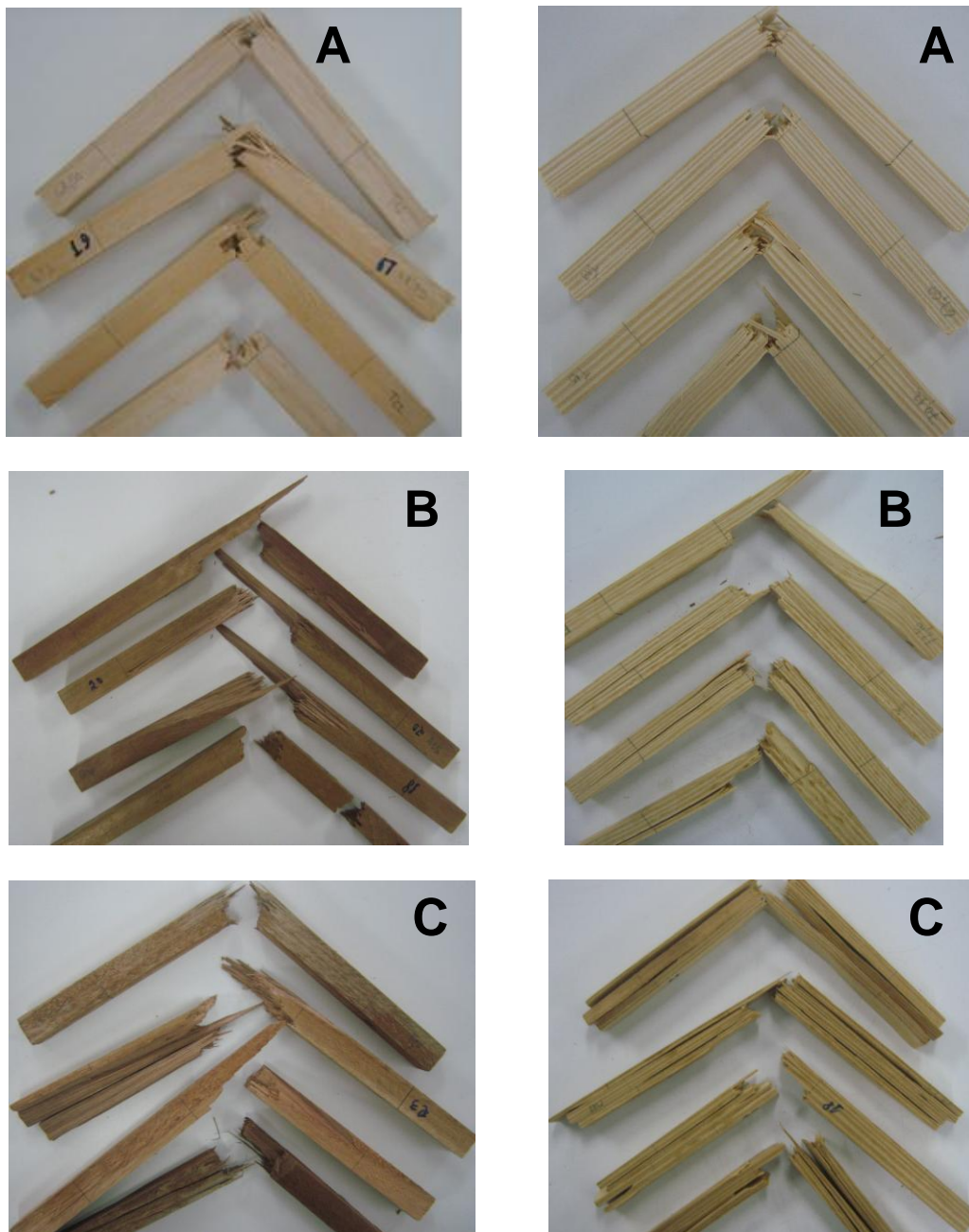


Figura 25 - Aspecto dos corpos-de-prova após o ensaio de resistência ao impacto, à esquerda amostras da madeira de *Eucalyptus grandis*, à direita amostras da madeira de *Pinus taeda*. (A= Testemunha, B= madeira tratada em estufa, C= madeira tratada pela combinação de autoclave e estufa).



Figura 26 - Detalhe do cisalhamento sofrido pelos corpos-de-prova no ensaio de resistência ao impacto.

Apêndice 4 - Análise de variância para a perda de massa das duas espécies em função dos tratamentos de termorreificação.

Tabela 3 - Análise de variância para a perda de massa da madeira de *Pinus taeda* em função dos tratamentos de termorreificação.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
Tratamentos	0,32013	1	0,32013	5,1567	0,02788*
Resíduo	2,85573	46	0,06208		
Total		47			

Tabela 4 - Análise de variância para a perda de massa da madeira de *Eucalyptus grandis* em função dos tratamentos de termorreificação.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
Tratamentos	0,07375	1	0,07375	2,6635	>0,10000 ^{NS}
Resíduo	1,10758	40	0,02769		
Total	1,18133	41			

Apêndice 5 - Análise de variância para a redução de massa específica das duas espécies em função dos tratamentos de termorreificação.

Tabela 5 - Análise de variância para a redução de massa específica da madeira de *Pinus taeda* em função dos tratamentos de termorreificação.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
Tratamentos	1	12,19155	12,19155	98.6317	< 0,00100*
Resíduo	46	5,68591	0,12361		
Total	47	17,87746			

Tabela 6 - Análise de variância para a redução de massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis* em função dos tratamentos de termorreificação.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
Tratamentos	1	34,26545	34,26545	581,5309	< 0,00100*
Resíduo	40	2,35691	0,05892		
Total	41	36,62236			

Apêndice 6 - Análise de variância para a umidade de equilíbrio das duas espécies em função dos tratamentos de termorreificação.

Tabela 7 - Análise de variância para a umidade de equilíbrio da madeira de *Pinus taeda* em função dos tratamentos de termorreificação.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
Tratamentos	194,72350	2	97,36175	1667,6516	$p < 0,05^*$
Resíduo	4,02840	69	0,05838		
Total	198,75190	71			

Tabela 8 - Análise de variância para a umidade de equilíbrio da madeira de *Eucalyptus grandis* em função dos tratamentos de termorreificação.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
Tratamentos	176,98728	2	88,49364	1290,1202	$p < 0,05^*$
Resíduo	4,11560	60	0,06859		
Total	181,10288	62			

Apêndice 7 - Análise de variância entre o primeiro e último ciclos para a Efetividade de Repelência a água (ERA) e Eficiência Anti Inchamento (EAI) para as duas espécies em função dos tratamentos de termorreificação.

Tabela 9 - Análise de variância entre o 1° e 2° ciclos para a Efetividade de Repelência a Água (ERA) da madeira de *Pinus taeda* em função do tratamento de combinação.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
Tratamentos	54,80981	1	54,80981	0,6873	>0,05 ^{NS}
Resíduo	3668,25426	46	79,74466		
Total	3723,06407	47			

Tabela 10 - Análise de variância entre o 1° e 2° ciclos para a Efetividade de Repelência a Água (ERA) da madeira de *Pinus taeda* em função do tratamento em estufa.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
Tratamentos	20,97406	1	20,97406	0,3547	>0,05 ^{NS}
Resíduo	2720,07123	46	59,13198		
Total	2741,04528	47			

Tabela 11 - Análise de variância entre o 1° e 2° ciclos para a Eficiência Anti Inchamento (EAI) da madeira de *Pinus taeda* em função do tratamento de combinação.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
Tratamentos	241,52276	1	241,52276	2,8833	0,0969 ^{NS}
Resíduo	3518,18222	42	83,76624		
Total	3759,70498	43			

Tabela 12 - Análise de variância entre o 1° e 2° ciclos para a Eficiência Anti Inchamento (EAI) da madeira de *Pinus taeda* em função do tratamento em estufa.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
Tratamentos	422,29888	1	422,29888	9,6769	0,0032*
Resíduo	2007,42491	46	43,63967		
Total	2429,72380	47			

Tabela 13 - Análise de variância entre o 1° e 4° ciclos para a Efetividade Repelência à Água (ERA) da madeira de *Eucalyptus grandis* em função do tratamento de combinação.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
Tratamentos	3602,71387	1	3602,71387	24,6461	<0,05*
Resíduo	5847,11755	40	146,17794		
Total	9449,83142	41			

Tabela 14 - Análise de variância entre o 1° e 4° ciclos para a Efetividade Repelência à água (ERA) da madeira de *Eucalyptus grandis* em função do tratamento em estufa.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
Tratamentos	1993,59757	1	1993,59757	23,9869	<0,05*
Resíduo	3823,15043	46	83,11197		
Total	5816,74800	47			

Tabela 15 - Análise de variância entre o 1° e 4° ciclos para a Eficiência Anti Inchamento (EAI) da madeira de *Eucalyptus grandis* em função do tratamento de combinação.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
Tratamentos	1604,61407	1	1604,61407	7,7490	0,00817*
Resíduo	8282,91127	40	207,07278		
Total	9887,52534	41			

Tabela 16 - Análise de variância entre o 1° e 4° ciclos para a Eficiência Anti Inchamento (EAI) da madeira de *Eucalyptus grandis* em função do tratamento em estufa.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
Tratamentos	937,09603	1	937,09603	12,2700	0,00104*
Resíduo	3513,14270	46	76,37267		
Total	4450,23874	47			

Apêndice 8 - Análise de variância para as propriedades mecânicas e correspondente massa específica das duas espécies em função dos tratamentos.

Tabela 17 - Análise de variância para a resistência máxima em compressão paralela (Rmáx.) e Massa específica (ME) da madeira de *Pinus taeda*.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
Rmáx.	21231,776	2	10615,888	2,589	0,081 ^{NS}
Resíduo	336282,4	82	4101,005		
Total	357514,2	84			
ME	0,003	2	0,001	0,312	0,733 ^{NS}
Resíduo	0,370	84	0,004		
Total	0,373	86			

Tabela 18 - Análise de variância para a resistência máxima em compressão paralela (Rmáx.) e Massa Específica (ME) da madeira de *Eucalyptus grandis*.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
Rmáx.	14097,544	2	7048,772	2,344	0,102 ^{NS}
Resíduo	252632,3	84	3007,527		
Total	266729,8	86			
ME	0,012	2	0,006	1,955	0,148 ^{NS}
Resíduo	0,268	87	0,003		
Total	0,280	89			

Tabela 19 - Análise de variância para o Módulo de Elasticidade (MOE) em flexão estática e Massa Específica (ME) da madeira de *Pinus taeda*.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
MOE	6×10^8	2	311457428,7	1,499	0,229 ^{NS}
Resíduo	2×10^{10}	88	207834675,0		
Total	2×10^{10}	90			
ME	0,005	2	0,002	5,133	0,008*
Resíduo	0,042	87	0,000		
Total	0,047	89			

Tabela 20 – Comparação múltipla de médias para a massa específica da madeira de *Pinus taeda* submetida à flexão estática.

Tratamentos		Significância
T	C	0,005*
	E	0,218
C	T	0,005*
	E	0,268
E	T	0,218
	C	0,268

*= Significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro (teste de Tukey, $p \geq 0,05$).

Tabela 21 – Análise de variância para o Módulo de Elasticidade (MOE) em flexão estática e massa específica (ME) da madeira de *Eucalyptus grandis*.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
MOE	2×10^8	2	81532360,82	0,252	0,778 ^{NS}
Resíduo	3×10^{10}	81	323101027,9		
Total	3×10^{10}	83			
ME	0,008	2	0,004	3,144	0,048*
Resíduo	0,106	80	0,001		
Total	0,115	82			

Tabela 22 – Análise de variância para o Módulo de Ruptura (MOR) em flexão estática da madeira de *Pinus taeda*.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
MOR	62258,926	2	31129,463	3,099	0,050*
Resíduo	874015,9	87	10046,160		
Total	936274,8	89			

Tabela 23 – Análise de variância para o Módulo de Ruptura (MOR) em flexão estática da madeira de *Eucalyptus grandis*.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
MOR	51448,255	2	25724,128	1,214	0,302 ^{NS}
Resíduo	1716497	81	21191,326		
Total	1767946	83			

Quadro 2 - Significância para a Resistência ao impacto da madeira de *Pinus taeda* pelo teste não paramétrico de Kruskal Wallis.

Test Statistics^{a,b}

	f 12% 1
Chi-Square	1,811
df	2
Asy mp. Sig.	,404

a. Kruskal Wallis Test

b. Grouping Variable: VAR00001

Quadro 3 - Significância para a massa específica da madeira de *Pinus taeda* submetida ao impacto pelo teste não paramétrico de Kruskal Wallis.

Test Statistics^{a,b}

	ME1
Chi-Square	3,169
df	2
Asy mp. Sig.	,205

a. Kruskal Wallis Test

b. Grouping Variable: VAR00001

Tabela 24 - Análise de variância para a resistência ao impacto (RI) e massa específica (ME) da madeira de *Eucalyptus grandis*.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
RI	3178,143	2	1589,071	12,848	0,000*
Resíduo	8163,192	66	123,685		
Total	11341,335	68			
ME	0,003	2	0,002	1,637	0,202 ^{NS}
Resíduo	0,063	66	0,001		
Total	0,066	68			

Tabela 25 - Análise de variância para a dureza de topo (D.topo) e Massa Específica (ME) da madeira de *Pinus taeda*.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
D.topo	14649,626	2	7324,813	1,582	0,213 ^{NS}
Resíduo	333463,4	72	4631,436		
Total	348113,0	74			
ME	0,002	2	0,001	0,272	0,762 ^{NS}
Resíduo	0,221	72	0,003		

Total	0,223	74
-------	-------	----

Tabela 26 - Análise de variância para a dureza de topo (D.topo) da madeira de *Eucalyptus grandis*.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
D.topo	1905,903	2	952,952	0,351	0,705 ^{NS}
Resíduo	195410,1	72	2714,029		
Total	197316,0	74			
ME	0,005	2	0,003	1,496	0,231 ^{NS}
Resíduo	0,123	72	0,002		
Total	0,128	74			

Tabela 27 - Análise de variância para a dureza de superfície tangencial (D. tangencial) da madeira de *Pinus taeda*.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
D.tangencial	40450,317	2	20225,159	5,671	0,007*
Resíduo	139094,8	39	3566,533		
Total	179545,1	41			

Tabela 28 - Análise de variância para a dureza de superfície tangencial (D.tangencial) da madeira de *Eucalyptus grandis*.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
D.tangencial	13260,417	2	6630,208	2,939	0,064 ^{NS}
Resíduo	94744,780	42	2255,828		
Total	108005,2	44			

Tabela 29 - Análise de variância para a dureza de superfície radial (D.radial) da madeira de *Pinus taeda*.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
D.radial	9610,548	2	4805,274	1,201	0,312 ^{NS}
Resíduo	156073,2	39	4001,878		
Total	165683,8	41			

Tabela 30 - Análise de variância para a dureza de superfície radial (D.radial) da madeira de *Eucalyptus grandis*.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
D.radial	23664,841	2	11832,421	4,121	0,023*
Resíduo	120603,5	42	2871,511		
Total	144268,3	44			

Apêndice 9 - Análise de variância para a perda de massa da madeira das duas espécies em função dos fungos *Trametes versicolor* e *Gloeophyllum trabeum*, no ensaio de apodrecimento acelerado para os 3 tratamentos.

Tabela 31 - Análise de variância para a perda de massa da madeira de *Pinus taeda* em ensaio com o fungo *Trametes versicolor*.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
Tratamentos	384,84254	2	192,42127	5,1435	0,01137*
Resíduo	1234,54475	33	37,41045		
Total	1619,38729	35			

Tabela 32 – Teste de médias da perda de massa da madeira de *Pinus taeda* em ensaio com o fungo *Trametes versicolor*.

Médias dos tratamentos	
Testemunha	43,13417a*
Autoclave	37,09167ab
Estufa	35,56083b

*= Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si (teste de Tukey, $p \geq 0,05$).

Tabela 33 - Análise de variância para a perda de massa da madeira de *Pinus taeda* em ensaio com o fungo *Gloeophyllum trabeum*.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
Tratamentos	992,25587	2	496,12794	1,8564	>0,10000 ^{NS}
Resíduo	8819,55405	33	267,25921		
Total	9811,80992	35			

Tabela 34 - Análise de variância para a perda de massa da madeira de *Eucalyptus grandis* em ensaio com o fungo *Trametes versicolor*.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
Tratamentos	164,93764	2	82,46882	1,4622	>0,10000 ^{NS}
Resíduo	1861,26132	33	56,40186		
Total	2026,19896	35			

Tabela 35 - Análise de variância para a perda de massa da madeira de *Eucalyptus grandis* em ensaio com o fungo *Gloeophyllum trabeum*.

FV	SQ	GL	QM	Fcalc.	P
Tratamentos	598,92357	2	299,46179	2,0704	>0,10000 ^{NS}
Resíduo	4773,11586	33	144,63987		
Total		35			

em que: FV= fonte de variação; SQ= soma dos quadrados; GL= graus de liberdade; QM= quadrado médio; Fcalc.= valor de F calculado; P= probabilidade de erro; * = significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro; NS= não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Apêndice 10 - Parâmetros estatísticos dos testes de resistência mecânica das duas espécies para os três tratamentos.

Tabela 36 – Valor mínimo, máximo, médio, desvio padrão e coeficiente de variação das propriedades mecânicas avaliadas para a madeira de *Pinus taeda*.

Propr./Trat.	Mínimo	Máximo	Médio	S	CV
RM/ T	310,8	603,2	443,60	69,0778	0,1557
RM/ C	301,6	572,8	413,48	64,2195	0,1553
RM/ E	276,8	560,0	408,26	57,9508	0,1419
MOE/ T	73637,21	124172,78	101999,92	12813,1832	0,1256
MOE/ C	80471,93	158953,40	106069,1	16884,93	0,1592
MOE/ E	66484,08	125090,37	99753,81	13241,82	0,1327
MOR/ T	599,57	1217,52	830,11	107,5232	0,1295
MOR/ C	472,30	968,81	781,57	106,8385	0,1367
MOR/ E	507,57	904,07	770,72	83,6686	0,1085
RI/ T	26,8	91,2	54,97	15,6466	0,2846
RI/ C	16,1	72,9	59,00	14,0720	0,2385
RI/ E	23,1	72,1	56,64	13,5507	0,2392
DTP/ T	320,5	561,5	413,96	61,9921	0,1497
DTP/ C	311,5	624,00	446,00	75,0393	0,1682
DTP/ E	326,5	555,5	440,42	66,4860	0,1510
DT/ T	243,91	447,13	328,43	64,7661	0,1972
DT/ C	172,50	342,50	253,68	51,2199	0,2019
DT/ E	201,50	392,50	279,11	62,3014	0,2232
DR/ T	202,62	386,28	296,05	59,1959	0,1999
DR/ C	154,00	362,50	260,03	63,7249	0,2451
DR/ E	160,00	405,00	270,50	66,6379	0,2463

Em que: T = testemunha; C = combinação; E = estufa; RM= Resistência máxima a compressão paralela, kgf/cm²; MOE = Módulo de Elasticidade em flexão estática, kgf/cm²; MOR = Módulo de Ruptura em flexão estática, kgf/cm²; RI = Resistência ao impacto, kJ m²; DTP = Dureza de topo, kgf; DT = Dureza de superfície (tangencial), kgf; DR = Dureza de superfície (radial), kgf; S = desvio padrão; CV = coeficiente de variação.

Tabela 37 – Valor mínimo, máximo, médio, desvio padrão e coeficiente de variação das propriedades mecânicas avaliadas para a madeira de *Eucalyptus grandis*.

Propr./Trat.	Mínimo	Máximo	Médio	S	CV
RM/ T	221,9	458,7	353,6	58,07	0,1642
RM/ C	268,0	455,2	383,5	55,67	0,1451
RM/ E	251,2	476,0	375,0	50,2075	0,1339
MOE/ T	71463,2	125795,0	86926,5	22924,69	0,2637
MOE/ C	19604,0	115353,1	87809,5	16317,81	0,1858
MOE/ E	59875,8	115244,2	90208,6	13781,18	0,1528
MOR/ T	629,7	964,1	774,3	173,82	0,2245
MOR/ C	503,5	950,0	713,3	129,93	0,1822
MOR/ E	541,6	1032,2	739,5	130,26	0,1761
RI/ T	12,86	55,91	28,66	12,0615	0,4208
RI/ C	4,79	34,26	12,05	8,9363	0,7416
RI/ E	6,13	43,32	17,84	11,7258	0,6573
DTP/ T	291,2	496,9	387,58	51,1780	0,1320
DTP/ C	289	500	382,56	55,143	0,1441
DTP/ E	320	512,5	394,84	49,8207	0,1262
DT/ T	189,36	337,05	255,59	53,8456	0,2107
DT/ C	160,50	275,00	214,63	36,9785	0,1723
DT/ E	167,50	335,00	243,37	50,0073	0,2055
DR/ T	111,39	360,56	249,04	68,4650	0,2749
DR/ C	122,50	270,00	193,30	43,4498	0,2248
DR/ E	137,50	277,50	215,13	45,1574	0,2099

Em que: T = testemunha; C = combinação; E = estufa; S = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; RM= Resistência máxima a compressão paralela, kgf/cm²; MOE = Módulo de Elasticidade em flexão estática, kgf/cm²; MOR = Módulo de Ruptura em flexão estática, kgf/cm²; RI = Resistência ao impacto, kJ m²; DTP = Dureza de topo, kgf; DT = Dureza de superfície (tangencial), kgf; DR = Dureza de superfície (radial), kgf; S = desvio padrão; CV = coeficiente de variação.