

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

**EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO NAS
PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DA MADEIRA
DE *Corymbia citriodora* E *Eucalyptus saligna*.**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Walmir Marques de Menezes

Santa Maria, RS, Brasil

2013

**EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO NAS PROPRIEDADES
FÍSICO-MECÂNICAS DA MADEIRA DE *Corymbia citriodora* E
Eucalyptus saligna.**

Por

Walmir Marques de Menezes

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

2013

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Marques de Menezes, Walmir
EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO NAS PROPRIEDADES FÍSICO-
MECÂNICAS DA MADEIRA DE *Corymbia citriodora* E *Eucalyptus*
saligna. / Walmir Marques de Menezes.-2013.
61 p.; 30cm

Orientador: Elio José Santini
Coorientadores: Clovis Roberto Haselein, Darci
Alberto Gatto
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2013

1. Tratamento térmico da madeira 2. propriedades
físicas 3. propriedades mecânicas I. José Santini, Elio
II. Roberto Haselein, Clovis III. Alberto Gatto, Darci
IV. Título.

**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 DO TRATAMENTO TÉRMICO NAS PROPRIEDADES
FÍSICO-MECÂNICAS DA MADEIRA DE *Corymbia citriodora* E
Eucalyptus saligna.**

elaborado por
Walmir Marques de Menezes

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

COMISSÃO EXAMINADORA:

Elio José Santini, Dr.
(Presidente/Orientador)

Luciano Denardi, Dr. (CESNORS)

Silviana Rosso, Dr. (UNIPAMPA)

Santa Maria, 28 de Fevereiro de 2013.

A Deus por tudo que me concedeu, aos meus pais pela amizade, compreensão e afeto. As minhas irmãs pela força e carinho.

Dedico este trabalho!

AGRADECIMENTOS

A Deus por toda ajuda através do conhecimento, caráter, sabedoria e força nesta trajetória.

Aos meus pais e irmãs pela amizade, forças, afeto e apoio, demonstrando a verdadeira base familiar.

Ao meu Orientador Elio José Santini, pela confiança, amizade, conhecimento, aprendizado e orientação nesse tempo de convívio.

Aos Professores e Co-orientadores Clovis Roberto Haselein e Darci Alberto Gatto, pelas orientações, amizade e apoio.

A Universidade Federal de Pelotas, em especial ao curso de Engenharia Industrial Madeireira, pela disponibilidade do Laboratório para os ensaios mecânicos.

Ao colega Eduardo Schneid pelo auxílio nos ensaios mecânicos no laboratório do curso de Engenharia Industrial Madeireira da UFPel.

Aos membros da banca, Luciano Denardi e Silvana Rosso, por aceitar fazer parte desse momento de grande importância e ainda pela disponibilidade e correções deste trabalho.

Aos funcionários do LPF Nelson, Tarso e Fabiana por toda ajuda e auxílio no decorrer deste estudo.

A Daniela Lilge pela disponibilidade do seu tempo nas correções, observações e comentários do estudo.

A todos os colegas do Laboratório de Produtos Florestais pelas horas de descontração, amizade, troca de conhecimento e ajuda principalmente nas horas difíceis.

Ao colega Felipe Susin pela amizade e por disponibilizar seu material para esse estudo.

À Universidade Federal de Santa Maria, em especial ao Departamento de Ciências Florestais e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal (PPGEF-UFSM), pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo auxílio da bolsa de estudo.

RESUMO

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

EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO NAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DA MADEIRA DE *Corymbia citriodora* E *Eucalyptus saligna*.

AUTOR: Walmir Marques de Menezes
ORIENTADOR: Elio José Santini

Data e local da defesa: Santa Maria, 28 de Fevereiro de 2013.

Os gêneros de *Corymbia* e *Eucalyptus* apesar de utilizados pelas indústrias enfrentam limitações como altos níveis de tensões de crescimento, problemas de secagem e alta retratibilidade. Dessa forma, métodos como o tratamento térmico são estudados para melhorar essas propriedades. O objetivo desta pesquisa foi estudar o efeito do tratamento térmico nas propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*. Foram amostradas 3 árvores de cada espécie, com aproximadamente 40 anos de idade, as quais foram seccionadas as duas primeiras toras com comprimento de 3 metros cada. Para o tratamento térmico foram aplicadas temperaturas finais de 140°C, 160°C e 180°C, durante 2,5 horas, utilizando estufa com circulação de ar forçada. Para a determinação das propriedades físicas e mecânicas foram utilizados os procedimentos estabelecidos nas normas ASTM D 143-94 (ASTM, 2000) e NBR 7190 (ABNT, 1997). As propriedades físicas avaliadas foram umidade de equilíbrio, redução de massa, perda de massa específica, coeficiente de inchamento total (linear e o volumétrico) e coeficiente de anisotropia. As avaliações de resistência mecânica foram realizadas pelo módulo de elasticidade (MOE) e ruptura (MOR) em flexão estática, compressão paralela às fibras e resistência máxima ao impacto. Os resultados, em linhas gerais, demonstraram para todas as propriedades físicas avaliadas que o tratamento térmico é eficiente na redução da higroscopicidade e aumento da estabilidade dimensional de ambas as espécies, com melhores resultados, nos tratamentos com maiores temperaturas. Os resultados das propriedades mecânicas demonstraram que a máxima resistência ao impacto, para ambas as espécies, foi reduzida em relação à testemunha em todos os tratamentos. Os resultados do ensaio de flexão estática, para as duas espécies, teve um aumento na temperatura de 140°C e diminuiu nas temperaturas de 160°C e 180°C. Para a compressão paralela as fibras a espécie *Corymbia citriodora* teve aumento na temperatura de 140°C, reduzindo nas demais temperaturas. A espécie de *Eucalyptus saligna*, na avaliação da compressão paralela as fibras, reduziu com o aumento da temperatura. De acordo, com os resultados do estudo o material tratado termicamente pode ser utilizado em locais com umidade mais elevadas, entretanto não sendo indicado para uso estrutural, pois sua resistência é reduzida com o aumento da temperatura.

Palavras-chave: Higroscopicidade; Estabilidade dimensional; Módulo de elasticidade.

ABSTRACT

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

EFFECT OF HEAT TREATMENT ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF WOOD OF *Corymbia citriodora* and *Eucalyptus saligna*.

AUTHOR: Walmir Marques de Menezes

ADVISOR: Elio José Santini

Date and place of defense: Santa Maria, FEBRUARY 28, 2013.

The genera *Corymbia* and *Eucalyptus* although used by industries face limitations such as high levels of growth stresses, drying problems and high shrinkage. Thus, methods such as heat treatment are studied to improve these properties. The objective of this research was to study the effect of heat treatment on physical and mechanical properties of wood of *Corymbia citriodora* and *Eucalyptus saligna*. From each species 3 trees were sampled, with approximately 40 years of age, which were sectioned with the first two logs in lengths of 3 meters each. The heat treatment was applied with final temperature of 140 ° C, 160 ° C and 180 ° C for 2.5 hours using an oven with forced air circulation. To determine the physical and mechanical properties there were used the procedures of ASTM D 143-94 (ASTM, 2000) and NBR 7190 (ABNT, 1997). The physical properties analyzed were the equilibrium moisture content, weight reduction, loss of density, swelling coefficient, total (linear and volumetric) and coefficient of anisotropy. Mechanical properties evaluated were modulus of elasticity (MOE) and rupture (MOR) in bending, compression parallel to grain and impact resistance. The results, in general, demonstrated for all physical properties that the heat treatment is effective in reducing the hygroscopicity and increasing dimensional stability of both species, with best results in treatments with higher temperatures. The results of the mechanical properties have shown that impact resistance for both species was reduced compared to control in all treatments. The test results static bending, for both species, increased in temperature of 140 ° C and decreased at temperatures of 160 ° C and 180 ° C. Compression parallel to the grain in wood of *Corymbia citriodora* increased with heat treatment at temperature of 140 ° C and presented a reduction at other temperatures. The wood of *Eucalyptus saligna*, the evaluation of compression parallel to the grain, presented a decrease in strength with increasing temperature. In accordance with the results of the study the thermally treated material can be used in places where humidity is higher, however it is not suitable for structural use, because its strength is reduced with increasing temperature.

Key-words: Hygroscopicity; Dimensional stability; Modulus of elasticity.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Constituintes químicos da madeira.....	17
Tabela 2 - Tratamentos utilizados no experimento.....	28
Tabela 3 - Médias de umidade de equilíbrio das madeiras de <i>Eucalyptus saligna</i> e <i>Corymbia citriodora</i> em função dos tratamentos.....	32
Tabela 4 - Médias de redução de massa das madeiras de <i>Eucalyptus saligna</i> e <i>Corymbia citriodora</i> em função dos tratamentos.....	33
Tabela 5 - Médias da massa específica aparente das madeiras de <i>Eucalyptus saligna</i> e <i>Corymbia citriodora</i> em função dos tratamentos.....	34
Tabela 6 - Médias do inchamento total e coeficiente de anisotropia das madeiras de <i>Eucalyptus saligna</i> e <i>Corymbia citriodora</i> em função dos tratamentos.....	36
Tabela 7 - Médias do ensaio de resistência máxima ao impacto das madeiras de <i>Eucalyptus saligna</i> e <i>Corymbia citriodora</i> em função dos tratamentos e direção das peças.....	48
Tabela 8 - Médias do ensaio de flexão estática das madeiras de <i>Eucalyptus saligna</i> e <i>Corymbia citriodora</i> em função dos tratamentos.....	50
Tabela 9 - Médias do ensaio de compressão paralela às fibras das madeiras de <i>Eucalyptus saligna</i> e <i>Corymbia citriodora</i> em função dos tratamentos.....	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mecanismos de reação de madeira modificada termicamente (Fonte: ARAÚJO, 2010).....	20
Figura 2 - Relação sob adsorção e duas condições de dessorção. (Fonte: BATISTA, 2012).....	24
Figura 3 - Estufa utilizada no tratamento térmico (A), uso de cargas sobre os corpos de prova (B) (Fonte: o autor).....	26
Figura 4 - Programa de tempo-temperatura adotado para o tratamento térmico da madeira de <i>C.citriodora</i> e <i>E. saligna</i> (Fonte: CALONEGO, 2009).....	27
Figura 5 - Diagrama de tensão pela deformação específica (Fonte: o autor).....	40
Figura 6 - Retirada e dimensões (em centímetros) dos corpos de prova para os ensaios mecânico (Fonte: o autor).....	43
Figura 7 - Pêndulo de Charpy (A) (Fonte: o autor), e os corpos de prova obtidos (B) (Fonte: MORESCHI, 2005).....	43
Figura 8 - Máquina universal de ensaios mecânicos (A) (Fonte: o autor), e esquema do ensaio de flexão estática (B) (Fonte: MORESCHI, 2005).....	44
Figura 9 - Máquina universal de ensaios mecânicos (A) (Fonte: o autor), e corpo-de-prova no sentido do ensaio de compressão paralela às fibras (B) (Fonte: MORESCHI, 2005).....	46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVO GERAL	14
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	15
3.1 Espécies estudadas	15
3.1.1 <i>Corymbia citriodora</i>	15
3.1.2 <i>Eucalyptus saligna</i>	16
3.2 O tratamento térmico da madeira	17
3.3 Propriedades da madeira modificada termicamente	19
4 EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA DE <i>CORYMBIA CITRIODORA</i> E <i>EUCALYPTUS SALIGNA</i>.	22
4.1 Introdução	22
4.2 Material e métodos	25
4.2.1 Coleta e preparo do material.....	25
4.2.2 Tratamento térmico.....	26
4.2.3 Propriedades físicas	28
4.2.3.1 Umidade de equilíbrio	28
4.2.3.2 Redução de massa.....	29
4.2.3.3 Perda da Massa específica	29
4.2.3.4 Coeficiente de inchamento total	30
4.2.3.5 Coeficiente de anisotropia de inchamento.....	30
4.3 Análise estatística.....	31
4.4 Resultados e discussão.....	31
4.4.1 Umidade de equilíbrio	31
4.4.2 Redução de massa.....	33

4.4.3 Perda de massa específica.....	34
4.4.4 Coeficiente de inchamento total e anisotropia.....	35
4.5 Conclusões	38
5 EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA DE <i>CORYMBIA CITRIODORA</i> E <i>EUCALYPTUS SALIGNA</i>.	39
5.1 Introdução	39
5.2 Material e métodos	42
5.2.1 Propriedades mecânicas.....	42
5.2.1.1 Resistência máxima ao impacto	43
5.2.1.2 Flexão estática	44
5.2.1.3 Compressão paralela às fibras	45
5.3 Análise estatística.....	47
5.4 Resultados e discussão.....	47
5.4.1 Resistência máxima ao impacto	47
5.4.2 Flexão estática	49
5.4.3 Compressão paralela às fibras	52
5.5 Conclusões	54
6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES GERAIS	54
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIA.....	56

1 INTRODUÇÃO

A crescente busca por espécies florestais com potencial de rápido crescimento e boa qualidade, oriundas de reflorestamento para a produção de madeira serrada, tem proporcionado pesquisas para o desenvolvimento da melhoria das propriedades físico-mecânicas. Em vista disso, as diversas espécies dos gêneros *Corymbia* e *Eucalyptus* podem ser utilizadas para a produção de madeira serrada, pois apresentam ampla variabilidade de propriedades físico-mecânicas.

O gênero *Corymbia* é pelas suas qualidades silviculturais e de sua madeira, excelente para usos múltiplos. Entretanto, por não ser um gênero prioritário às grandes empresas, o volume de pesquisa a ele dedicado, atualmente, é baixo, muito embora expresse grandes potencialidades de uso (VIEIRA, 2004). A principal importância econômica está na produção de óleo essencial, além disso, produz madeira de excelente qualidade, muito utilizada para a produção de moirões, dormentes, postes, lenha, carvão, móveis e outros (SBS, 2008). Entretanto, assim como todo material celulósico, apresenta limitações nas suas propriedades físico-mecânicas para determinados usos.

O gênero *Eucalyptus* é um dos mais utilizados nas indústrias moveleiras e empresas do ramo madeireiro. Esse gênero possui vantagens como capacidade produtiva e adaptação aos mais diversos ambientes de clima e solo, e principalmente grande diversidade de espécies, fornecendo madeira de qualidade para diversos usos como: lenha, carvão, celulose, painéis, postes, construções, móveis, embalagens, etc.

De acordo com o relatório do Sistema Brasileiro de Silvicultura (SBS, 2008), no Brasil a área reflorestada equivale a 5,98 milhões de hectares, sendo que desses 3,75 milhões é composta por *Eucalyptus*. Entretanto, apesar da grande produção e diversas vantagens, *Eucalyptus* por vezes, possui problemas indesejáveis característicos do gênero. Os problemas são originados principalmente na secagem do material, o que geram defeitos como rachaduras, empenamentos, dentre outros. Esses defeitos são ocasionados geralmente pelas características anatômicas mais complexas da madeira de folhosas, resultando na alta higroscopicidade, heterogeneidade e anisotropia, das quais determina grande parte dos problemas apresentados em seu uso. Devido a estas características peculiares da madeira, tanto do gênero *Corymbia* e *Eucalyptus*, geram a necessidade da aplicação de tratamentos que permitam uma melhor utilização, principalmente em suas formas sólidas.

Dentre as pesquisas de novas tecnologias para melhorar a qualidade e o uso da madeira, encontra-se o tratamento térmico que realiza o processo em que o aquecimento é aplicado à madeira. O tratamento térmico consiste na termodecomposição de seus constituintes químicos, principalmente celulose, hemiceluloses e lignina, geralmente na ausência de oxigênio ou na deficiência de ar. Esse tratamento causa alterações químicas, físicas e mecânicas na madeira, de acordo com a temperatura. Nesse sentido, o processo de aplicar altas temperaturas na madeira, surge como alternativa para diminuir as características indesejáveis, principalmente a variação dimensional que provoca defeitos na madeira.

Nesse contexto, a realização de estudos sobre as diferentes temperaturas aplicadas no tratamento térmico, torna-se necessário para garantir a qualidade na produção das madeiras de *Eucalyptus* e *Corymbia*, mantendo assim a melhoradas das características físico-mecânicas. Assim, por meio do tratamento térmico, busca-se o desenvolvimento dessa técnica para a concretização do uso destas madeiras pelas indústrias.

2 OBJETIVO GERAL

A presente pesquisa teve como objetivo avaliar o efeito do tratamento térmico nas propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar o efeito do tratamento térmico nas:

- ✓ Propriedades físicas, tais como umidade de equilíbrio, redução de massa, perda de massa específica, coeficiente de inchamento linear e o volumétrico, coeficiente de anisotropia;
- ✓ Avaliar o efeito da modificação térmica nas propriedades mecânicas da resistência máxima ao impacto, flexão estática e compressão paralela às fibras.

Para melhor compreensão, o trabalho foi dividido em dois capítulos:

- Efeito do tratamento térmico nas propriedades físicas da madeira de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*.
- Efeito do tratamento térmico nas propriedades mecânicas da madeira de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*; e finalizado com uma conclusão geral a respeito dos mesmos.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Espécies estudadas

3.1.1 *Corymbia citriodora*

O gênero *Corymbia* “nasceu” na década de 90, quando HILL e JOHNSON (1995), sugeriram uma nova reclassificação para o gênero *Eucalyptus* baseados em características morfológicas e moleculares, excluindo as espécies chamadas de “bloodwood”. Com isso, surgiu o gênero *Corymbia* com 113 espécies que antes pertenciam ao gênero *Eucalyptus*. A espécie *Corymbia citriodora* ocorre naturalmente na Austrália e sua altura pode chegar até 50 metros e 1,2 de diâmetro. A madeira apresenta alta massa específica, podendo, em média alcançar 0,99 g/cm³, sendo indicada para plantio que visam usos múltiplos (BOLAND et al., 1994).

As áreas de ocorrência natural em Queensland (Austrália) ficam em Maryborough a Mackay cerca de 400 km no interior, sendo a mais extensa, e a menos extensa está limitada a locais altos e secos próximos a Atherton, Herberton e Monte Garnet (VIEIRA, 2004). Passando destas áreas sua ocorrência natural é menor.

A variação de latitude nas áreas do norte de QLD é de 16°45' a 20°35' S, enquanto a altitude varia de 450 a 1000 metros, as áreas mais ao sul são de 22°45' a 26°00' S de latitude, com altitudes de 70 a 400 metros (VIEIRA, 2004). Entretanto, segundo Ferreira et al. (1993) a área de ocorrência natural é restrita à zona costeira de Queensland, sendo o seu principal centro Mackay e Maryborough, onde a espécie penetra até 300 km para o interior do continente. Pode também ocorrer em regiões mais altas e mais secas, principalmente na macro-região de Atherton. As coordenadas geográficas dessas duas áreas são: Norte, macro região de Atherton: latitude 17° a 19,5° S, altitude 600 a 700 m; Sul região de Mackay e Maryborough: latitude 22° a 26° S, altitude 75 a 300 m.

O clima é moderadamente quente úmido ou sub úmido. Há variação na faixa de temperatura provocada pela quantidade de chuvas. A temperatura máxima média do mês, em locais mais úmidos, mais quente está na faixa de 30°C a 32° C, e a mínima média do mês mais frio está em torno de 9° a 12°C, mas nas áreas do interior essas faixas são de 34°C a 36°C e 5°C a 10°C, respectivamente. A precipitação média anual varia de 650 a 1600 mm com boa distribuição, ocorrendo à máxima no verão. O final do inverno e da primavera são secos.

A geografia de ocorrência *C. citriodora* é locais sinuosos, incluindo planaltos e serras mais secas, sendo tolerante a uma variedade de solos. Geralmente é freqüentemente encontrado em solos muito pobres, argilosos, preferindo algumas vezes subsolos bem drenados. Nas faixas secas de sua distribuição, ele ocorre em locais arenosos ao longo de vales profundos e rede de drenagens, onde se estendem para os topos. Esta espécie ocorre, principalmente nas matas em formação e florestas abertas (BOLAND et al.,1994).

O conhecimento do gênero *C. citriodora*, introduzido no Brasil, venho com os primeiros relatos devido a sua grande altura e folhas com cheiro semelhante aos de limão. A sua madeira excelente, forte e durável eram empregadas para pontes, calçamento e na fabricação de carros e rodas para carros. Devido ao seu crescimento extremamente rápido, existiam exemplares de nove meses com três metros de altura (LOFGREN, 1906).

3.1.2 *Eucalyptus saligna*

Eucalyptus deriva do grego e se refere à estrutura globular arredondada de seu fruto: *eu*=bem, *kaliptus*=cobrir. A angiosperma do gênero *Eucalyptus* é originária da Austrália, pertence à família das Mirtáceas e possui aproximadamente 700 espécies com diversas variedades, híbridos naturais e artificiais. As alturas dessas espécies variam de pequenos arbustos até grandes árvores (100 m), as quais cobrem cerca de 95 % da área florestal natural da Austrália e Tasmânia (MANGIERI e DIMITRI, 1971). Segundo os mesmos autores, este gênero ganhou maior importância nos plantios comerciais na América do Sul, devido a sua melhor adaptação em países de clima tropical e subtropical e, além disso, por possuir grande variedade de espécies.

No Brasil, as espécies do gênero *Eucalyptus* são uma das fontes de matéria-prima mais utilizada nas indústrias de celulose, carvão e móveis, em virtude de seu crescimento rápido em relação às essências nativas e por apresentar potencial de usos múltiplos. Além disso, apresenta características silviculturais desejáveis, tais como: incremento, forma e desrama natural, entre outras. A grande diversidade de espécies possibilita a adaptação do gênero às diversas condições de clima e solo (BÔAS, 2009).

Apesar de ser uma espécie exótica, Rizzini (1978) em seus estudos sobre as espécies brasileiras, considerou a importância do gênero. O autor descreve as principais espécies do gênero, destacando *E. paniculata*, *E. globulus*, *E. camaldulensis*, *E. grandis* e *E. saligna*, entre outras. Dentre estas espécies, *Eucalyptus saligna* é destacado por apresentar elevado potencial de adaptação e crescimento (KIKUTI e NAMIKAWA, 1990).

A espécie é típica de clima quente e úmido, onde a precipitação anual varia de 1.000 a 1.800 mm, tolera solos moderadamente férteis, com boa retenção de umidade, porém devem ser bem drenados (BARROS et al.,1990). Além disso, essa espécie é bastante resistente à ocorrência de geadas, tolerando temperaturas abaixo de 8 °C, sendo mais resistente que *E. grandis* (TURNBULL e PRYOR, 1978).

3.2 Tratamento térmico da madeira

Os três polímeros celulose, hemicelulose e lignina são os principais constituintes químicos da madeira, e em menor proporção os extrativos (Tabela 1). Esses influenciam diretamente no comportamento das propriedades físicas, químicas e mecânicas. Embora a madeira apresente excelentes propriedades tecnológicas, que permitem sua utilização para diversas finalidades, ainda existem determinadas características que podem limitar seu uso como, por exemplo, a instabilidade dimensional, a biodeterioração a inflamabilidade, dentre outros.

Tabela 1 - Constituintes químicos da madeira.

Componentes	Presença
Celulose	40 – 45%
Hemicelulose	20%
Lignina	15 - 35%
Outros constituintes	≥ 10%

(Fonte: Winandy e Rowell, 2005).

O tratamento térmico da madeira é um método estudado por muitos pesquisadores que buscam aumentar a qualidade da madeira, principalmente a estabilidade dimensional e a resistência biológica. Segundo Brito (2006) o processo de tratamento térmico da madeira é realizado com altas temperaturas as quais provocam o início da degradação de seus

constituintes químicos fundamentais, principalmente as hemiceluloses, que são mais sensíveis aos efeitos do calor, tais temperaturas estariam entre 100 e 250 °C.

Homan (2004) considera tratamento térmico todo o aquecimento da madeira a temperaturas maiores que 180°C em atmosfera com nitrogênio, vapor e óleo quente.

Brito (2006) refere-se ao tratamento térmico como um resultado do processo de torrefação, o qual a madeira é aquecida em temperaturas que causam a degradação em seus constituintes químicos fundamentais.

Segundo Rodrigues (2009), apesar das elevadas temperaturas utilizadas no processo não considera torrefação da madeira, pois o uso final da madeira é indicado para estruturas e exteriores devido à melhora das propriedades. Ainda segundo ele, para ser considerado torrefação o uso final da madeira seria para combustível.

As primeiras publicações científicas a respeito de madeira tratada termicamente foram realizadas por Hansen e Stamm, em 1930, na Alemanha. Logo após, na década de 40, White nos Estados Unidos. Em seguida, na década de 50 os alemães Bavendam, Runkel e Buro continuaram investigando o assunto. Na década de 60 foi à vez de Kollman e Schneider e na década de setenta Rusche e Burmester. Já na década de 90, os trabalhos de pesquisas foram desempenhados na Finlândia, França e Holanda. Em 1996, a instituição, VTT Technical Research Centre of Finland, na Finlândia (THERMOWOOD® HANDBOOK, 2003) realizou um estudo mais completo sobre o assunto.

Nestes países citados acima, onde o tratamento térmico é estudado a algumas décadas, este tratamento é empregado em escala industrial desde o início do ano 2000, inclusive com patentes na Finlândia, França, Holanda e Alemanha. As principais diferenças entre estes tratamentos estão no teor de umidade inicial da madeira, nas temperaturas e tempos em que as peças ficam expostas ao tratamento na utilização de oxigênio ou nitrogênio, na presença ou ausência de vapor, no processo seco ou úmido e na utilização de óleos. Em seguida são apresentadas as etapas deste processo, conforme Nunes (2009):

(1) THERMOWOOD®: Este processo apresenta três fases distintas: na primeira fase a madeira verde é seca a alta temperatura (100-130°C). Na segunda fase a madeira é exposta a $190 \pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura (Madeira Thermo-S) ou $212 \pm 2^\circ\text{C}$ (Madeira Thermo-D) durante 2-4 horas em função da qualidade do produto final. Na última fase é realizado o resfriamento e reumidificação para 4-8%, para estabilização da madeira. A letra “S” no Thermo-S’ indica estabilidade, e a letra “D” no Thermo-D indica durabilidade, sendo estas referentes à propriedade utilizada na classificação dos produtos nesta classe de tratamento;

(2) PLATO® WOOD: Método Holandês o qual utiliza quatro fases no tratamento térmico da madeira. A primeira é a Hidrotermólise na qual se aplica temperaturas entre 150-

180°C em condição aquosa sob pressão atmosférica entre 4-5 horas; a segunda fase corresponde a secagem convencional, que varia entre 3 e 5 dias; a terceira é a aplicação do tratamento térmico entre 150-190°C sob condições secas de 14-16 horas; e por último é feito o condicionamento que dura entre 2-3 dias;

(3) Retifiction[®] (bois retifié): Neste método, a madeira previamente seca (teor de umidade 12%), é submetida a temperaturas que variam entre 210 e 240°C em atmosfera de nitrogênio;

(4) Bois Perdure: Método Francês semelhante ao anterior, no qual a madeira verde é tratada (seca) a 230°C sob vapor gerado pela água contida na própria madeira;

(5) Oil Heat Treatment-OHT: Processo desenvolvido pela Alemanha, no qual a madeira é imersa em um tanque com óleo em temperaturas entre 180 e 220°C por 2-4 horas, sem considerar o tempo de aquecimento e resfriamento da madeira.

Segundo Esteves e Pereira (2009), o processo THERMOWOOD[®] criado pela VTT, é possivelmente o mais bem sucedido da Europa. Segundo os mesmos autores, dos cerca de 130. 800 m³ de madeira tratada termicamente em 2007, cerca de 50%, foi tratada pelo método THERMOWOOD[®]. O maior consumidor dessa madeira tratada é a Europa, aonde foram compradas 92% de todo o material tratado termicamente.

Nota-se que os trabalhos científicos dos processos citados acima não apresentam detalhes dos programas do tratamento térmico utilizados para as madeiras estudadas. Apenas trabalhos de pesquisadores como Unsal e Ayrilmis (2005), Brito et al. (2006) indicam resultados exatos sobre o efeito do tratamento térmico na madeira do gênero *Eucalyptus sp*, sem detalhar o processo adotado. Contudo, os mesmos autores afirmam que existe pouco estudo sobre o efeito dos tratamentos térmicos nas propriedades tecnológicas da madeira de *Eucalyptus*, principalmente sobre as propriedades físicas e mecânicas.

O tratamento térmico da madeira, em escala laboratorial, é geralmente realizado pelos pesquisadores em estufa elétrica, aonde a madeira é exposta ao ar aquecido com temperaturas variando entre 100 a 200°C, em um período que varia de 2 a 24 horas, para que ocorra a degradação dos constituintes químicos da madeira principalmente da hemicelulose (CALONEGO, 2009).

3.3 Propriedades da madeira modificada termicamente

A madeira quando aquecida passa por transformações químicas e físicas. Essas alterações estão ligadas diretamente a mudanças dos principais constituintes químicos da madeira: celulose, hemiceluloses e lignina, que se decompõem em diferentes formas (Figura 1).

De acordo com Davis e Thompson (1964), a degradação das hemiceluloses é o principal responsável pela diminuição da tenacidade da madeira, outra forma de denominação dessa propriedade. Segundo os mesmos autores, os constituintes de celulose e hemicelulose, lignina e hemicelulose estão baseadas em ligações covalentes que, quando expostas ao calor, acabam se rompendo, reduzindo a resistência ao impacto da madeira.

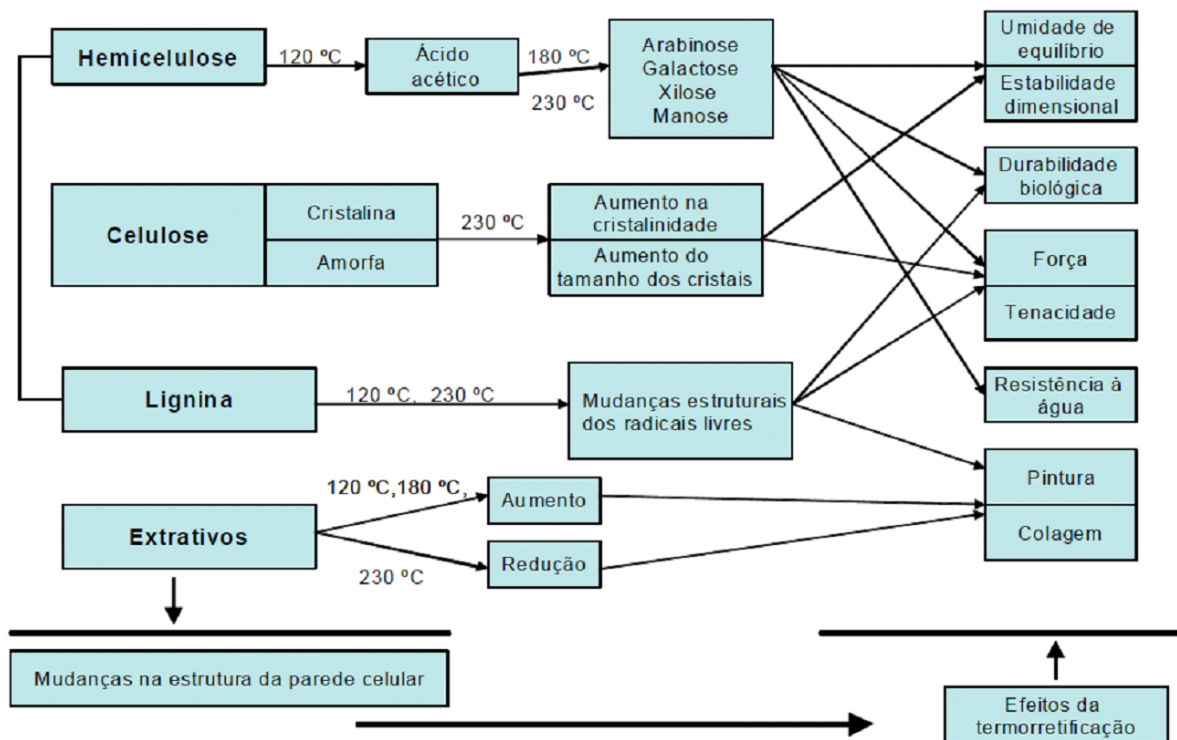


Figura 1- Mecanismos de reação de madeira modificada termicamente. (Fonte: ARAÚJO, 2010).

Segundo Modes (2010), dentre os constituintes químicos da madeira a hemicelulose degrada primeiro nas temperaturas entre 160°C e 260°C, devido a estrutura desorganizada (amorfa) e seu baixo peso molecular. Com isso, a hemicelulose é facilmente degradada se comparada com os outros constituintes químicos da madeira. Ainda segundo o mesmo autor, a eliminação da hemicelulose ramificada resulta em um aumento no índice de cristalinidade da celulose. Em temperaturas maiores que 220°C a celulose que é o constituinte com cadeias lineares sofre perdas. Já a lignina é um polímero rígido e estável que está associada com a

hemicelulose e celulose na composição de materiais lignocelulósicos. A lignina é um material hidrofóbico com estrutura tridimensional, altamente ramificada.

Segundo Severo e Tomaselli (2003), as hemiceluloses são menos estáveis entre os constituintes químicos da madeira, por isso podem ser facilmente degradadas nos estágios iniciais de aquecimento, influenciando diretamente na resistência da madeira. Segundo aos mesmos autores, a perda de resistência das hemiceluloses em contato com altas temperaturas deve-se a ausência de cristalinidade, configuração irregular e ramificada, baixa massa molecular, o que facilita a absorção de água e, conseqüentemente a degradação.

Em um tratamento térmico da madeira, além da temperatura, existem diversos fatores que influenciam no processo do tratamento, tais como a velocidade, o tempo, a atmosfera, a pressão, a espécie, dentre outros. A união desses fatores causa importantes modificações na organização do lenho, normalmente são obtidos materiais que possuem características diferenciadas da original. Dessa forma, é provável obter produtos conforme a interação de tal forma a atender um objetivo específico do processo (BRITO, 1993).

As principais alterações nas propriedades da madeira são o aumento da estabilidade dimensional e a diminuição da higroscopicidade. Contudo quando se avaliam as propriedades mecânicas, percebe-se um aumento ou diminuição de tais propriedades, causando algumas contradições entre os resultados encontrados por alguns autores. Algumas divergências levam a acreditar que estas mudanças variam entre espécies de madeiras e dependem dos parâmetros usados no tratamento térmico (ARAÚJO, 2010).

Durante o processo do tratamento térmico da madeira ocorrem diversas alterações químicas como a formação de ácidos carbônicos, principalmente dos ácidos acéticos e fórmicos, devido, respectivamente, à ruptura dos grupos acetilas das hemiceluloses e à degradação das hexoses (MILITZ e TJEERDSMA, 2001; SUNDQVIST et al., 2006).

A madeira, após o processo térmico, apresenta degradação de acordo com as condições do processo utilizado. Essa degradação ocorre nas propriedades que caracterizam a madeira, como a cor, umidade de equilíbrio, retração e inchamento e propriedades mecânicas, e estão relacionados com os fatores próprios deste material: espécie, dimensões dos corpos de prova, teor de umidade, temperatura, tempo de exposição, processo utilizado, gradiente de temperatura e condições da atmosfera do tratamento (JÄMSÄ e VIITANIEMI, 2001; MILITZ e TJEERDSMA, 2001).

4 Efeito do tratamento térmico nas propriedades físicas da madeira de *Corymbia citriodora* E *Eucalyptus saligna*.

4.1 Introdução

Alguns autores denominam as propriedades físicas como propriedades não mecânicas (PANSHIN; De ZEEUW, 1980; BENJAMIN, 2006). No geral, elas avaliam características intrínsecas da madeira (como teor de umidade, massa específica básica e aparente, cor, aparência) ou a estímulos físicos como alterações dimensionais nas trocas de água com o meio, na reação à eletricidade e reação ao calor.

As propriedades físicas mais empregadas na caracterização da madeira são o teor de umidade que é a quantidade de água existente na madeira em relação ao seu peso, a massa específica que é relação entre a massa e o volume da madeira, e a estabilidade dimensional que quantifica a variação dimensional promovida por ganho ou perda de água (SCANAVACA JR et al., 2004; CALONEGO, 2009).

A madeira é um material higroscópico, devido à composição química da parede celular, que contem diversos polímeros de celulose, hemicelulose e lignina que formam os grupos hidrofílicos. Dentre esses polímeros a hemicelulose é a mais hidrófila, favorecendo a troca de água com o meio, que contribui para a variação dimensional da madeira. Dessa forma, por exemplo, uma madeira seca em um ambiente úmido vai absorver a umidade até que atinja o equilíbrio com a atmosfera circundante. Da mesma forma, a madeira saturada, quando exposta em um local pouco úmido, perderá umidade até atingir o equilíbrio (HILL, 2006).

Segundo Borges et. al (2004), o ter de umidade causa mudanças nos tratamentos como curvamento, preservação, secagem, colagem, fabricação de compensados e aglomerados, produção de carvão vegetal, processamentos mecânicos, entre outros. Logo essas mudanças, principalmente o comportamento das variações dimensionais da madeira são importantes para a utilização das indústrias.

As relações de algumas propriedades físicas da madeira como umidade, densidade, retratibilidade e expansão volumétrica são de fundamental importância para um melhor aproveitamento dessa matéria prima (REZENDE, 2003; REZENDE et al.,1995).

A umidade na madeira é classificada em duas formas: água livre ou de capilaridade e água higroscópica ou de adesão. Essa umidade está presente na madeira na forma líquida ou de vapor. A água livre localizada nos vasos, canais e lúmen das células está sujeita a forças capilares e teoricamente é fácil de ser retirada. Ao contrário da anterior, a água higroscópica, é mais difícil de ser removida da madeira, pois este tipo de água está aderida por ligações de pontes de hidrogênio aos grupos hidroxílicos nas cadeias da celulose, hemicelulose e em menor extensão na lignina (SKAAR, 1972; SIAU, 1995).

Logo, durante a secagem da madeira, a água livre é a primeira a ser removida. Após toda essa água livre ser removida da madeira, a parede celular ainda estará saturada de água, esse momento é conhecido como ponto de saturação das fibras (PSF) (HAYGREEN e BOWYER, 1996). Esse ponto varia de espécie para espécie, com valores geralmente entre 28 e 30%.

Abaixo do PSF a madeira começa a perder a água higroscópica e nesta fase, ela entrará em equilíbrio com as condições do ambiente circundantes, ou seja, não recebe e não cede água para o meio, período denominado de umidade de equilíbrio da madeira (TUE). Entretanto, dificilmente a madeira entrará em equilíbrio com o meio, pois a temperatura e umidade relativa do ar estão sempre variando no meio ambiente (ZELINKA, 2010). Além da temperatura do ar e umidade relativa do ar, outro fator como massa específica, teor de extrativos e histórico de exposição são importantes e devem ser considerados para atingir a umidade de equilíbrio (SIAU, 1995).

A madeira quando exposta a umidades relativas do ar decrescentes, assume um teor de umidade de equilíbrio cada vez menor, gerando uma curva de dessorção inicial. Ao expor a mesma peça de madeira, depois de seca, a uma umidade relativa do ar crescente, obtém uma curva de adsorção. A diferença de umidade de equilíbrio entre essas curvas, para uma mesma condição de umidade relativa, é conhecida como histerese (SIAU, 1995; GLASS; ZELINKA, 2010). Quando a madeira é exposta novamente a um novo ciclo de dessorção, a curva de dessorção inicial não é reproduzível, devido à redução da higroscopicidade (Figura 2).

Em síntese, a histerese é um fenômeno, em que, sob uma mesma condição de temperatura e umidade relativa do ar, gera diferente umidade de equilíbrio com o ambiente, de acordo com a exposição da madeira a ciclos de dessorção e adsorção. Esse fenômeno causa efeitos irreversíveis na redução da umidade de equilíbrio da madeira, causado pela reidratação incompleta dos sítios higroscópicos durante o ciclo de adsorção subsequente, e aos estresses de compressão causados pela contração ocorrida na dessorção inicial (SIAU, 1995; BATISTA, 2012).

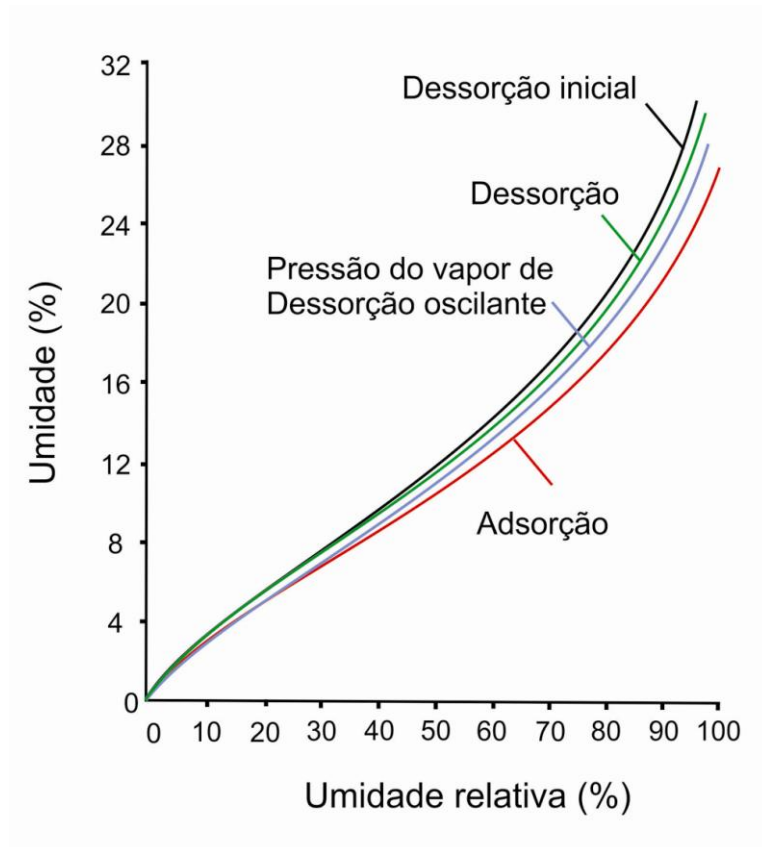


Figura 2 - Relação sob adsorção e duas condições de dessorção (Fonte: BATISTA, 2012).

Assim como o teor de umidade da madeira, a massa específica também é muito importante na caracterização da madeira e, segundo Batista (2012), é uma das propriedades mais estudadas, porque está ligada diretamente com a umidade da madeira, variação dimensional, resistência mecânica, propriedades térmicas, elétricas e acústicas, servindo também como indicador da qualidade e uso da madeira.

A massa específica varia de acordo com a espécie, teor de umidade, estrutura anatômica (cerne e alburno, lenho inicial e tardio, lenho adulto e juvenil), extrativos e composição química (TSOUMIS, 1991). Além das características intrínsecas da madeira, outros fatores relacionados ao meio em que a árvore se desenvolveu, influenciam na massa específica, como os fatores do clima, solo, tratos culturais, silviculturais e manejo.

Devido às limitações da madeira, há muitos anos os cientistas pesquisam novas técnicas para melhorar suas propriedades, e assim aumentar a sua utilização e durabilidade natural. Dessa forma, diferentes estudos vêm sendo empregados, e dentre eles, surgiu o tratamento térmico. Este método é um dos mais antigos, mais fáceis e mais baratos para melhorar as propriedades físicas da madeira como a higroscopicidade e a estabilidade dimensional (ARAÚJO, 2010).

O tratamento térmico basicamente é um processo pelo qual a madeira é submetida a altas temperaturas, inferiores a sua combustão, que provocam o início da degradação de seus constituintes químicos fundamentais, sobretudo as hemiceluloses que são, dentre eles, os mais sensíveis à ação do calor (BRITO, 2006).

As temperaturas utilizadas no processo estariam entre 100 e 250 °C, segundo Guedira (1998), o que resulta na obtenção de um produto sólido apresentando características diferenciadas, comparativamente à sua madeira original, algumas delas podendo tornar-se interessantes para aplicações diversas da madeira.

Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito do tratamento térmico nas propriedades físicas da madeira de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*, por meio dos ensaios de umidade de equilíbrio, redução de massa, perda de massa específica, coeficiente de inchamento total (linear e volumétrico) e coeficiente de anisotropia. Assim buscou-se aumentar a resistência física da madeira e conseqüentemente sua qualidade e maior valor agregado.

4.2 Material e métodos

4.2.1 Coleta e preparo do material

Foram utilizadas as espécies de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*, obtidas de plantios pertencentes Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária – FEPAGRO FLORESTAS, localizada em Boca do Monte, distrito de Santa Maria – RS. Foram seccionadas 3 árvores de cada espécie, com aproximadamente 40 anos de idade, das quais foram retiradas as duas primeiras toras de 3 metros de comprimento, para a confecção das tábuas de aproximadamente 2,5 X 15,0 X 280 cm (espessura, largura e comprimento), pelo método de desdobro tangencial, utilizando uma serra de fita vertical. Em seguida, ao desdobro das toras em tábuas, realizada na serraria pertencente à FEPAGRO FLORESTAS, as tábuas foram transportadas para o Laboratório de Produtos Florestais (LPF), da Universidade Federal de Santa Maria, aonde foi conduzido o preparo do material, para o tratamento térmico e estudos das propriedades que foram avaliadas. Todas as tábuas foram secas em estufa piloto de secagem convencional, com capacidade nominal de aproximadamente 1 m³ de madeira serrada. Utilizou-se o programa de secagem com temperatura inicial de 39C° e 40C°,

temperatura final 68°C e 67°C e potencial de secagem 2,1 (relação Umidade da madeira/Teor de umidade de equilíbrio) para *C. citriodora* e *E. saligna*, respectivamente.

Posteriormente a secagem das tábuas, com teores de umidade média de 10%, foram dimensionadas com auxílio de uma serra circular para a confecção dos corpos de prova correspondentes ao tratamento térmico. Logo após o tratamento, os corpos de prova foram redimensionados para a realização de todas as avaliações e em seguida foram colocados na câmara climatizada (20°C de temperatura e 65% umidade relativa), para a estabilização do peso, sendo o ponto inicial para os ensaios.

4.2.2 Tratamento térmico

O tratamento térmico da madeira foi realizado numa estufa elétrica com circulação de ar e controle digital de temperatura (Figura 3 A). Para evitar a ocorrência de defeitos na madeira, devido às altas temperaturas, foram colocadas cargas (pesos) sobre as peças durante a secagem drástica em estufa elétrica (Figura 3 B).

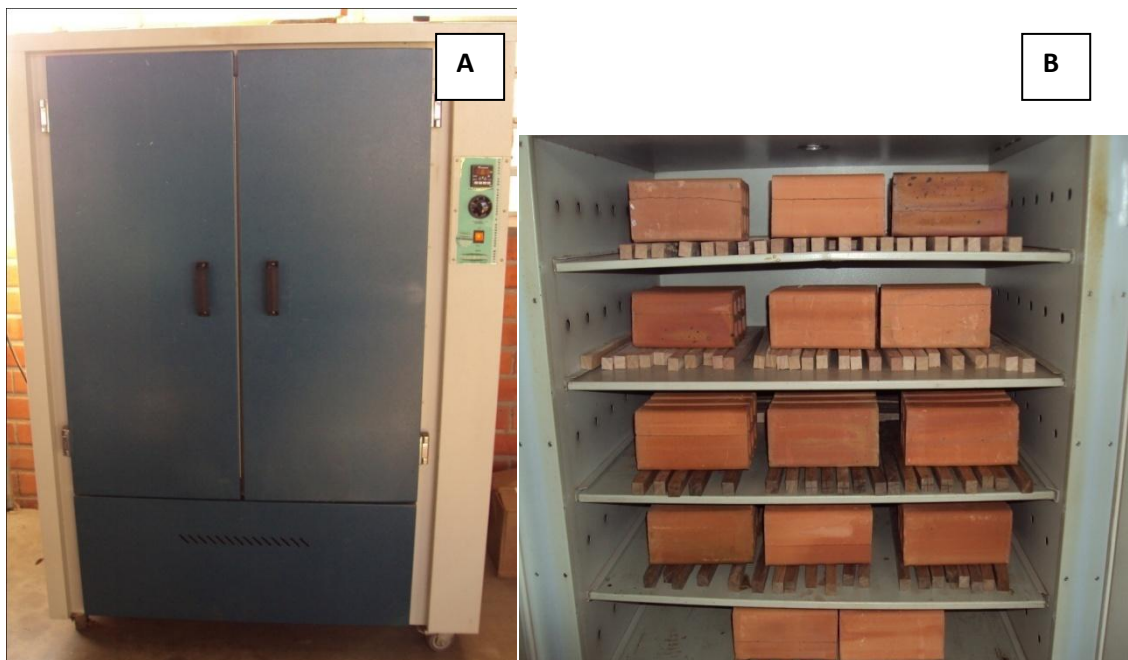


Figura 3 - Estufa utilizada no tratamento térmico (A), uso de cargas sobre os corpos de prova (B) (Fonte: o autor).

Para a confecção das amostras do tratamento térmico, utilizaram-se tábuas livres de defeitos, tais como empenamentos, rachaduras, nós, manchas, etc. Destas foram cortadas

corpos de prova com 2,0 x 2,0 x 32 cm de espessura, largura e comprimento respectivamente, sendo que parte destas peças foram utilizadas como testemunha, sem tratamento térmico, para fins de comparação com o material.

O tratamento térmico foi conduzido de acordo com a metodologia de Calonego (2009), aplicando-se temperatura inicial de 100°C por 14 horas, para reduzir o teor de umidade para próximo de 3% evitando provável problema de expansão de vapor de água e rompimento da parede celular. Logo após esse período, os corpos de prova passaram por um aumento de temperatura até as temperaturas finais de 140°C, 160°C e 180°C. Os corpos de prova foram mantidos em cada uma destas temperaturas finais por 2,5 horas (Figura 4).

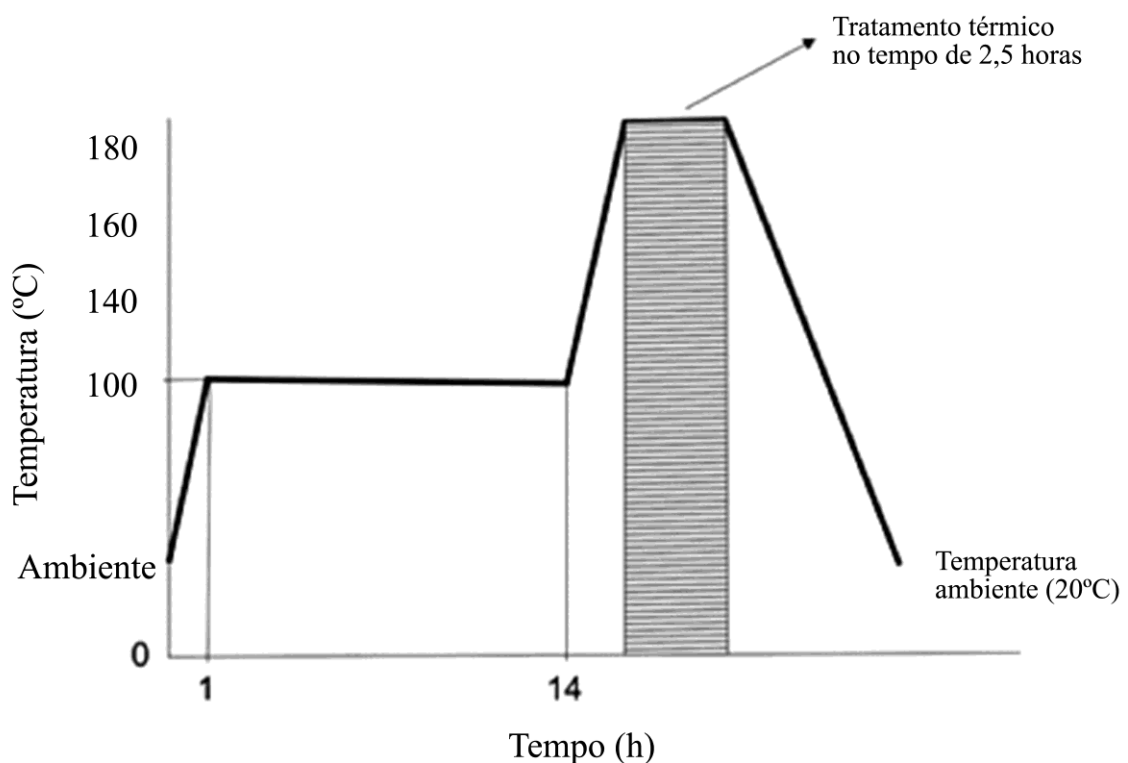


Figura 4 - Programa de tempo-temperatura adotado para o tratamento térmico da madeira de *C. citriodora* e *E. saligna* (Fonte: CALONEGO, 2009).

Ao término do tratamento térmico, a estufa foi desligada e os corpos de prova foram mantidos até o resfriamento natural de aproximadamente 20°C. Antes e após a aplicação do tratamento, as peças foram pesadas com balança digital de precisão 0,01g e medidas com auxílio de um paquímetro com precisão 0,1 mm, para a determinação da massa e o volume respectivamente, para posterior cálculo das propriedades físicas da madeira.

O experimento utilizou-se de 8 tratamentos com um total de 64 corpos de prova por tratamento, sendo no total 512 corpos de prova, 256 para cada espécie (Tabela 2).

Tabela 2 - Tratamento utilizados no experimento.

Espécie	Tratamentos	Tempo (h)	Tratamentos
<i>Eucalyptus Saligna</i>	T1	2,5	Testemunha
	T2		140 °C
	T3		160 °C
	T4		180 °C
	T5		Testemunha
<i>Corymbia Citriodora</i>	T6	2,5	140 °C
	T7		160 °C
	T8		180 °C

4.2.3 Propriedades físicas

Para a realização dos ensaios físicos foi utilizado os procedimentos estabelecidos na norma ASTM D 143-94 (ASTM, 2000) e adaptações nas dimensões dos corpos de prova dos ensaios. Os corpos de prova apresentaram dimensões nominais de 2,0 x 2,0 x 8,0 cm, orientados nas direções radial, tangencial e axial, respectivamente.

4.2.3.1 Umidade de equilíbrio

Para a determinação desta variável foram obtidas massas constantes das amostras em equilíbrio higroscópico e na secagem em estufa a 103 ± 2 °C, conforme a Equação 1.

$$UE = \frac{M_C - M_0}{M_0} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

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

MC = Massa constante na condição de equilíbrio higroscópico (g);

M_0 = Massa constante na condição de secagem em estufa a 103 ± 2 °C (g).

4.2.3.2 Redução de massa

O cálculo foi realizado apenas nos corpos de prova que receberam o tratamento térmico. Consistiu na pesagem das amostras retirado da câmara climatizada (20°C e 65% de umidade relativa), antes do tratamento térmico, e logo após o tratamento. As pesagens foram realizadas com balança digital (Equação 2).

$$R = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

R = Redução de massa (%);

M_1 = Massa da madeira antes do tratamento térmico (g);

M_2 = Massa da madeira após o tratamento térmico (g).

4.2.3.3 Perda de Massa específica

A variável foi determinada pela massa e volume das amostras após o tratamento térmico na umidade de equilíbrio de 12%, em câmara climatizada (20°C e 65% UR), de acordo com a Equação 3.

$$\rho = \frac{M_{12\%}}{V_{12\%}} \quad (3)$$

Onde:

ρ = massa específica das amostras antes e após o tratamento térmico na umidade de equilíbrio de 12% (20°C e 65% UR) (g/cm³);

$M_{12\%}$ = massa das amostras a 12% de umidade relativa (g);

$V_{12\%}$ = volume da amostra a 12% de umidade (cm³).

4.2.3.4 Coeficiente de inchamento total

Para essas determinações, as amostras tratadas e as testemunhas foram submersas em água até a completa saturação das fibras e depois, foram secas em estufa $103\pm 2^\circ\text{C}$. Após cada um desses procedimentos, mediu-se as dimensões das amostras na direção radial, tangencial, longitudinal e calculou-se o inchamento linear e volumétrico por meio da Equação 4 e Equação 5.

$$\alpha_L = \frac{D_U - D_0}{D_0} \times 100 \quad (4)$$

$$\alpha_V = \frac{V_U - V_0}{V_0} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

α_L - inchamento linear, %;

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

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

α_V - inchamento volumétrico, %;

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

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

4.2.3.5 Coeficiente de anisotropia de inchamento

Com base nos cálculos anterior de inchamento linear tangencial e radial, determinou-se o coeficiente de anisotropia de inchamento, de acordo com a Equação 6.

$$C.A = \frac{IT}{IR} = (6)$$

Onde:

C.A = Coeficiente de anisotropia de inchamento;

IT = Inchamento tangencial, %;

IR = Inchamento radial, %.

4.3 Análise estatística

O conjunto de dados foi organizado em programa Excel 2007®, e avaliados estatisticamente pelo uso do software Statgraphics Centurion XV.II. Quando observando diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey em 5% de probabilidade de erro. Os efeitos dos tratamentos foram avaliados com auxílio de análise de variância.

4.4 Resultados e discussão

4.4.1 Umidade de equilíbrio

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios da umidade de equilíbrio para as madeiras de *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora*, submetidas ao tratamento térmico e das testemunhas. Os resultados mostram que as médias de umidade de equilíbrio foram diferentes entre os tratamentos, evidenciando que houve interação significativa entre o método e a temperatura de tratamento térmico. Observa-se que os valores diminuíram com o aumento da temperatura para todos os tratamentos.

A testemunha, madeira não tratada termicamente, apresentou o maior valor de umidade de equilíbrio para as duas espécies, 12,7% para *E. saligna* e 12,1% *C. citriodora*, quando comparada com as tratadas termicamente, comprovando que os tratamentos térmicos reduzem a higroscopicidade da madeira.

Tabela 3 - Médias de umidade de equilíbrio das madeiras de *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora* em função dos tratamentos.

Espécie	Tratamentos	Umidade de equilíbrio de 12%		
		Média (%)	C.V. (%)	Redução em relação à média (%)
<i>Eucalyptus saligna</i>	Testemunha	12,7 a	4,66	--
	140°C	8,8 b	10,18	30,3
	160°C	7,9 c	17,77	37,8
	180°C	7,0 d	6,70	44,6
<i>Corymbia citriodora</i>	Testemunha	12,1 a	2,52	--
	140°C	7,9 b	5,93	34,4
	160°C	7,1 c	5,92	41
	180°C	5,5 d	5,17	54,3

Sendo: C.V. - coeficiente de variação, %; médias seguidas pela mesma letra, para a mesma espécie, não diferem estaticamente ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

As maiores reduções da umidade de equilíbrio nas duas espécies, em relação à testemunha, foram encontradas nos tratamentos de maiores temperaturas (180°C) com reduções de 44,6% e 54,3%, para as espécies de *E. saligna* e *C. citriodora*, respectivamente. Valores semelhantes ao exposto foram encontrados por Jämsä e Viitaniemi (2001), que ao submeter à madeira ao tratamento térmico encontraram reduções de até 50% do teor de umidade. Segundo os autores, essa diminuição ocorre devido à perda de sítios de adsorção e há degradação parcial das hemiceluloses. Já a menor redução foi obtida nas menores temperaturas de 140°C, com reduções de umidade de equilíbrio de 30,3% e 34,4%.

A redução da umidade de equilíbrio, em função do aumento da temperatura foi observada por outros pesquisadores como Calonego (2009) e Batista (2012), que ao tratarem a madeira de *Eucalyptus grandis*, encontraram as maiores reduções (49,3%) na temperatura de 220°C e 41,11% na temperatura de 180°C. Conforme GLASS e ZELINKA, 2010; BATISTA e KLITZKE, 2010; CALONEGO, 2009; BATISTA, 2012, a principal responsável pela redução da umidade de equilíbrio para uma mesma condição de umidade relativa e temperatura é a histerese. Esse fenômeno é ocasionado na madeira pela degradação dos sítios higroscópicos (grupos hidroxílicos), durante o aquecimento da madeira nos ciclos de dessorção e adsorção. Ainda, segundo Boonstra e Tjeerdsma (2006), a menor disponibilidade

de grupos hidroxílicos é ocasionada pela cristalização da celulose e aumento das ligações cruzadas na lignina que conseqüentemente, aumenta a estabilidade dimensional.

4.4.2 Redução de massa

Na Tabela 4 são apresentados os valores de redução de massa das madeiras de *E. saligna* e *C. citriodora* em comparação com a testemunha. As menores perdas de massa, para ambas as espécies, foram encontradas nas madeiras submetidas às menores temperaturas, sendo 8,83% *Eucalyptus saligna* e 6,30% para *Corymbia citriodora*. Todas as médias de perda de massa foram significativas estatisticamente entre si.

Tabela 4 - Médias de redução de massa das madeiras de *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora* em função dos tratamentos.

Espécie	Tratamentos	Redução de massa	
		Média (%)	C.V. (%)
<i>Eucalyptus saligna</i>	140°C	8,83 a	3,61
	160°C	9,79 b	3,62
	180°C	10,93 c	4,75
<i>Corymbia citriodora</i>	140°C	6,30 a	5,48
	160°C	8,14 b	9,48
	180°C	12,12 c	6,29

Sendo: C.V. - coeficiente de variação, %; médias seguidas pela mesma letra, para a mesma espécie, não diferem estatisticamente ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

Os maiores valores médios de redução de massa encontrados neste trabalho foram os tratamentos de maiores temperaturas (10,93% e 12,12%), para as duas espécies, estão próximos dos resultados obtidos por Modes (2010), que encontrou perda de massa entre 11,7% e 12,9% nas espécies *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda* respectivamente. Entretanto, os valores máximos encontrados neste trabalho para a perda de massa estão acima dos valores proposto pela patente do processo Thermowood da Finlândia, que segundo Esteves et al.

(2008), indica uma perda de massa entre 3% e 5% para aumentar a estabilidade dimensional e a durabilidade natural da madeira.

Resultados menores que deste trabalho para perda de massa, foram encontrados por Brito et al. (2006), 9,6% e 8,7% avaliando as madeiras de *P. caribaea* var. *hondurensis* e *E. saligna* respectivamente, tratadas a 180°C em condições secas.

A redução de massa da madeira tratada termicamente ocorre possivelmente segundo Brito, (2006) e Modes (2010), pela degradação de alguns constituintes fundamentais da parede celular, em especial a hemicelulose, que é a mais sensível ao calor.

4.4.3 Perda de massa específica

As médias de massa específica encontradas neste estudo estão apresentados na Tabela 5. Observa-se que a massa específica aparente da madeira de *E. saligna* reduziu de 0,86 g/cm³ para 0,83 g/cm³, nos tratamentos da testemunha e 180°C, respectivamente. Todavia, essa diferença não foi estatisticamente significativa ao nível de 5% pelo teste Tukey. Nos tratamentos de 140°C e 160°C houve um aumento da massa específica em relação à testemunha de 1,41% e 1,79%, respectivamente.

Tabela 5 - Médias da massa específica aparente de *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora* em função dos tratamentos.

Espécie	Tratamentos	Massa específica aparente a 12% TUE (g/cm ³)		
		Média (%)	C.V. (%)	Redução ou (aumento) (%)
<i>Eucalyptus saligna</i>	Testemunha	0,86 ab	5,60	--
	140°C	0,875 a	5,74	(1,41)
	160°C	0,88 a	5,55	(1,79)
	180°C	0,83 b	3,41	3,63
<i>Corymbia citriodora</i>	Testemunha	1,06 a	2,71	--
	140°C	1,02 b	5,23	3,81
	160°C	0,97 c	4,06	8,25
	180°C	0,94 d	5,24	11,46

Sendo: C.V. - coeficiente de variação, %; médias seguidas pela mesma letra, para a mesma espécie, não diferem estatisticamente ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

Para *C. citriodora* obteve-se em decorrência dos tratamentos, uma redução estatística significativa ao nível de 5% na massa específica entre todos os tratamentos. O valor de massa específica alterou de 0,94 g/cm³ na maior temperatura até 1,06 g/cm³ para a testemunha. A maior redução foi de 11,16% na temperatura de 180°C e a menor de 3,81% na temperatura de 140°C para a espécie de *C. citriodora* em relação à testemunha. Resultado semelhante foi encontrado por Unsal e Ayrilmis (2005) que ao aplicar o tratamento térmico na madeira de *Eucalyptus camaldulensis* a temperaturas de 150°C e 180°C por 10 horas, alcançaram reduções de 7,1% e 10,0% nas suas massas específicas a uma umidade de 12%. Calonego (2009) encontrou redução de massa específica a 12% de umidade, para a madeira de *Eucalyptus saligna*, de 3,8% a 12,2% nas temperaturas 140°C e 220°C.

Os resultados da perda de massa específica nas madeiras de *E. saligna* e *C. citriodora*, eram esperados, pois segundo Homan et al. (2000), Waskett e Selmes (2001) e Thiam et al. (2002), a madeira aquecida em altas temperaturas degradam alguns constituintes químicos, o que em consequência, provoca a perda de massa e diminuição das massas específicas aparentes.

4.4.4 Coeficiente de inchamento total e anisotropia

A Tabela 6 apresenta os valores médios do inchamento total (linear e volumétrico), e o coeficiente de anisotropia das madeiras de *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora* em relação aos tratamentos. No geral, os valores médios do inchamento total e o coeficiente de anisotropia, modificados termicamente, foram estatisticamente diferentes. Apenas os valores médios do inchamento radial e longitudinal na temperatura de 140°C, para ambas as espécies, e longitudinal na temperatura de 160°C para a espécie de *Eucalyptus saligna*, não apresentaram a mesma tendência, os quais a média do tratamento de 140°C (7,03%), (7,57%) para radial e (0,32%), (0,34%) longitudinal para as espécies de *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora*, não diferiram estatisticamente das testemunhas radial (7,33%) e longitudinal (0,32%) para a espécie de *Eucalyptus saligna* e a testemunha radial (7,74%) e longitudinal (0,34%) para a espécie de *Corymbia citriodora*.

Tabela 6 - Médias do inchamento total e coeficiente de anisotropia das madeiras de *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora* em função dos tratamentos.

Espécie	Tratamentos	Inchamento total (%)					Redução volumétrica	Coeficiente de anisotropia
		Radial	Tangencial	Longitudinal	Volumétrico			
<i>Eucalyptus saligna</i>	Testemunha	7,33 a (10,58%)	12,02 a (9,05%)	0,32 a (7,59%)	20,63 a (8,76%)	--	1,65 a (11,19%)	
	140°C	7,03 ab (7,85)	10,0 b (5,75%)	0,32 ab (5,85%)	18,11 b (4,78%)	12,19	1,43 b (9,44%)	
	160°C	6,70 b (9,67%)	8,55 c (6,33%)	0,32 a (9,03%)	16,20 c (7,04%)	21,44	1,28 c (8,13%)	
	180°C	6,0 c (18,08%)	7,06 d (13,40%)	0,30 b (6,05%)	13,83 d (10,87%)	32,96	1,22 c (23,13%)	
<i>Corymbia citriodora</i>	Testemunha	7,74 a (8,0%)	12,13 a (5,52%)	0,35 a (6,52%)	21,23 a (5,49%)	--	1,57 a (8,05%)	
	140°C	7,57 ab (3,96%)	10,07 b (5,81%)	0,34 a (5,27%)	18,80 b (4,24%)	11,45	1,33 b (6,28%)	
	160°C	7,03 b (16,08%)	8,98 c (13,58%)	0,32 b (9,45%)	17,02 c (14,43%)	19,82	1,28 bc (7,48%)	
	180°C	6,07 c (13,07%)	7,52 d (13,41%)	0,29 c (8,20%)	14,38 d (13,26%)	32,27	1,24c (3,90%)	

Sendo: Números entre parênteses correspondem ao coeficiente de variação, (%); médias seguidas pela mesma letra, para a mesma espécie, não diferem estaticamente ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

Valores diferentes ao exposto na Tabela acima, para ambas as espécies, foram obtidos por Batista (2012) para as testemunhas com maiores valores médios de 8,88%, 4,18% e 0,34% e menores na temperatura de 180°C de 5,45%, 3,05% e 0,27% para a orientação tangencial, radial e longitudinal. Já esses resultados encontrados enquadram-se aos de Oliveira e Silva (2003) para *Eucalyptus saligna*, Chauhan e Aggarwal (2004) para *Fagus grandifolia*, os quais obtiveram valores estipulados de inchamento linear tangencial, radial e longitudinal variando entre 3,5 e 15,0%, entre 2,4 e 11,0% e entre 0,1 e 1,0%.

Os valores médios obtidos neste estudo para o tratamento testemunha de inchamento volumétrico foram de 20,63% e 21,23%, das espécies de *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora*. Esses valores médios estão superiores aos valores de 14,12% encontrados por

Calonego (2009) e aos 13,40% encontrados por (BATISTA, 2012). A menor média, neste estudo, 13,83% e 14,38%, para ambas as espécies, foi obtida na maior temperatura de 180°C. Todas as médias de inchamento volumétrico para todos os tratamentos em ambas as espécies diferiram estatisticamente. As maiores reduções na média do inchamento volumétrico, ou seja, as menores variações na madeira ocorreram para ambas às espécies, no tratamento de 180°C, com valores próximos de 32,96% para *Eucalyptus saligna* e 32,27% para *Corymbia citriodora*.

Os resultados de reduções do inchamento volumétrico obtidos neste estudo de 12,19%, 21,44%, 32,96% de *Eucalyptus saligna* e 11,45%, 19,82%, 32,27% para *Corymbia citriodora*, respectivamente para as temperaturas de 140°C, 160°C e 180°C, são semelhantes aos alcançados por Calonego (2009) que obteve reduções 14,5%, 23,2% e 29,6%, para as temperaturas de 140°C, 160°C e 180°C, para a espécie de *Eucalyptus grandis*. Os resultados encontrados por Batista (2012) estão um pouco acima dos valores médios obtidos neste estudo com 16,94%, 34,18%, 34,55% para as temperaturas de 140°C, 160°C e 180°C.

Os valores médios de coeficiente de anisotropia da Tabela 6 demonstram que o tratamento térmico diminui significativamente o fator anisotrópico (relação T/R) das madeiras de *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora*. Todos os tratamentos diferiram estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade da testemunha. Os maiores valores médios foram obtidos pelas testemunhas com 1,65 para *Eucalyptus saligna* e 1,57 para *Corymbia citriodora*. Os menores valores médios para ambas as espécies foram obtidos na temperatura de 180°C. Valores próximos foram alcançados por Calonego (2009) com 1,70, 1,56, 1,61 e 1,54 para a testemunha e as temperaturas 140°C, 160°C e 180°C, respectivamente.

Segundo Oliveira e Silva (2003); Chauhan e Aggarwal, (2004); os inchamentos apresentam-se diferentes nas três direções anatômicas da madeira, logo, quando há uma redução desses valores nas direções tangencial e radial há uma redução na instabilidade dimensional das madeiras.

A redução da instabilidade dimensional da madeira após o tratamento térmico é explicada por Stamm (1964), Calonego (2009), Batista (2011), como sendo um fenômeno químico que ocasiona a degradação de alguns constituintes químicos fundamentais da estrutura anatômica da madeira. Ainda, segundo esses mesmos autores, esses constituintes como a celulose, sofre cristalização, devido à destruição dos grupos hidroxílicos livres na região amorfa da mesma e a reticulação dos polímeros que compõem a madeira durante o seu tratamento. As hemiceluloses também são degradadas e com isso torna a madeira menos higroscópica, resultando na redução do inchamento total e coeficiente de anisotropia da madeira.

4.5 Conclusões

Após o efeito do tratamento térmico nas propriedades físicas da madeira de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna* conclui-se:

O efeito do tratamento térmico nas duas espécies foi evidenciado em todos os ensaios físicos aplicados.

A umidade de equilíbrio da madeira diminuiu com o aumento da temperatura do tratamento térmico, sendo reduzido pela metade a 180 °C.

A redução de massa foi significativa para ambos os tratamentos e para ambas as espécies.

A perda de massa específica da madeira foi estatisticamente significativa para todos os tratamentos da espécie de *Corymbia citriodora*, ao contrário de *Eucalyptus saligna*, a qual teve aumento na massa específica e só reduziu significativamente no tratamento de maior temperatura.

O inchamento total e coeficiente de anisotropia tiveram as maiores reduções dos valores médios, nas maiores temperaturas do tratamento.

5 Efeito do tratamento térmico nas propriedades mecânicas da madeira de *Corymbia citriodora* E *Eucalyptus saligna*.

5.1 Introdução

Além das propriedades físicas, as propriedades mecânicas da madeira também são estudadas e avaliadas por diversos pesquisadores. A caracterização mecânica é necessária para a utilização da madeira, principalmente na sua forma sólida, possibilitando o seu dimensionamento adequado. Ao contrário das propriedades físicas, as mecânicas são mais difíceis de serem avaliadas, pois dependem de máquinas de ensaio com um custo mais elevado. Entretanto, a caracterização da madeira para a construção civil, por exemplo, é de extrema importância, pois exige o conhecimento das características para o uso adequado da mesma.

No entanto, as propriedades mecânicas estão ligadas as propriedades físicas, pois essas afetam a resistência da madeira, principalmente pela variação do teor de umidade. A resistência da madeira aumenta com a diminuição da umidade e vice versa. Logo, para comparar as propriedades mecânicas, os teores de umidades devem ser constantes, ou seja, em condição saturada ou a uma determinada umidade de equilíbrio com o meio, normalmente entorno de 12 a 15% (ARNOLD, 2010).

A madeira quando tratada termicamente, tem sua higroscopicidade reduzida em relação a natural, devido à perda de massa de hemiceluloses, com isso, consegue-se atingir menores valores de umidade de equilíbrio, o que é favorável para o aumento da resistência mecânica (BORREGA; KARENLAMPI, 2008). Porém, segundo aos mesmos autores, em um estudo do módulo de elasticidade e ruptura em flexão estática da madeira tratada termicamente, de *Picea abies*, obteve-se um aumento da resistência, devido à redução da higroscopicidade, mas até a perda de massa de apenas 3% para ambos os testes.

Os principais ensaios mecânicos empregados na caracterização da madeira são: flexão estática e dinâmica, compressão paralela e normal às fibras, cisalhamento paralelo às fibras, dureza e tração paralela e normal às fibras (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).

A resistência mecânica da madeira é caracterizada pela capacidade de sustentar carga ou forças externas que possam provocar deformações na mesma (TSOUMIS, 1991; BATISTA, 2012). A resistência à deformação na madeira determina a dimensão em que o

material é comprimido, flexionado ou distorcido sob o efeito da tensão de tração, compressão e cisalhamento. Essas tensões são geradas por forças internas proporcionadas em resposta a aplicação do carregamento externo (WINANDY; ROWELL, 1984).

As deformações ocasionadas na madeira pela tensão da carga podem ocorrer até o ponto conhecido como limite de proporcionalidade (elástico), em que, acima dele, o aumento da carga causa deformação maior e não proporcional (plástica), até a ruptura do material (WINANDY; ROWELL, 1984; TSOUMIS, 1991). Logo, abaixo do limite de proporcionalidade, a razão entre tensão e deformação é dada pela inclinação da reta e demonstra-se, como um valor constante chamado de módulo de elasticidade (MOE) (Figura 5).

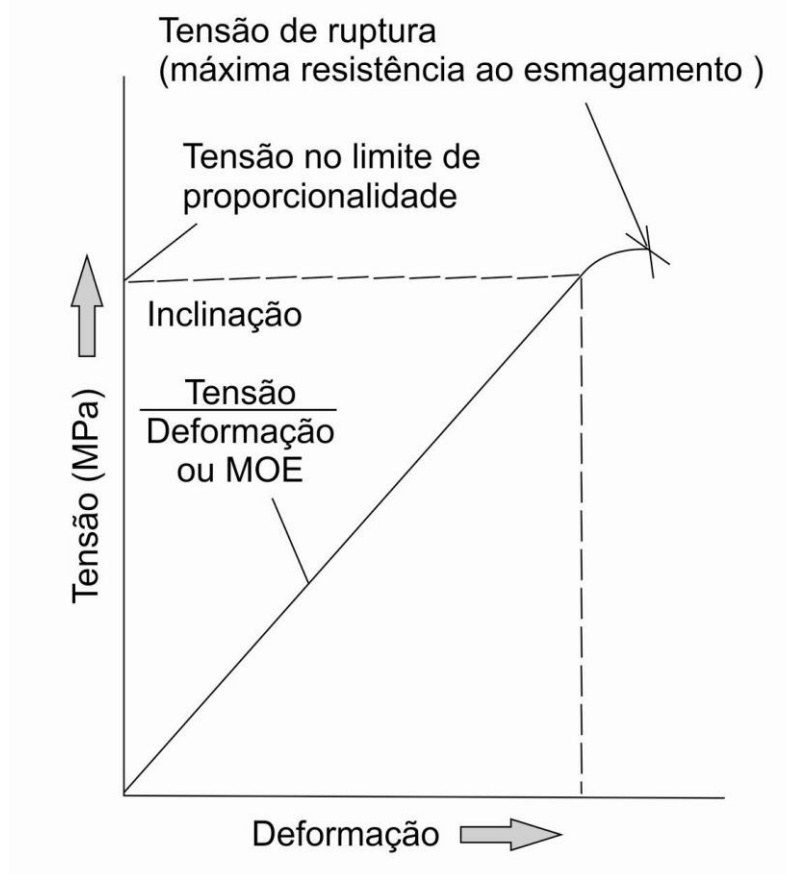


Figura 5 - Diagrama de tensão pela deformação específica (Fonte: o autor).

Este módulo é determinado na região em que a madeira se comporta como um material elástico e dessa forma, é usada para determinar os ensaios de flexão, compressão e tração (HAYGREEN e BOWYER, et al. 1996).

A resistência mecânica é determinada pela medida máxima da tensão que a madeira suporta (na ruptura), denominado no caso de ensaio de flexão como módulo de ruptura (MOR). Com estes valores obtêm-se as tensões aceitáveis para as varias formas de utilização da madeira (CALONEGO, 2012).

Os valores do MOE e do MOR variam em função da espécie, do teor de umidade em que se encontra a madeira e da massa específica do material. Segundo Haygreen e Bowyer (1996), o MOE, em flexão das madeiras, varia entre 3500 MPa e 19300 MPa. Para o MOR em flexão, esta resistência varia entre 55 e 160 MPa (TSOUMIS, 1991), sendo esta uma propriedade importante para aplicações da madeira em móveis e estruturas (WINANDY; ROWELL, 1984). Para Tsoumis (1991), após o estudo de muitas madeira de coníferas e folhosas, encontrou valores de MOE (12% de umidade) que variam comumente entre 6.600 e 16.170 MPa, e são representados respectivamente pelas espécies de folhosas *Triplochiton Scleroxylone* e *Betula* sp. (TSOUMIS, 1991).

A compressão paralela às fibras é outro fator importante que auxilia no dimensionamento de madeira para fins estruturais, sobretudo em colunas. Os valores de compressão paralela atingem entre 25 e 95 MPa, de acordo com a espécie, podendo ser até 15 vezes maior que a compressão perpendicular das fibras (KRETSCHMANN, 2010).

As altas temperaturas aplicadas à madeira provocam perda de resistência de até três vezes se comparadas com a original. Estas perdas são afetadas pelo excessivo calor que ocorre por dois efeitos diferentes: O imediato e reversível, que sucede somente durante o período em que a temperatura é mantida; e o permanente, resultante da degradação térmica dos polímeros da parede celular (STAMM, 1964; WINANDY; ROWELL, 1984).

Segundo os mesmo autores, o calor provoca o aquecimento da madeira causando mudanças químicas permanentes que reduzem a higroscopicidade e, conseqüentemente, reduzem a resistência mecânica. Esse aquecimento pode ocorrer a altas temperaturas por curtos períodos, ou a temperaturas moderadas por longos períodos.

Conforme Finnish Thermowood Association (2003) e Borrega e Karenlampi (2008), a redução da higroscopicidade da madeira tratada termicamente, em relação à natural, é causada principalmente pela perda de massa de hemiceluloses e com isso, menores umidades de equilíbrio são atingidas, o que favorece o aumento da resistência mecânica da madeira em serviço.

Contudo, quando se avaliam as propriedades mecânicas percebe-se um aumento ou diminuição nos valores de tais propriedades, o que gera contradições. Algumas divergências

levam a acreditar que estas mudanças variam entre diferentes madeiras e dependem dos parâmetros usados no tratamento térmico como tempo de exposição ao calor.

A presente pesquisa teve como objetivo avaliar o efeito do tratamento térmico nas propriedades mecânicas da madeira de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*, por meio dos ensaios de flexão estática (MOE e MOR), flexão dinâmica (resistência máxima ao impacto) e compressão paralela às fibras. Logo, procurou-se aumentar a resistência mecânica da madeira ou reduzir as perdas, para agregar uma maior qualidade e uma valorização da mesma.

5.2 Material e métodos

As espécies estudadas, sua localização e obtenção, bem como a descrição do tratamento térmico utilizado, seguem os procedimentos descritos nos itens 4.2.1, 4.2.2, respectivamente. O teor de umidade de equilíbrio dos corpos de prova das duas espécies foi calculado para cada ensaio mecânico, utilizando a Equação 1 e os procedimento do item 4.2.3.1.

5.2.1 Propriedades mecânicas

Os ensaios mecânicos foram conduzidos após a aplicação do tratamento térmico e o condicionamento dos corpos de prova em câmara climatizada (temperatura 20 C° e umidade relativa 65 %). Os corpos de prova foram retirados das tábuas de acordo com a Figura 6, respeitando o local do ensaio mecânico.

Os ensaios de módulo de elasticidade (MOE) e de ruptura (MOR) em flexão estática e compressão paralela às fibras foram realizados conforme a norma ASTM D 143-94 (ASTM, 2000) e adaptações nas dimensões dos corpos de prova. O ensaio de resistência máxima ao impacto seguiu a norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

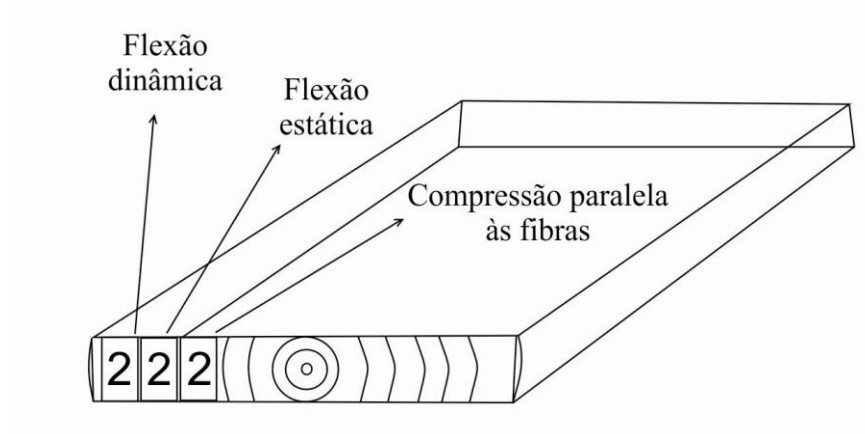


Figura 6 - Retirada e dimensões (em centímetros) dos corpos de prova para os ensaios mecânicos (Fonte: o autor).

5.2.1.1 Resistência máxima ao impacto

Para esse ensaio foi utilizado o Pêndulo de Charpy, com capacidade de 100 joules (Figura 7 A). Foram confeccionados um total de 160 corpos de prova, sendo 20 (10 radial e 10 tangencial) para cada tratamento, com dimensões de 2 x 2 x 30 cm (radial, tangencial e longitudinal), conforme a Figura 7 (B).

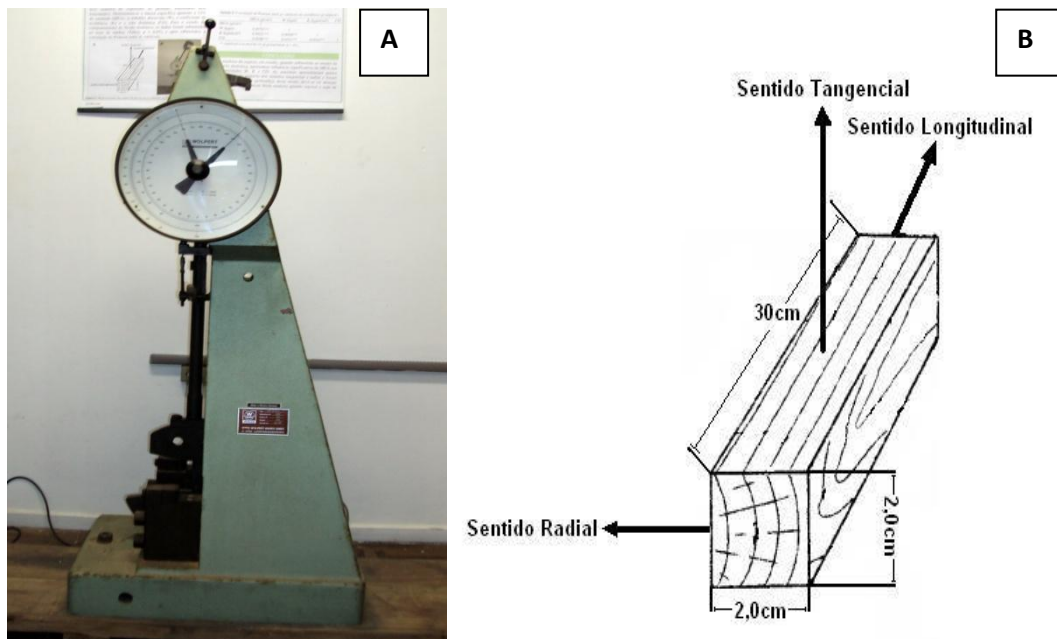


Figura 7 - Pêndulo de Charpy (A) (Fonte: o autor), e os corpos de prova obtidos (B) (Fonte: MORESCHI, 2005).

Através deste ensaio, obteve-se o trabalho absorvido (W) para fraturar o corpo-de-prova. Com isso pode-se calcular a resistência ao impacto à flexão (Equação 7).

$$f_{bw} = \frac{w * 1000}{b * h} \quad (7)$$

Onde:

f_{bw} = resistência ao impacto à flexão, em KJ/mm²;

w = energia necessária para fratura do corpo-de-prova, em Joules (J);

b e h = dimensões transversais do corpo-de-prova (mm).

5.2.1.2 Flexão estática

Para flexão estática utilizou-se a máquina universal de ensaios mecânicos da Universidade Federal de Pelotas (UFPel). Para cada uma das espécies foram confeccionados 240 corpos de prova com dimensões de 2 x 2 x 32 cm (radial, tangencial e longitudinal). Os corpos de prova foram colocados em um vão de 28 cm e uma velocidade controlada de 1,3 mm/min. O esquema do ensaio e aplicação da carga (P) e a deformação (d) são demonstradas na Figura 8 (A) e (B).

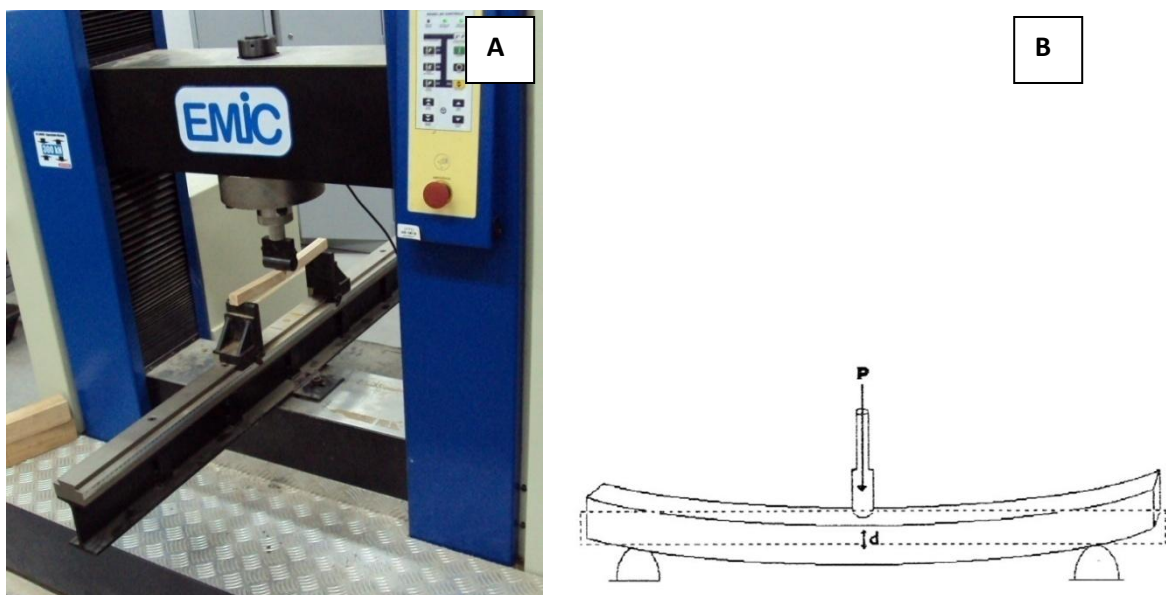


Figura 8 - Máquina universal de ensaios mecânicos (A) (Fonte: o autor), e esquema do ensaio de flexão estática (B) (Fonte: MORESCHI, 2005).

Para avaliar as propriedades dos corpos de prova modificados termicamente e a testemunha, determinaram-se os módulo de elasticidade (MOE) e de ruptura (MOR) na flexão estática de cada corpo-de-prova pelas seguintes Equações 8 e 9.

$$\text{MOE} = \frac{(P2 - P1) * l^3}{4(L2-L1) * b * h^3} \quad (8)$$

Onde:

MOE: Módulo de elasticidade (MPa);

P1 e P2 - Carga (N);

L1 e L2 - Deformação (mm);

l - Vão (distância entre apoios) = 280 mm;

b - Base (mm) = Tangencial;

h - Altura (mm) = Radial.

$$\text{MOR} = \frac{3P * L}{2 b * h^2} \quad (9)$$

Onde:

MOR = Módulo de ruptura (MPa);

P_{máx} - Carga máxima (N);

L - Vão (distância entre apoios) = 280 mm;

b - Base (mm) = Tangencial;

h = Altura (mm) = Radial.

5.2.1.3 Compressão paralela às fibras

Este teste foi realizado na máquina universal de ensaios mecânicos, para isso, foram confeccionados 240 corpos de prova com dimensões de 2 x 2 x 8 cm (radial, tangencial e longitudinal) para as duas espécies. Um extensômetro com sensibilidade de 0,001 mm

acoplado na madeira e no computador de controle da máquina avaliou as deformações específicas. O esquema da aplicação da carga (P) e a deformação (d) são demonstradas na Figura 9 (A) e (B).

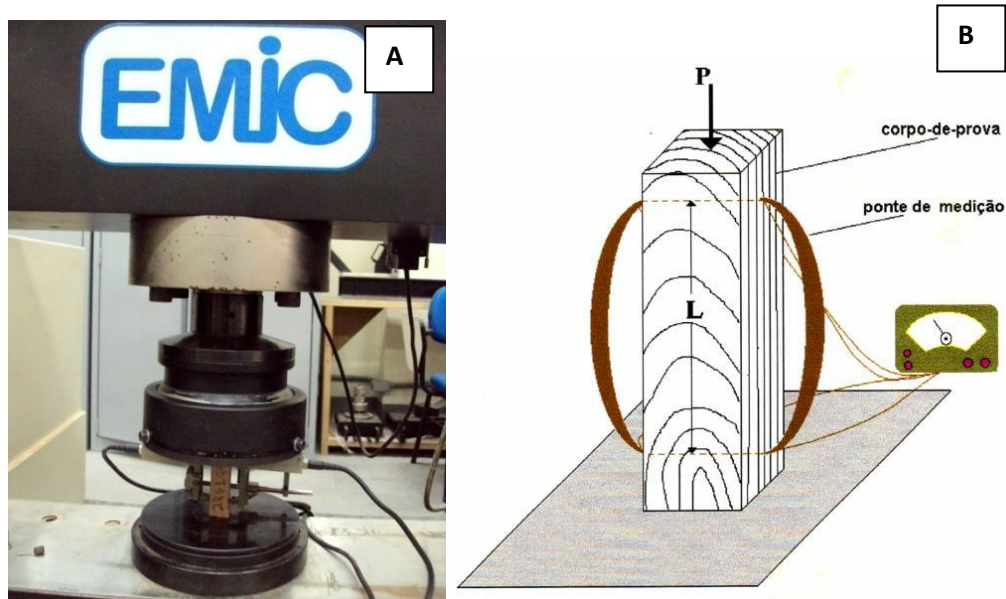


Figura 9 - Máquina universal de ensaios mecânicos (A) (Fonte: o autor), e corpo-de-prova no sentido do ensaio de compressão paralela às fibras (B) (Fonte: MORESCHI, 2005).

O ensaio de Compressão Paralela às fibras realizados determinou a carga máxima suportada pelos corpos de prova e com isso, calculou-se a resistência máxima a compressão axial (Equação 10).

$$\sigma_{c \max} = \frac{P_{\max}}{A} = (10)$$

Onde:

$\sigma_{c \max}$ = resistência máxima a compressão axial (MPa);

P_{\max} = carga máxima resistida pelo corpo-de-prova (N);

A = Área do corpo-de-prova submetida ao esforço (m²).

5.3 Análise estatística

Os dados das propriedades mecânicas foram organizados em programa Excel 2007®, avaliado e processado estatisticamente pelo software Statgraphics Centurion XV.II. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey em 5% de probabilidade de erro. Os efeitos dos tratamentos foram avaliados com auxílio de análise de variância.

5.4 Resultados e discussão

5.4.1 Resistência máxima ao impacto

Na Tabela 7 encontram-se os valores médios do ensaio de resistência máxima ao impacto e o resumo da análise estatística. Observa-se que as médias da resistência máxima ao impacto tanto no sentido radial como tangencial demonstraram um decréscimo acentuado com o aumento da temperatura. As maiores reduções em relação à testemunha foram da espécie *Eucalyptus saligna* com 76,47% para o sentido radial e 73,80% para o sentido tangencial do ensaio. A menor redução ocorreu na espécie *Corymbia citriodora* com 6,77% no sentido radial. O teor de umidade de equilíbrio apresentou-se decrescente com o aumento da temperatura, para as duas espécies, e para todos os ensaios de resistência máxima ao impacto.

Tabela 7 - Médias do ensaio de resistência máxima ao impacto das madeiras de *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora* em função dos tratamentos e direção das peças.

Espécie	Tratamentos	Ensaio de resistência máxima ao impacto					
		Radial (KJ/mm ²)	Redução (%)	TUE (%)	Tangencial (KJ/mm ²)	Redução (%)	TUE (%)
<i>Eucalyptus saligna</i>	Testemunha	85,47 a (14,10%)	--	10,72 a (5,81%)	76,22 a (28,55%)	--	10,51 a (12%)
	140°C	63,72 b (16,24%)	25,45	6,85 b (2,09%)	34,25 b (19,75%)	55,07	7,27 b (2,18%)
	160°C	62,82 b (21%)	26,50	6,26 c (3,80%)	33,29 b (52,88%)	56,32	5,87 c (4,67%)
	180°C	20,12 c (30,08%)	76,47	5,82 d (9,68%)	19,97 c (13,94%)	73,80	5,14 d (6,73%)
<i>Corymbia citriodora</i>	Testemunha	79,04 a (23,52%)	--	10,74 a (3,89%)	80,67 a (21,35%)	--	10,87 a (3,99%)
	140°C	73,69 a (9,84%)	6,77	8,08 b (5,90%)	45,63 b (17,86%)	43,43	8,06 b (4,86%)
	160°C	33,01 b (32,39%)	58,25	4,66 c (15,94%)	31,75 c (21,87%)	60,64	6,34 c (5,05%)
	180°C	28,93 b (30,55%)	63,40	3,67 d (12,66%)	27,80 c (33,98%)	65,53	3,53 d (6,29%)

Sendo: Números entre parênteses correspondem ao coeficiente de variação, %; médias seguidas pela mesma letra, para a mesma espécie, não diferem estaticamente ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey; TUE = teor de umidade de equilíbrio, %.

Valores próximos a estes de redução ao impacto foram encontrados por Modes (2010), que estudou dois métodos de tratamento térmico, em estufa e combinado (autoclave + estufa), aplicados a temperatura de 160°C por 3 horas a madeira de *Eucalyptus grandis*. Com isso, a autora observou uma redução dos valores de resistência ao impacto de 37,75% pelo método em estufa e 57,95% para o método de combinação em relação à testemunha.

Sundqvist et al. (2006), obtiveram resultados dentro do intervalo encontrado neste trabalho, aplicando o tratamento de 160°C por 2,5 horas a madeira de *Betula pubescens* na presença de vapor de água, onde encontrou valores de 31,03% em relação a madeira original.

Para Gunduz et al. (2008), dependendo do método aplicado, pode haver fortes reduções da resistência ao impacto da madeira, sendo que alguns métodos não causam efeitos sobre essa propriedade ou ocorrem em pequenas extensões. Segundo Davis e Thompson (1964), a degradação das hemiceluloses é o principal responsável para a redução da resistência ao impacto da madeira. Segundo os mesmos autores, a celulose e hemicelulose são baseadas por meio de ligações secundárias, sendo assim, a quebra dessas ligações determinam a resistência ao impacto. Além dessas quebras, as rupturas das ligações covalentes nas fibrilas de celulose (despolimerização) aumentam a quantidade de celulose cristalina e/ou à cristalização da celulose amorfa, causando redução da tenacidade da madeira.

5.4.2 Flexão Estática

As médias do ensaio de flexão estática das madeiras de *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora*, em função dos tratamentos, estão expostos na Tabela 8. Nela, constata-se que o módulo de elasticidade para a espécie de *Eucalyptus saligna* teve um aumento de 3,3% e 4,8% nos tratamentos de 140°C e 160°C em relação à testemunha. Ainda para esta espécie, os tratamentos testemunha, 140°C e 160°C, não diferiram estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade. Já para a espécie *Corymbia citriodora* o aumento no módulo de elasticidade ocorreu apenas na temperatura de 140°C com 3,2%, em relação à testemunha. As reduções no módulo de elasticidade ocorreram nos tratamentos de maiores temperaturas, 180°C com 14,3% para a espécie de *Eucalyptus saligna*, 160°C e 180°C com reduções de 8,9% e 14,87% para a espécie de *Corymbia citriodora*, em relação à testemunha. Em relação ao teor de umidade de equilíbrio os valores foram significativamente diferentes entre si, evidenciando que o aumento da temperatura reduz essa variável.

Tabela 8 - Médias do ensaio de flexão estática das madeiras de *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora* em função dos tratamentos.

Espécie	Tratamentos	Flexão estática				
		MOE (MPa)	Redução ou (aumento) (%)	MOR (MPa)	Redução ou (aumento) (%)	TUE (%)
<i>Eucalyptus saligna</i>	Testemunha	14.941 a (8,21%)	--	123 a (5,23%)	--	12,68 a (3,71%)
	140°C	15.430 a (10,80%)	(3,3)	127 a (7,43%)	(2,9)	9,56 b (2,71%)
	160°C	15.662 a (8,72%)	(4,8)	121 a (7,67%)	1,4	8,79 c (7,36%)
	180°C	12.811 b (25,77%)	14,3	90 b (8,78%)	26,6	8,09 d (8,59%)
<i>Corymbia citriodora</i>	Testemunha	20.416 a (5,13%)	--	167 a (6,01%)	--	12,10 a (3,70%)
	140°C	21.066 a (10,85%)	(3,2)	186 b (14,96%)	(11,4)	7,73 b (6,50%)
	160°C	18.608 b (9,74%)	8,9	103 c (24,61%)	38,4	6,40 c (4,15%)
	180°C	18.051 b (14,87%)	14,87	93 c (32,73%)	44,4	4,48 d (12,06%)

Sendo: Números entre parênteses correspondem ao coeficiente de variação, %; médias seguidas pela mesma letra, para a mesma espécie, não diferem estaticamente ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey; TUE = teor de umidade de equilíbrio, %; MOE = módulo de elasticidade, MPa; MOR = módulo de ruptura, MPa.

As médias do módulo de ruptura foram maiores nos tratamentos de 140°C para as duas espécies estudadas, sendo estatisticamente igual à testemunha para a espécie *Eucalyptus saligna* e diferente para a espécie *Corymbia citriodora*. Logo, estes tratamentos obtiveram os maiores aumentos de 2,9% e 11,4% em módulo de ruptura. As maiores perdas de MOR foram nos tratamentos de 180°C, ou seja, nas maiores temperaturas. A menor perda ocorreu no tratamento de 160°C da espécie *Eucalyptus saligna* com apenas 1,4%, e vale destacar que esta espécie obteve pouca redução em relação a sua testemunha, entre o tratamento da testemunha e a de 160°C os valores de MOR são estatisticamente iguais.

Estes resultados da Tabela 8, para os ensaios de flexão estática, se assemelham aos encontrados por Calonego (2009) que ao aplicar temperaturas finais, que variaram de 140°C a 220°C por 2,5 horas na madeira de *Eucalyptus grandis*, obteve reduções de 8,4% para MOE e

52,3% para o MOR. Também, são próximos aos valores encontrados por Bekhta e Niemz (2003) que com temperatura de 200°C durante 2 a 24 horas, modificou termicamente a madeira de *Picea abies* e encontrou reduções entre 44% e 55% na resistência mecânica da madeira (MOR) e apenas entre 4,0% e 9,0% no módulo de elasticidade.

Para Modes (2010), utilizando dois métodos de tratamento térmico em estufa e combinado, aplicando uma temperatura de 160°C por 3 horas na madeira de *Eucalyptus grandis*, encontrou um aumento nos valores do MOE, próximos desse trabalho, em relação à madeira controle, de 1,01% para o método combinado e 3,77% para o método em estufa, já para o MOR houve redução de 7,88% e 4,49% para o método combinado e estufa, respectivamente. Outro autor que encontrou um acréscimo no MOE da madeira tratada foi Boonstra et al. (2007), que estudando a madeira de *Picea abies* Karst, tratada com vapor e pressão a 165°C, acompanhado de tratamento de calor em condições secas e à pressão atmosférica a 180°C por 6 h, obteve um aumento de 5,21%, um pouco superior a deste trabalho

Para explicar sobre o aumento do MOE, Esteves e Pereira (2009), entendem que o aumento da cristalinidade da celulose e a redução do conteúdo de umidade podem auxiliar nesse aumento da resistência a flexão estática. Entretanto, esse efeito predomina no início do tratamento, após a continuidade a degradação térmica passa a ser dominante e com isso, provoca uma redução dessa variável.

Em relação à redução no MOR da madeira, Boonstra et al. (2007) explica que a redução ocorre com o aumento da temperatura devido principalmente as mudanças no teor de umidade e estrutura da hemicelulose. Ainda, segundo os mesmos autores, os aumentos do tempo de tratamento e da temperatura causam perdas mais drásticas desse polímero com consequência da perda da resistência. Com isso as amostras que sofrem o processo de tratamento térmico necessitam de menor energia para sua fratura do que as amostras não tratadas.

A redução do módulo de ruptura, segundo Arias et al. (2008), pode ter ocorrido pelo aumento da friabilidade da madeira exposta ao tratamento térmico. Essa propriedade corresponde ao aspecto quebradiço da madeira que é ocasionado pelo tratamento térmico, devido à menor disponibilidade de fibrilas entre as partículas termotratadas. No que se refere ao ganho do módulo de ruptura

Segundo Jämsä e Viitaniemi (2001), Militz e Tjeerdsma (2001) e Calonego (2009) ressaltam que a madeira apresenta distintos comportamentos de degradação em função do

meio de aquecimento utilizado, sendo acelerado esse processo com tratamentos em meio a altos teores de umidade, temperatura e tempo em que a madeira ficará exposta.

5.4.3 Compressão paralela às fibras

A Tabela 9 ilustra as médias do ensaio de compressão paralela às fibras das madeiras de *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora* em função dos tratamentos. Observa-se no teor de umidade de equilíbrio, a diferença estatística entre as médias, reduzindo de 12% da testemunha para quase a metade de aproximadamente 6% no tratamento de 180°C, para ambas as espécies.

Tabela 9 - Médias do ensaio de compressão paralela às fibras das madeiras de *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora* em função dos tratamentos.

Espécie	Tratamentos	Compressão Paralela às fibras				
		MOE (MPa)	Redução ou (aumento) (%)	MOR (MPa)	Redução ou (aumento) (%)	TUE (%)
<i>Eucalyptus saligna</i>	Testemunha	14.229 a (10,62%)	--	67 a (6,94%)	--	12,56 a (6,85%)
	140°C	13.803 a (27,02%)	2,99	66 a (15,72%)	1,42	8,73 b (2,88%)
	160°C	12.533 ab (32,87%)	11,92	69 a (8,56%)	(3,36)	7,8 c (4,75 %)
	180°C	11.839 b (12,78%)	16,80	60 b (17,06%)	10,86	6,03 d (7,55%)
<i>Corymbia citriodora</i>	Testemunha	15.059 ab (17,37%)	--	83 a (6,08%)	--	12,01 a (7,22%)
	140°C	16.018 b (9,71%)	(6,37)	88 a (7,74%)	(6,02)	7,83 b (12,78%)
	160°C	15.767 b (10,20%)	(4,70)	71 b (18,73%)	14,46	6,74 c (8,83%)
	180°C	14.252 a (21,32%)	5,36	68 b (14,28%)	18,07	6,15 d (9,0%)

Sendo: Números entre parênteses correspondem ao coeficiente de variação, %; médias seguidas pela mesma letra, para a mesma espécie, não diferem estaticamente ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey; TUE = teor de umidade de equilíbrio, %; MOE = módulo de elasticidade, MPa; MOR = módulo de ruptura, MPa.

Pode-se constatar que os valores de MOE não diferiram estatisticamente entre a média da testemunha, para ambas as espécies, com exceção do tratamento de 180°C da madeira de *E. saligna*, demonstrando que o efeito do tratamento térmico não foi significativo na maioria dos tratamentos. O aumento do MOE ocorreu na madeira de *C. citriodora* que obteve 4,70% e 6,37%, em relação à testemunha. Nessa mesma espécie, a redução foi de 5,36% para o tratamento de 180°C. A madeira de *E. saligna* para o módulo de elasticidade na compressão não teve nenhum ganho em relação a sua testemunha e sua maior redução foi de 16,80% no tratamento de 180°C.

No módulo de ruptura para a compressão paralela as fibras, a madeira de *E. saligna*, diferiu estatisticamente apenas do tratamento de 180°C, sendo igual para os outros tratamentos. Ainda para essa espécie, o aumento de resistência a ruptura foi de 3,36% no tratamento de 160°C e a redução ocorreu com 10,86% no tratamento de 180°C.

A madeira de *C. citriodora* foi estatisticamente igual para a testemunha e o tratamento de 140°C, e diferentes do tratamento de 160°C e 180°C. Para essa mesma espécie, o aumento no MOR, em relação à testemunha, ocorreu no tratamento de 140°C com o valor de 6,02% e sua maior perda foi no tratamento de maior temperatura com 18,07%.

Percebesse que assim como a maioria das avaliações das propriedades mecânicas, em todos os valores do ensaio de compressão paralelo às fibras, as maiores reduções ocorreram nos tratamentos de maiores temperaturas. Pesquisadores que estudaram o tratamento térmico na madeira como Unsal e Ayrilmis (2005), Gunduz et al. (2008), são unânimes ao relatar e concluir que o comportamento da madeira alterada termicamente, em condições severas do processo (tempo e temperatura), reduz significativamente a resistência a compressão paralela as fibras.

Segundo Stamm (1964), o aquecimento da madeira pelo calor causa alterações químicas irreversíveis que reduzem a higroscopicidade e com isso, reduz a resistência mecânica. Para Borrega e Karenlampi (2008), a madeira aplicada a altas temperaturas reduz a higroscopicidade e conseqüentemente à massa de hemicelulose, e dessa forma menores umidades de equilíbrio são alcançadas proporcionando o aumento da resistência mecânica da madeira.

5.5 Conclusões

Após o efeito do tratamento térmico nas propriedades mecânicas da madeira de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna* conclui-se:

A resistência máxima ao impacto foi à propriedade mecânica mais suscetível à ação do calor, tendo todos os seus valores reduzidos nos tratamentos.

No ensaio de flexão estática, o módulo de elasticidade sofreu aumento e perdas de resistência para as duas espécies, ficando evidenciada a redução nas maiores temperaturas.

Para o ensaio de flexão estática no módulo de ruptura, as duas espécies obtiveram reduções significativas, com aumento da resistência mecânica no tratamento de menor temperatura para ambas as espécies, em relação à testemunha.

A compressão paralela às fibras no módulo de elasticidade e módulo de ruptura para a madeira de *Eucalyptus saligna* sofreu redução em quase todos os tratamentos, com exceção de apenas um tratamento.

A madeira de *Corymbia citriodora* em ensaio de compressão paralela às fibras no módulo de elasticidade obteve ganho, com exceção no tratamento de maior temperatura. O módulo de ruptura aumentou e reduziu no tratamento de menor e maior temperatura em relação à testemunha.

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES GERAIS

Em síntese, as propriedades físicas das madeiras de *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora* foram influenciadas diretamente pelo efeito do tratamento térmico, obtendo um material com reduzida higroscopicidade e variação dimensional.

A propriedade mecânica, de modo geral, apresentou com o efeito do tratamento térmico, resultados de aumento da resistência até certo ponto de temperatura e redução na maior temperatura do tratamento para todas as propriedades mecânicas e espécies avaliadas.

Por meio, dos resultados desse estudo pode-se indicar essa madeira, tratada termicamente, para ambientes externo, devido ao seu aumento na estabilidade dimensional.

Entretanto, não é aconselhável utilizar esse material tratado termicamente em temperaturas acima de 140 °C, para fins estruturais, pois a sua resistência mecânica diminui.

Recomenda-se estudar o efeito do tratamento térmico nas propriedades químicas da celulose, hemicelulose, lignina e extrativos totais, observando a influência dos mesmos nas propriedades físico-mecânica da madeira.

Recomenda-se também, pesquisar o efeito do tratamento térmico na resistência a organismos xilófagos da madeira de *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora*, para verificar o quão esse tratamento térmico é eficaz nesses casos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIA

ARIAS, B., PEVIDA, C., FERMOSO, J., PLAZA, M. G., RUBIERA, F., PIS, J. J. Influence of Torrefaction on the Grindability and Reactivity of Wood Biomass. **Fuel Processing Technology**, 89, p. 169-175. 2008.

ARNOLD, M. Effect of moisture content on the bending properties of thermally modified beech and spruce. **Journal of Materials Science**, Berlin, v. 45, n. 3, p. 669-680, 2010.

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

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D143 – 94 - Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. Philadelphia, 2000. 31p.

BARROS, N.F., NOVAIS, R.F., CARDOSO, J.R. et al. Algumas relações solo-espécies de eucalipto em suas condições naturais. In: BARROS, N.F., NOVAIS, R.F. **Relação solo-eucalipto**. Viçosa: Folha de Viçosa, 1990. p.1-24.

BATISTA D. C. “**MODIFICAÇÃO TÉRMICA DA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* EM ESCALA INDUSTRIAL PELO PROCESSO BRASILEIRO VAP HolzSysteme®**”. Pag. 339. Tese. – Universidade Federal do Paraná – UFPR – Curitiba. 2012.

BATISTA, D. C.; KLITZKE, R. J. **Influência do tempo e temperatura de retificação térmica na umidade de equilíbrio da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden**. Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 254-262, 2010.

BENJAMIN, C. A. **ESTUDO DA ESTRUTURA ANATÔMICA E DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA DE *Corymbia (Eucalyptus) citriodora* e *Eucalyptus grandis***. 180 pag. Tese - Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP – Campus de Botucatu. 2006.

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

BÔAS, O. V., MAX, J. C. M, MELO, A. C. G. **CRESCIMENTO COMPARATIVO DE ESPÉCIES DE *Eucalyptus* E *Corymbia* NO MUNICÍPIO DE MARÍLIA, SP**. Rev. Inst. Flor., São Paulo, v. 21, n. 1, p. 63-72, jun. 2009.

BOLAND, D.J.; BROOKER, M.H.; CHIPPENDALE, G.M. et al. **Forest trees of Australia**, 4.ed. Melbourne: CSIRO, 1994. 703p.

BOONSTRA, M. J.; TJEERDSMA, B. F. Chemical analysis of heat-treated softwoods. **Holz Roh-Werkst**, v. 64, n. 1, p. 203-212, 2006.

BOONSTRA, M. J.; VAN ACKER, J.; TJEERDSMA, B. F.; KEGEL, E. V. Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. **Annals of Forest Science**, Les Ulis, v. 64, n. 7, p. 679-690, 2007.

BORGES, L. M; QUIRINO, W. F.; Higroscopicidade da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* tratado termicamente. Publicado na Revista Biomassa & Energia, Vol 1 Nº 2 de Abr-Jun de 2004 pag 173-182.

BORREGA, M.; KARENLAMPI, P. P. Mechanical behavior of heat-treated spruce (*Picea abies*) wood at constant moisture content and ambient humidity. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v. 66, n. 1, p. 63-69, 2008.

BRITO, J. O.; GARCIA, J.N.; BORTOLETTO JR, G. Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* submetida a diferentes temperaturas de termorreificação. **Cerne**, Lavras, v.12, n.2, p.181-188, 2006.

BRITO, J. O. **Estudo preliminar de retificação térmica da madeira de eucalipto**. In: Congresso Florestal Brasileiro, 7, **Anais...** Curitiba: SBS/SBEF, 1993. 774 p.

CALONEGO, F. W. **Efeito da termorreificação nas propriedades físicas, mecânicas e na resistência a fungos deterioradores da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden**. 149 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, 2009.

CAO, Y.; LU, J.; HUANG, R.; ZHAO, X.; JIANG, J. Effect of steam-heat treatment on mechanical properties of chinese fir. **BioResources**, Raleigh, v. 7, n. 1, p. 1123-1133, 2012.

CHAUHAN, S. S.; AGGARWAL, P. Effect of moisture sorption state on transverse dimensional changes in wood. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.62, n.1, p.51-56, 2004.

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.

ESTEVEES, B. M.; DOMINGOS, I. L.; PEREIRA, H. M. Pine wood modification by heat treatment in air. **BioResources**, v. 3, n. 1, p. 140-155, 2008.

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

FERREIRA, M. A contribuição do setor do LCF/ IPEF para a silvicultura intensiva brasileira. **IPEF**, v.46, p.8-31, 1993.

FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATIONA (FTA), **ThermoWood® HandbooK**, FIN-00171, Helsinki, Finland. 90p. 2003.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook: wood as an engineering Material**. Washington: US Department of Agriculture, 1999, 464p.

GLASS, S. V.; ZELINKA, S. L. Moisture relations and physical properties of wood. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood Handbook: wood as an engineering material**. Madison: United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. p. 4-1 – 4-19.

GUEDIRA, F. **Pyrolise lente de la biomasse: comportement compare dès tourteux d olives, de la bagasse de canne a sucre et la sciure de bois (Pin maritime)**. 1988. 122 f. Thèse (Docteur) - Université Mohamed, Maroc, 1998.

GÜNDÜZ, G.; KORKUT, S.; KORKUT, D. S. The effects of heat treatment on hysical and technological properties and surface roughness of Camiyani Black Pine (*Pinus nigra* Arn. subsp. *pallasiana* var. *pallasiana*) wood. *Bioresource Technology*, Amsterdam, v. 99, n. 7, p. 2275-2280, 2008.

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

HILL, C. **Wood modification: chemical, thermal and other processes**. West Sussex: John Wiley e Sons, 2006.

HILL, K.D.; JOHNSON, L.A.S. Sistematic studies in eucalyptus. 7. A revision of the bloodwoods, genus *Corymbia* (Myrtaceae). **Telopea**, v.6, p.173-505, 1995.

HOMAN, W.; TJEERDSMA, B.; BECKERS, E.; JORISSEN, A. **Structural and other properties of modified wood**. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 2000. British Columbia, Canada. **Proceedings...** British Columbia, Canada, 2000, 8p. Disponível em: < <http://oregonstate.edu/conferences/wcte2006/>. Acesso em: 12 dez. 2012.

JÄMSÄ, S.; VIITANIEMI, P. **Heat treatment of wood: better durability with out chemicals**. In: RAPP, A.O. Review on heat treatments of wood. In: SPECIAL SEMINAR: ENVIRONMENTAL OPTIMISATION OF WOOD PROTECTION, 2001. Antibes, France. **Proceedings...** Antibes, France: COST ACTION E 22, 2001, p.20-25.

KIKUTI, P., NAMIKAWA, I.S. Estudo da interação clone x níveis da adubação em *Eucalyptus saligna*. **O papel**, n.3, p.37-44, 1990.

KRETSCHMANN, D. E. Mechanical properties of wood. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood Handbook: wood as an engineering material**. Madison: United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. p. 5-1 – 5-46.

LOFGREN, A. **Notas sobre as plantas exóticas introduzidas no Estado de São Paulo**. São Paulo: Revista Agrícola, 1906. 238p.

MANGIERI, H.R., DIMITRI, M.J. **Los eucaliptos en la silvicultura**. Buenos Aires: Acme, 1971. 226 p.

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

MODES. K. S. **Efeito da retificação térmica nas propriedades físico-mecânicas e biológicas das madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis***. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

MORESCHI, J. C. **Propriedades tecnológicas da madeira**. Curitiba: UFPR, 2005. 168 p.

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

OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm.. **Revista Árvore**, Viçosa, v.27, n.3, p.381-388, 2003.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. de. **Textbook of Wood Technology**. 4. ed. New York: McGraw-Hill. 1980.

RIZZINI, C.T. **Árvores e madeiras úteis do Brasil**: manual de dendrologia brasileira. 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1978.

REZENDE, M. A. de.;SAGLIETTI, J. R. C.; GUERRINI, I. A. Estudo das interrelações entre massa específica, retratibilidade e umidade da madeira do *Pinus caribaea* var. *hondurensis* aos 8 anos de idade. IPEF, Piracicaba, n.48/49, p.133-141, jun./dez. 1995.

RODRIGUES, T. O. **Efeito da Torrefação no Condicionamento de Biomassa para Fins Energéticos**. Dissertação em Engenharia 2009.

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

SBS. **Fatos e números do Brasil florestal: dez 2008**. São Paulo: SBS, 2008. 105p.

SCANAVACA JR., L.; GARCIA, J. N. Determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.65, p.121-128, 2004.

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.

SHI, J. L.; KOCAEFE, D.; ZHANG, J. Mechanical behavior of Quebec wood species heat-treated using thermo wood process. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.65, n. 4, p. 255-259, 2007.

SIAU, J. F. **Wood**: influence of moisture on physical properties. Virginia: Department of Wood Science and Forest Products, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1995.

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

STAMM, A. J. **Wood and cellulose science**. New York: The Ronald Press, 549 p, 1964.

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

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

TSOUMIS, G. T. **Science and technology of wood: structure, properties, utilization**. New York: Chapman e Hall, 1991.

TURNBULL, J.W., PRYOR, L.D. Choice of species and seed sources. In: HILLIS, W.E., BROWN, A.G. **Eucalypts for wood production**. Adelaide: CSIRO, 1978. p.6-65.

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

VIEIRA I. G. Dissertação. **Estudo de caracteres silviculturais e de produção de óleo essencial de progênies de *Corymbia citriodora* (hook) k. d. hill e l. a. s. johnson procedente de anhembi sp - brasil, ex. atherton qld – austrália - PIRACICABA** Estado de São Paulo – Brasil. Agosto – 2004. Pag 100.

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

WINANDY, J. E.; ROWELL, R. M. The Chemistry of Wood Strength. In: ROWELL, R. M. **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. Boca Raton: Taylor and Francis, 2005.

WINANDY, J. E.; ROWELL, R. M. The chemistry of wood strength. In: ROWELL, R.M. **The chemistry of solid wood**. Washington: American Chemical Society, 1984. p. 211-256.