

**EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO EM PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS
DAS MADEIRAS DE ANGELIM VERMELHO (*Dinizia excelsa* Ducke) E
SAPUCAIA (*Lecythis pisonis* Cambess).**

MARCELLA HERMIDA DE PAULA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO EM
PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DAS MADEIRAS DE
ANGELIM VERMELHO (*Dinizia excelsa* Ducke) E
SAPUCAIA (*Lecythis pisonis* Cambess).**

MARCELLA HERMIDA DE PAULA

ORIENTADOR: PROF. DR. JOAQUIM CARLOS GONÇALEZ

COORIENTADOR: DR. THIAGO OLIVEIRA RODRIGUES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

PUBLICAÇÃO: PPGEFL.DM-270/2016

BRASÍLIA/DF: FEV – 2016

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO EM PROPRIEDADES
TECNOLÓGICAS DAS MADEIRAS DE ANGELIM VERMELHO (*Dinizia excelsa*
Ducke) E SAPUCAIA (*Lecythis pisonis* Cambess).**

MARCELLA HERMIDA DE PAULA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA FLORESTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

APROVADA POR:

**Profº Dr. JOAQUIM CARLOS GONÇALEZ (Departamento de Engenharia
Florestal, UnB);
(Orientador)**

**Profº Dr. ALEXANDRE FLORIAN DA COSTA (Departamento de Engenharia
Florestal, UnB);
(Examinador interno)**

**Ph.D. DIVINO ETERNO TEIXEIRA (Laboratório de Produtos Florestais/Serviço
Florestal Brasileiro);
(Examinador externo)**

**Profº Dr. AILTON TEIXEIRA DO VALE (Departamento de Engenharia Florestal,
UnB);
(Examinador suplente).**

Brasília, fevereiro de 2016.

FICHA CATALOGRÁFICA

DE PAULA, MARCELLA HERMIDA.

Efeito do tratamento térmico em propriedades tecnológicas das madeiras de Angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke) e Sapucaia (*Lecythis pisonis* Cambess).

XVII, 103pg, 210 x 297 mm (EFL/FT/UNB), Mestre, Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Florestal

1. Tratamento térmico

2. Propriedades físicas e mecânicas

3. Colorimetria

4. Propriedades químicas

I. EFL/FT/UNB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DE PAULA, M.H. (2016). Efeito do tratamento térmico em propriedades tecnológicas das madeiras de Angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke) e sapucaia (*Lecythis pisonis* Cambess). Dissertação de Mestrado em Engenharia Florestal, Publicação PPGEFL.DM - /2016. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, DF.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Marcella Hermida de Paula.

TÍTULO: Efeito do tratamento térmico em propriedades tecnológicas das madeiras de Angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke) e sapucaia (*Lecythis pisonis* Cambess).

GRAU: Mestre ANO: 2016

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Marcella Hermida de Paula

Rua 8 Norte, apt. 1502, residencial Cervantes. Águas Claras.

71908-360 Brasília – DF – Brasil.

marcellahermida@hotmail.com

AGRADECIMENTOS

No decorrer deste longo aprendizado, pude vivenciar momentos ímpares: as disciplinas oferecidas no curso de pós-graduação, a experiência nos laboratórios, as incansáveis pesquisas bibliográficas e os conselhos e críticas produtivos recebidos. Tudo isso compôs uma somatória fundamental não só para a construção deste trabalho, mas para o amadurecimento de toda a vida que vem a seguir. Gostaria de agradecer, desta forma:

Aos meus pais, Neuza e Wilson, por me ensinarem o valor do aprendizado, por todo o incentivo, apoio, sabedoria, amor e dedicação diários e por representarem meu norte sempre.

Aos meus irmãos André Ricardo e Pedro Gustavo, minhas maiores fontes de perseverança.

Ao meu companheiro Robert por todo auxílio prestado todos os dias e por ter feito meus dias felizes e completos. Sua presença e participação durante o mestrado mantiveram o sonho vivo.

Ao meu orientador professor Dr. Joaquim Carlos Gonzalez, exemplo de dedicação e bom humor, pelos ensinamentos, amizade, apoio e participação essenciais durante toda a minha jornada acadêmica.

Ao meu coorientador Dr. Thiago Oliveira Rodrigues pelos ensinamentos, conselhos, sugestões, disponibilidade e amizade em todos os momentos.

Aos professores Drs. Alexandre Florian da Costa, Ailton Teixeira do Vale, Éder Miguel Pereira e Ildeu Soares Martins por todas as sugestões, ensinamentos, carinho e amizade.

Aos amigos do Laboratório de Produtos Florestais (SFB) Bruno, Luiz Gustavo, Lopes, Dhébora, Yandra, João, Hugolino, Dra. Teresa, Msc. Alessandro e ao técnico do Laboratório de Tecnologia da Madeira (UnB) Juracir por viabilizarem e apoiarem a realização do trabalho.

A todos que, direta e indiretamente, fizeram esse sonho se concretizar e estiveram presentes durante a realização deste trabalho.

RESUMO

Efeito do tratamento térmico em propriedades tecnológicas das madeiras de Angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke) e Sapucaia (*Lecythis pisonis* Cambess).

Autor: Marcella Hermida de Paula

Orientador: Prof. Joaquim Carlos Gonzalez

Coorientador: Dr. Thiago Oliveira Rodrigues

Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais

Brasília, fevereiro de 2016.

Este estudo teve como objetivo o tratamento térmico das madeiras de angelim vermelho (*Dinizia excelsa*) e sapucaia (*Lecythis pisonis*), amplamente usadas no mercado madeireiro, e a análise dos seus efeitos nas propriedades físicas, incluindo as colorimétricas, mecânicas e químicas. As madeiras foram tratadas a 180 e 215°C durante 20 e 40 minutos em forno mufla. Foram obtidas para a madeira tratada e não tratada (testemunha) os valores referentes à densidade básica, retratibilidade, coeficiente de anisotropia, módulo de ruptura e módulo de elasticidade estático à flexão estática e dinâmico, estimado pelos equipamentos de ultrassom e *stress wave timer*, os teores de holocelulose, lignina, extrativos e cinzas e os parâmetros colorimétricos utilizando o sistema CIELAB 1976. Os resultados indicaram que a densidade básica não mostrou alteração em nenhum dos tratamentos estudados para as duas espécies. A madeira de angelim teve diminuição da retratibilidade volumétrica quando tratada a 215°C por 40 minutos. A madeira de sapucaia não teve alteração significativa da retratibilidade volumétrica, tangencial ou radial, entretanto, apresentou valores menores de coeficiente de anisotropia, principalmente para os tratamentos a 215°C. A diminuição da retratibilidade e do coeficiente de anisotropia sinaliza que os tratamentos térmicos podem ajudar no aumento da estabilidade dimensional destas duas espécies. O módulo de ruptura para as duas espécies não teve alteração significativa em relação à testemunha. Para a madeira de angelim o módulo de elasticidade dinâmico utilizando os equipamentos de *stress wave* e ultrassom também não tiveram alteração significativa em relação à testemunha. Para a madeira de sapucaia o módulo de elasticidade dinâmico utilizando o equipamento de *stress wave* aumentou para o tratamento a 180°C e 20 minutos em relação à testemunha, enquanto que para o equipamento de ultrassom não teve alterações significativas. O tratamento térmico possibilitou a transformação das madeiras em relação à cor, surgindo novas possibilidades de utilização

destas espécies. As análises químicas indicaram decréscimo no teor de holocelulose e de extrativos e consequente aumento percentual do teor de lignina para as duas espécies, principalmente para o ensaio mais severo, a 215°C e 40 minutos.

Palavras-chave: madeira, angelim vermelho, sapucaia, tratamento térmico, propriedades tecnológicas.

ABSTRACT

Effect of the heat treatment on the technological properties of Angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke) and Sapucaia (*Lecythis pisonis* Cambess) wood.

Author: Marcella Hermida de Paula

Advisor: Professor Joaquim Carlos Gonzalez

Co-Advisor: Doctor Thiago Oliveira Rodrigues

Forest Science Post-Graduation Program.

Brasilia, February de 2016.

This study goal was to apply the heat treatment on *Dinizia excelsa* and *Lecythis pisonis* wood, largely used in the wooden market, and analyze how they affect physical, mechanical, chemical and colorimetric proprieties. The woods were treated at 180 and 215°C during 20 and 40 minutes in a muffle furnace. For treated and non-treated wood (control), we obtained values regarding basic density, shrinkage, anisotropy coefficient, modulus of rupture and static modulus of elasticity in bending and dynamic, which were estimated using ultrasound equipment and stress wave timer, hemicellulose, lignin, extractors and ashes, the colorimetric parameters were obtained by applying the CIELAB 1976 system. The results indicate that the basic density did not show any modifications in the treatments for both species. The *Dinizia excelsa* wood decreased the volumetric shrinkage when treated at 215°C during 40 minutes. The *Lecythis pisonis* wood did not show significant volumetric, tangential or radial shrinkage; however, it presented lower values for the anisotropy coefficient, mostly for treatments at 215°C. The decreasing of the shrinkage and anisotropy coefficient signalize that the heat treatments allow increasing the dimensional stability of both species. The modulus of rupture for both species did not have significant modifications when compared to the control. For the *Dinizia excelsa* the dynamic modulus of elasticity, which used the stress wave and ultrasound equipment did not provide significant alterations when compared to the control. For the *Lecythis pisonis* wood the dynamic modulus of elasticity using the stress wave equipment increased at 180°C for 20 minutes when compared to the control, while the ultrasound equipment did not show significant alterations. The heat treatment enabled to modify the woods regarding their color, providing new possibilities of use for both species. The chemical analysis indicate the decreasing of the hemicelluloses and of the extractors and consequently

increasing in lignin for both species, mostly on the most severe trial, at 215°C and 40 minutes.

Key words: Wood, *Dinizia excelsa*, *Lecythis Pisonis*, Heat treatments, Technological proprieties.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 ESPÉCIES ESTUDADAS.....	3
2.1.1 Dinizia excelsa Ducke (Angelim vermelho)	3
2.1.2 Lecythis pisonis Cambess (Sapucaia)	4
2.2 TRATAMENTO TÉRMICO DA MADEIRA.....	5
2.3 PROPRIEDADES DA MADEIRA	8
2.3.1 Propriedades físicas e mecânicas	9
2.3.1.1 Umidade da madeira.....	9
2.3.1.2 Densidade	10
2.3.1.3 Retratibilidade da madeira	10
2.3.1.4 Módulo de ruptura e módulo de elasticidade	12
2.3.2 Avaliações não destrutivas da madeira	13
2.3.2.1 Ultrassom	14
2.3.2.2 Ondas de tensão.....	15
2.3.2.3 Colorimetria da madeira.....	16
2.3.3 Propriedades químicas.....	20
2.3.3.1 Celulose	21
2.3.3.2 Hemiceluloses	22
2.3.3.3 Lignina	22
2.3.3.4 Extrativos	24
2.3.3.5 Cinzas	24
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
3.1 ORIGEM E CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	24
3.2 TRATAMENTO TÉRMICO	25
3.3 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS	27
3.3.1 Densidade	27
3.3.2 Perda de massa	28
3.3.3 Retratibilidade da madeira	29
3.3.4 Módulo de ruptura e módulo de elasticidade à flexão estática	30

3.3.5 Ultrassom	32
3.3.6 Ondas de tensão.....	33
3.3.7 Colorimetria	34
3.4 ANÁLISE QUÍMICA.....	35
3.4.1 Preparação da Madeira e Teor de Extrativos	35
3.4.2 Lignina Insolúvel em Ácido.....	38
3.4.3 Lignina Solúvel em Ácido.....	38
3.4.4 Lignina Total	39
3.4.5 Teor de Cinzas e Teor de umidade.....	39
3.4.6 Holocelulose.....	39
3.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS	40
4.1.1 Densidade básica, Retratibilidade e Perda de massa.....	40
4.1.2 Módulo de Ruptura e Módulo de Elasticidade.....	44
4.1.3 Colorimetria	50
4.2 ANÁLISE QUÍMICA.....	62
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Tratamentos utilizados em função da temperatura e tempo.	27
Tabela 3.2. Dimensão dos corpos de prova e respectivos ensaios realizados.	27
Tabela 3.3. Coeficiente de anisotropia, qualidade e uso da madeira.	30
Tabela 3.4. Classificação da variação total da cor de madeiras.	35
Tabela 4.1. Valores médios das propriedades físicas da madeira de angelim.	40
Tabela 4.2. Valores médios das propriedades físicas da madeira de sapucaia.	41
Tabela 4.3. Valores médios das propriedades de flexão estática e dos módulos de elasticidades dinâmicos da madeira de angelim.	45
Tabela 4.4. Valores médios das propriedades de flexão estática e dos módulos de elasticidades dinâmicos da madeira de sapucaia.	46
Tabela 4.5. Valores médios dos parâmetros colorimétricos L*, a* e b* da madeira de angelim testemunha e submetidas aos tratamentos térmicos.	51
Tabela 4.6. Valores médios dos parâmetros colorimétricos h* e C da madeira de angelim testemunha e submetidas aos tratamentos térmicos.	51
Tabela 4.7. Valores médios dos parâmetros colorimétricos L*, a* e b* da madeira de sapucaia.	54
Tabela 4.8. Valores médios dos parâmetros colorimétricos h* e C da madeira de sapucaia.	55
Tabela 4.9. Valores referentes a mudança total de cor (ΔE^*) para as madeiras de angelim e sapucaia nas faces tangencial e radial.	57
Tabela 4.10. Classificação da cor da madeira de angelim, após cada tratamento térmico estudado.	58
Tabela 4.11. Classificação da cor da madeira de sapucaia após cada tratamento térmico estudado.	58
Tabela 4.12. Valores médios referentes à análise química da madeira de angelim.	62
Tabela 4.13. Valores médios referentes à análise química da madeira de sapucaia.	63
Tabela 4.14. Correlação entre os propriedades físicas e as análises químicas para a madeira de angelim.	66
Tabela 4.15. Correlação entre os parâmetros físicos e as análises químicas para a madeira de sapucaia.	66
Tabela 4.16. Correlação simples entre os parâmetros colorimétricos e as análises químicas para a madeira de angelim.	68

Tabela 4.17. Correlação simples entre os parâmetros colorimétricos e as análises químicas para a madeira de sapucaia.....	69
---	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.2. Planos de corte da madeira	9
Figura 2.3. Espectro eletromagnético.....	17
Figura 2.4. As cores e seus comprimentos de onda de domínio	17
Figura 2.5. Espaço de cor tridimensional do sistema CIE-L*a*b*	18
Figura 2.6. Estrutura parcial da celulose e da unidade repetidora celobiose	21
Figura 3.1. Esquema de confecção dos corpos de prova.....	25
Figura 3.2. Mufla Quimis do Setor de Energia do LPF (SFB).....	25
Figura 3.3. Programa de temperatura e tempo aplicado aos tratamentos das amostras das duas espécies de madeira.....	26
Figura 3.4. Esquema do ensaio de flexão estática.....	30
Figura 3.5. Ensaio de flexão estática.....	31
Figura 3.6. Posicionamento dos transdutores no corpo de prova para o ensaio de ultrassom.	32
Figura 3.7. Equipamento <i>Stress Wave Timer</i> Metriguard 239A.	33
Figura 3.8. Transformação dos corpos de prova para a análise química. Palitos de madeira de dimensões variáveis (A). Moedor utilizado para moer os palitos de madeira (B).	36
Figura 3.9. Preparação da madeira para análise química em extrator do tipo Soxhlet.	37
Figura 3.10. Extrativos retidos nos balões do tipo fundo chato	37
Figura 3.11. Amostras livres de extrativos, onde AT = Testemunha; A1 = T1; A2 = T2; A3 = T3 e A4 = T4 para a madeira de angelim.....	38
Figura 4.1. Análise de regressão linear para a predição do módulo de elasticidade estático (MOE) em função do módulo de elasticidade dinâmico (MOEdu) obtido pelo Ultrassom para a madeira de angelim.....	48
Figura 4.2. Análise de regressão linear para a predição do módulo de elasticidade estático (MOE) em função do módulo de elasticidade dinâmico (MOEds) obtido pelo Stress Wave para a madeira de angelim.....	48
Figura 4.3. Análise de regressão linear para a predição do módulo de elasticidade estático (MOE) em função do módulo de elasticidade dinâmico (MOEdu) obtido pelo Ultrassom para a madeira de sapucaia.....	49
Figura 4.4. Análise de regressão linear para a predição do módulo de elasticidade estático (MOE) em função do módulo de elasticidade dinâmico (MOEds) obtido pelo Stress Wave para a madeira de sapucaia.....	49
Figura 4.5. Valores médios dos parâmetros colorimétricos a*, b* C e h* da madeira de angelim para a face tangencial.	53
Figura 4.6. Valores médios dos parâmetros colorimétricos a*, b* C e h* da madeira de angelim para a face radial.....	53

Figura 4.7. Valores médios dos parâmetros colorimétricos a^* , b^* C e h^* da madeira de sapucaia para a face tangencial	55
Figura 4.8. Valores médios dos parâmetros colorimétricos a^* , b^* C e h^* da madeira de sapucaia para a face radial.....	56
Figura 4.9. Testemunha e tratamentos térmicos da madeira de angelim	59
Figura 4.10. Testemunha e tratamentos térmicos da madeira de sapucaia	59
Figura 4.11. Assinatura espectral na região do visível da face tangencial da madeira de angelim não tratada e para os tratamentos térmicos.....	60
Figura 4.12. Assinatura espectral na região do visível da face radial da madeira de angelim não tratada e para os tratamentos térmicos.....	61
Figura 4.13. Assinatura espectral na região do visível da face tangencial da madeira de sapucaia não tratada e para os tratamentos térmicos.....	61
Figura 4.14. Assinatura espectral na região do visível da face radial da madeira de sapucaia não tratada e para os tratamentos térmicos.....	62
Figura 4.15. Valores médios da composição química da madeira de angelim	63
Figura 4.16. Valores médios da composição química da madeira de sapucaia.....	64

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

a^* = eixo cromático vermelho-verde

b = base da amostra

b^* = eixo cromático amarelo-azul

C = cromaticidade

C_a = coeficiente de anisotropia

CCA = arseniato de cobre cromatado

CIE = Commission International d'Eclairage

cm = centímetros

C_o = comprimento dos corpos de prova

COPANT = La Comisión Panamericana de Normas Técnicas

d = deformação correspondente à carga no limite proporcional

D_{ap} = densidade aparente

D_{ap} = densidade aparente

D_s = dimensão linear da amostra em condição seca

D_u = dimensão linear da amostra em condição saturada

FTA = Finnish thermowood association

g = gramas

g/cm^3 = gramas por centímetro cúbico

h = altura da amostra

h^* = ângulo de tinta

IBDF = Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal

IPT = Instituto de pesquisa tecnológica

kg/cm^2 = quilogramas por centímetro metro quadrado

kg/m^3 = quilogramas por metro cúbico

kgf/cm^2 = quilograma força por centímetro quadrado

kHz = quilohertz

kN = quilonewton

L = distância entre apoios

L* = claridade ou luminosidade

LAP = Laboratory Analytical Procedure

LPF = Laboratório de Produtos Florestais

m = metros

mm = milímetros

mf = massa da madeira após o tratamento térmico.

mi = massa inicial da madeira

ml = milímetro

MOE = módulo de elasticidade estático à flexão estática

MOEdu = módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo equipamento de ultrassom

MOEds = módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo equipamento de stress wave

MOR = módulo de ruptura

MPa = megapascal

Ms = massa seca da madeira

ms = massa seca da madeira antes do tratamento térmico

m/s = metros por segundo

N/mm² = newtons por milímetro quadrado

nm = nanômetro

°C = graus Celsius

°C/minuto = graus celsius por minuto

P = carga no limite proporcional

Pm = carga máxima aplicada

PM = perda de massa

R² = coeficiente de determinação

R²aj = coeficiente de determinação ajustado

Rr = retratibilidade linear radial

Rt = retratibilidade linear tangencial

Rv = retratibilidade volumétrica

s = segundos

T1 = tratamento térmico a 180°C por 20 minutos

T2 = tratamento térmico a 180°C por 40 minutos

T3 = tratamento térmico a 215°C por 20 minutos

T4 = tratamento térmico a 215°C por 40 minutos

tang = tangente

TAPPI = Technical Association of the Pulp and Paper Industry

TCZ = teor de cinzas

TE = teor de extrativos

TLIns. = teor de lignina insolúvel em ácido

TLSol. = teor de lignina solúvel em ácido

TH = teor de holocelulose

TLT = teor de lignina total

U = teor de umidade inicial da madeira

USDA = United States department of agriculture

V = velocidade de propagação de ondas

Vs = volume da amostra em condição seca

Vsat = volume da amostra saturada

Vu = volume da amostra em condição saturada

Δa^* = variação da coordenada vermelho-verde

Δb^* = variação da coordenada amarelo-azul

ΔE^* = variação total da cor

ΔL^* = variação da luminosidade ou claridade

Δt = tempo que a onda demorou para percorrer o corpo de prova

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um dos materiais mais usados pelo homem desde os primórdios, tendo importante papel no desenvolvimento da civilização, tanto por sua versatilidade como por seu alto desempenho. É um recurso importante e presente no cotidiano de diversos setores como o de energia, construção civil, produção de celulose e papel, confecção de móveis e painéis entre outros.

O Brasil possui excelentes condições edafoclimáticas, uma alta diversidade de espécies florestais e uma vasta cobertura florestal, que propiciam intensa exploração destes recursos. Poucas espécies, entretanto, são amplamente comercializadas, aumentando a pressão de seleção de espécies tradicionais.

Para usar eficientemente um recurso é preciso entender suas características e a melhor forma de manejá-las a favor do produto final. Neste sentido, uma das grandes preocupações no uso da madeira é diminuir sua instabilidade dimensional e aumentar sua durabilidade natural, associadas a este material por sua natureza anisotrópica e biológica. Melhorando as suas múltiplas características é possível aumentar o valor agregado da madeira e a competitividade do setor que utiliza seus produtos.

Países tropicais como o Brasil apresentam índices elevados de problemas quanto ao ataque da madeira por fungos e insetos. A madeira, quando exposta a estes agentes, sofre deterioração e decrescem suas propriedades mecânicas, químicas, físicas e biológicas. Assim, torna-se relevante o uso de técnicas que propiciem maior durabilidade à mesma. Há varias décadas, com o intuito de melhorar a estabilidade dimensional e a vida útil de espécies empregadas no setor madeireiro são usados tratamentos com preservantes, apesar de ainda existir dificuldade em se dar um destino adequado aos resíduos provenientes da madeira tratada. Este fato abre espaço para uso de outras técnicas, como por exemplo, o tratamento térmico, apontado como excelente alternativa (SILVA, 2012).

O tratamento térmico ou termorreificação da madeira é baseado no aquecimento de amostras em faixas de temperaturas e tempos que sejam inferiores á carbonização, alterando propriedades químicas, físicas e mecânicas da madeira (CADEMARTORI et al., 2013).

O tratamento térmico reduz a higroscopicidade da madeira através da degradação de seu constituinte mais hidrófilo, a hemicelulose. Reduz a capacidade da madeira de permutar água com o meio minimiza problemas de contração e inchamento. Uma peça de madeira quando incha ou retrai sofre deformações devido à variação dimensional proporcionada. Estudos envolvendo a diminuição dos defeitos ocasionados pela variação dimensional são frequentes, já que poderão permitir a utilização de madeiras antes descartadas pela indústria, além da obtenção de um produto com maior qualidade (BORGES e QUIRINO, 2004). Alguns trabalhos já constataram que os tratamentos térmicos que utilizam temperaturas entre 120°C e 200°C, em diferentes espécies, além de melhorar a variação dimensional podem aumentam a dureza superficial, melhorar a compatibilidade da superfície com componentes orgânicos, reduzir a flexibilidade, provocar escurecimento e diminuir a resistência mecânica (XAVIER, 2013).

Foram escolhidas para o presente estudo duas madeiras muito representativas do setor madeireiro, a sapucaia e o angelim vermelho. O angelim vermelho (*Dinizia excelsa*) vem se destacando nos últimos anos como uma das espécies florestais mais empregadas pelo segmento madeireiro nos estados do Pará e Amazonas. A madeira é utilizada em ambientes internos, na fabricação de esquadrias de madeira, degraus de escada e amplamente na construção civil (BARAÚNA, 2011). A madeira de sapucaia (*Lecythis pisonis*), altamente comercializada, é utilizada na construção civil, confecção de móveis, brinquedos e instrumentos musicais (SOUZA et al., 1997).

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo a aplicação de tratamentos térmicos com diferentes temperaturas e tempos nas madeiras de angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke) e sapucaia (*Lecythis pisonis* Cambess) avaliando seus efeitos em propriedades físicas, mecânicas e químicas. Busca-se reduzir os problemas da instabilidade dimensional com comprometimento mínimo das demais propriedades, valorizando e ampliando a utilização destas madeiras.

Os objetivos específicos foram o de determinar as propriedades físicas (densidade básica, perda de massa, retratibilidades e coeficiente de anisotropia), mecânicas (módulo de ruptura e elasticidade á flexão estática, e módulo de elasticidade dinâmico utilizando os equipamentos de ultrassom e stress wave), químicas (teor de lignina, extrativos, cinzas e holocelulose) e colorimétricas (parâmetros L*, a*, b*, C e h*) da madeira das duas

espécies tratadas e não tratadas (testemunha) termicamente sob diferentes condições de temperatura (180 e 215°C) e tempo (20 e 40 minutos).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ESPÉCIES ESTUDADAS

2.1.1 *Dinizia excelsa* Ducke (Angeim vermelho)

O angeim vermelho pertence à família Leguminosae. Ocorre naturalmente na região Amazônica, principalmente no Amazonas, Pará, Acre, Rondônia, Roraima e Amapá. É uma das maiores árvores da floresta amazônica, podendo atingir até 60 metros de altura. Por seu tamanho e ocorrência, contribui consideravelmente para a biomassa da floresta. Na Amazônia, o nome angeim é atribuído a várias espécies de Leguminosae, principalmente dos gêneros *Dinizia*, *Hymenolobium*, *Vatairea* e *Vataireopsis*. A espécie *Dinizia excelsa* Ducke é conhecida no Estado do Amazonas como angeim pedra (espécie *Hymenolobium*) e no Pará como angeim vermelho (EMBRAPA, 2004).

A madeira de angeim vermelho possui cerne marrom-avermelhado claro, pouco distinto do alburno cinza-avermelhado. Seus anéis de crescimento são distintos, sua grã reversa, textura média, brilho moderado e cheiro desagradável. Madeira pesada, de densidade a 12% de umidade de 990 kg/m³ e densidade verde de 1.260 kg/m³. Secagem rápida, apresentando tendência moderada a torcimento médio e a leve colapso. Com a plaina é regular para trabalhar e de acabamento ruim, com o torno é fácil de trabalhar e de acabamento excelente, com a broca é regular para trabalhar e acabamento também regular. Tem ótima resistência ao ataque de fungos e térmitas e boa resistência a insetos de madeira seca. Quanto á preservação, o cerne não é tratável com creosoto nem com CCA, mesmo em tratamento sob pressão. A madeira é usada na construção civil e naval, dormentes, postes, torneados e outros (SOUZA et al., 1997).

Segundo o IBDF (1993), a madeira de angeim é utilizada na construção civil, construção de barcos, na confecção de móveis e implementos agrícolas. Possui uma densidade básica de 0,83 g/cm³, módulo de ruptura em condição verde de 1.220 kg/cm² e 1.600 kg/cm² para a madeira seca. Módulo de elasticidade de 159.000 kg/cm² para a madeira verde e 172.000 kg/cm² para a madeira seca. Contração tangencial de 9,5% e radial de 5,7%, com coeficiente de anisotropia de 1,7. Segundo Chichignoud et al. (1990) a madeira de angeim possui contração linear tangencial de 8,3% e radial de 4,8%, carga

média de ruptura á flexão estática a 12% de teor de umidade de 131 N/mm² e módulo de elasticidade a 12% de 16.140 N/mm² e é utilizada para confecção de móveis, construção pesada e decoração.

Outros dados indicam uma densidade básica para o angelim vermelho de 830 kg/m³, contração tangencial de 6,6% e contração radial de 4,2%, módulo de elasticidade na condição verde de 14.073 MPa. Outros usos para a madeira podem ainda ser citados como estacas, esteios, cruzetas, dormentes ferroviários, *piers*, vigas, caibros e cabos de ferramentas, Pode, ainda, substituir outras madeiras pesadas tais como angelim-amargoso, angelim-pedra, angico, garapa, itaúba, jatobá, maçaranduba, pau-roxo e sucupira (IPT, 2013).

Anatomicamente a madeira de angelim possui parênquima axial visível a olho nu, predominantemente aliforme e formando arranjos oblíquos ou eventualmente em faixas marginais. Os raios são pouco visíveis a olho nu na face transversal e pouco distintos, mesmo sob lente, na face tangencial, não estratificados. Os poros são visíveis a olho nu, com frequência que vai de poucos a numerosos (até 24/mm²), solitários e múltiplos radiais obstruídos por uma substância avermelhada. As camadas de crescimento são levemente demarcadas por zonas fibrosas mais escuras (FERREIRA et al., 2004). O angelim vem se destacando nos últimos anos como uma das espécies florestais mais empregadas pelo segmento madeireiro dos estados do Amazonas e Pará (BARAÚNA, 2011).

2.1.2 *Lecythis pisonis* Cambess (Sapucaia)

Pertencente á família Lecythidaceae, a *Lecythis pisonis* Cambess é uma árvore que apresenta altura média de 20-30 metros e diâmetro médio de até 90 centímetros. É popularmente conhecida como castanha de sapucaia, sapucaia, sapucainha e papo de anjo. Ocorre naturalmente na região Amazônica, além da floresta pluvial da Mata Atlântica, sendo encontrada desde o Ceará até o Rio de Janeiro e frequente no sul da Bahia e no norte do Espírito Santo (LORENZI, 2002).

A sapucaia possui cerne avermelhado-amarelado, distinto do alburno amarelo com manchas escuras. Anéis de crescimento pouco distintos, grã revessa, textura média, brilho ausente e cheiro imperceptível. Madeira pesada, de densidade a 12% de umidade de 1.000 kg/m³ e densidade verde de 1.250 kg/m³. Secagem rápida em estufa, com tendência a rachaduras fortes e moderada tendência a torcimento forte. Com a plaina é regular para

trabalhar e de acabamento ruim, com a lixa é regular para trabalhar e de bom acabamento, com o torno é fácil de trabalhar e de acabamento regular, com a broca é regular para trabalhar e de bom acabamento. É altamente resistência ao ataque de organismos xilófagos. Quanto á preservação, o alburno é difícil de preservar com CCA e o cerne não é tratável com creosoto nem com CCA, mesmo em tratamento sob pressão. A madeira é usada na construção civil e naval, móveis, artigos domésticos decorativos, brinquedos, instrumentos musicais e outros (SOUZA et al., 1997).

A madeira de *Lecythis pisonis* caracteriza-se por apresentar porosidade difusa, vasos predominantemente solitários (incidência mínima de vasos múltiplos) e camadas de crescimento indistintas. A forma do lume é arredondada e as placas de perfuração são do tipo simples (CADEMARTORI et al., 2013).

A madeira de sapucaia é usada para construção civil, possui uma densidade básica de 0,84 g/cm³, módulo de ruptura em condição verde de 1.141 kg/cm² e 1.528 kg/cm² para a madeira seca. Módulo de elasticidade de 147.000 kg/cm² para a madeira verde e 151.000 kg/cm² para a madeira seca. Contração tangencial de 8,6% e radial de 5,6%, com coeficiente de anisotropia de 1,6 (IBDF, 1983). Segundo Chichignoud et al. (1990) a sapucaia possui densidade a 12% de teor de umidade de 1.020 kg/m³, considerada muito pesada, contração linear tangencial de 7,9% e radial de 5,1%. Carga média de ruptura a flexão estática a 12% de teor de umidade de 157 N/mm² e módulo de elasticidade a 12% de teor de umidade de 15.600 N/mm² e é associada normalmente a construções pesadas, construções navais e portuárias.

2.2 TRATAMENTO TÉRMICO DA MADEIRA

A técnica de tratar a madeira com calor foi desenvolvida pelos Vikings, que aqueciam as extremidades das toras observando que dessa forma a durabilidade do material aumentava. O tratamento térmico tem efeito sobre a composição química da madeira e dessa forma altera suas propriedades. A madeira tratada aumenta sua estabilidade dimensional e escurece sua cor, podendo torná-la mais próxima a espécies tropicais amplamente usadas (LARENSTEIN, 2009).

Stamm et al. (1946), na década de 40, já estudavam o tratamento térmico como uma forma de diminuir a permutação de água na madeira, aumentando sua estabilidade dimensional. Em um primeiro estudo concluíram que tratar madeira termicamente a

diferentes temperaturas e tempos a tornava, de maneira geral, mais estável dimensionalmente e mais resistente ao ataque de organismos xilófagos, entretanto, o tratamento também provocava uma diminuição da resistência mecânica e acabaram assumindo em sua pesquisa que por essa perda de resistência o processo não poderia ser usado comercialmente. Ao longo dos anos diversos estudos foram surgindo desses autores e outros, originando diferentes processos e hoje são vários os usados em escala industrial que propiciam o efeito desejado sem comprometer tanto as propriedades da madeira. Desta forma, os estudos recentes procuram tornar o processo mais econômico e tecnológico e superar a inconveniente diminuição da resistência mecânica (TJEERDSMA e MILITZ, 2005).

A madeira termorretrificada ou submetida a tratamentos térmicos pode ser considerada como um produto de uma pirólise controlada, interrompida antes de atingir o patamar das reações exotérmicas (a aproximadamente 280°C), quando se inicia a combustão espontânea da madeira. A ação do calor pode provocar diferentes níveis de transformação na estrutura da madeira, associados à pirólise, resultando na sua degradação térmica, que ocorre na ausência de agentes oxidantes ou de catalisadores, ou seja, sem combustão, apenas submetida à ação do calor (BORGUES e QUIRINO, 2004; BRITO, 1992).

Podem ser identificadas cinco fases no processo de pirólise da madeira de acordo com a perda de massa, provocadas pelas reações químicas verificadas com o aumento da temperatura. A primeira fase ocorre entre a temperatura ambiente e 100°C e corresponde à saída da água livre e água de constituição da madeira, que permanecia retida ao lúmen e à parede celular. A segunda fase ocorre entre 100 e 250°C e também está associada à eliminação de água. Uma parte dessa água, ainda chamada de higroscópica, está retida pelas paredes celulares e adsorvida junto às hidroxilas das cadeias de polissacarídeos e lignina, a outra parte é chamada de água de constituição e sua eliminação é acompanhada por uma degradação não reversível da madeira, principalmente de seus grupos hidroxílicos. A terceira fase, em temperatura entre 250 e 330°C, em geral é acompanhada pela destruição da hemicelulose. A quarta fase, entre 330 e 370°C, supostamente destrói a celulose. A quinta e última fase ocorre a temperaturas acima de 370°C, onde já se produz carvão vegetal, é ligada ao início da degradação da lignina. Os tratamentos térmicos da madeira, também chamados de termorretrificação, estão associados a aplicação de calor em temperaturas inferiores às que provocam o início da degradação dos componentes

químicos fundamentais da madeira, situando-se em temperaturas entre 100 e 250°C. (GUEDIRA, 1988; VOVELLE e MELLOOTTEE, 1982).

Alguns dos processos industriais mais conhecidos e amplamente usados são resumidamente descritos abaixo (RODRIGUES, 2009):

Francês - O processo acontece em um forno, seca a madeira a 12% antes do processo, o aquecimento é feito usando nitrogênio, atinge temperatura máxima de 250°C e um ciclo dura de 7 a 13 horas.

Finlandês - O processo acontece em um forno, seca a madeira a 12% antes do processo, o aquecimento é feito usando vapor, atinge temperatura máxima de 240°C e um ciclo dura 5 dias.

Alemão - O processo acontece em uma autoclave, seca a madeira a 6% antes do processo, o aquecimento é feito usando óleo e atinge temperatura máxima de 220°C e um ciclo dura 20 horas.

Holandês - O processo acontece em uma sequência de autoclave, secador e forno, seca a madeira a 18% antes do processo, o aquecimento é feito usando vapor, atinge temperatura máxima de 200°C e um ciclo dura de 3 a 4 dias.

Os autores Weiland e Guyonnet (2003), afirmaram que o tratamento térmico pode ser considerado um tratamento preservativo que melhora as condições sem a necessidade de adicionar compostos químicos e pode tornar algumas espécies de clima temperado bem mais competitivas no mercado por aumentar sua durabilidade natural.

Silva (2012), corrobora, citando que a finalidade do tratamento térmico da madeira é melhorar suas propriedades somente com a aplicação de calor. Acrescenta, ainda, que as propriedades mecânicas, físicas e químicas devem ser avaliadas para cada espécie de madeira e para cada programa de tratamento térmico, visando o aproveitamento do potencial máximo de cada exemplar.

A temperatura máxima dos tratamentos térmicos varia entre 180°C e 280°C e dura de 15 minutos a 24 horas, dependendo do processo, espécie de madeira, tamanho das amostras, teor de umidade, propriedades mecânicas, resistência ao ataque biológico e estabilidade dimensional desejadas (KAMDEM e JERMANNAUD, 2002).

2.3 PROPRIEDADES DA MADEIRA

A madeira é um conjunto heterogêneo de diferentes tipos de células com propriedades específicas. As camadas mais externas e fisiologicamente ativas são ligadas ao alburno da madeira (sapwood), desempenhando as funções de condução de líquidos, transformação e armazenamento, bem como transporte de substâncias nutritivas. As camadas mais internas se distanciam do câmbio vascular e são ligadas ao cerne, vão perdendo gradativamente sua atividade fisiológica e sustentando o vegetal, adquirindo para várias espécies coloração mais escura (heartwood) (USDA, 2010).

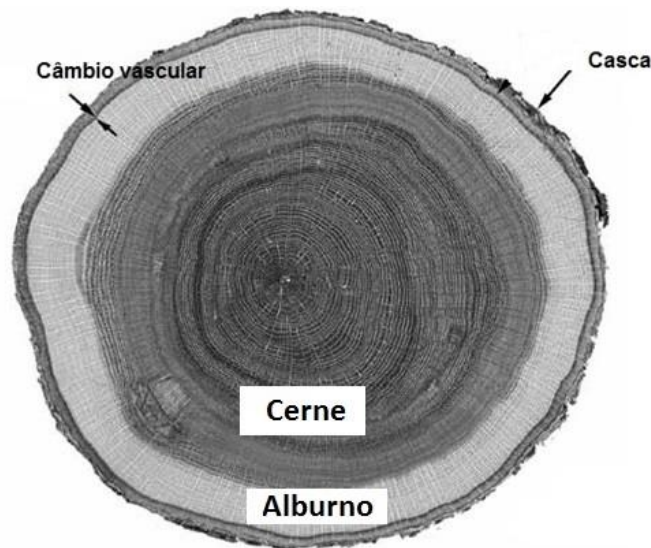


Figura 2.1. Representação do cerne e alburno (adaptado de USDA, 2010).

Para o estudo da madeira torna-se necessário considerar três seções segundo planos ortogonais: transversal, normal ao eixo correspondente ao topo das toras; longitudinal radial, que corresponde a um plano de corte passando pelo eixo e longitudinal tangencial, que resulta de cortes paralelos ao eixo do tronco e tangenciais às camadas de crescimento (Figura 2.2). Macroscopicamente, o aspecto nos dois planos de corte longitudinais é pouco diferenciado, enquanto o corte transversal apresenta características bem distintas, como os anéis de crescimento que comumente tomam a forma de anéis concêntricos (FOELKEL, 1977). As faces tangencial e radial apresentam características mecânicas e algumas vezes colorimétricas distintas, sendo importante diferenciá-las na caracterização, avaliação e utilização da madeira.

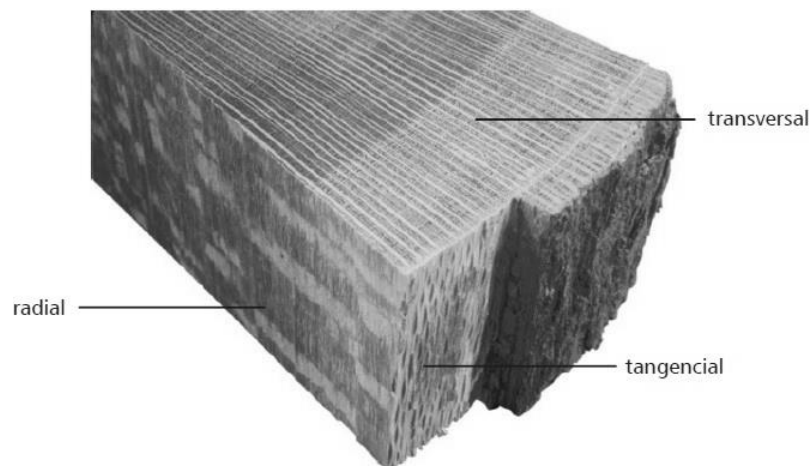


Figura 2.2. Planos de corte da madeira (CORADIN, 2002).

2.3.1 Propriedades físicas e mecânicas

O conhecimento das propriedades físicas, mecânicas e energéticas da madeira determina o seu melhor uso. A madeira é um material heterogêneo e anisotrópico, portanto, as propriedades são características que variam entre espécies, entre indivíduos de uma mesma espécie e até dentro de uma mesma árvore. Portanto, a validação de uma propriedade é determinada pela caracterização de peças em condições ideais, livres de defeitos, atendendo a uma amostragem representativa de forma a diminuir os erros intrínsecos a qualquer análise (RODRIGUES, 2009).

2.3.1.1 Umidade da madeira

A maioria das propriedades da madeira são influenciadas por sua umidade, dada pelo peso de água ali contida, seja no interior da cavidade das células ocas ou a absorvida nas paredes das fibras. Madeiras recém cortadas apresentam diferentes graus de umidade máxima, quando colocadas para secar a água contida na cavidade das células evapora até atingir o ponto de saturação das fibras, ou seja, as paredes das células estão saturadas, mas seu interior vazio. A madeira ainda assim não se apresenta em equilíbrio com a umidade da atmosfera. Para atingir a umidade de equilíbrio é preciso secá-la até conter cerca de 12% de água, umidade padrão de referência para o Brasil (PFEIL e PFEIL, 2003).

A madeira apresenta basicamente dois tipos principais de água: a capilar ou livre localizada nos vasos, nos canais e no lúmen, que evapora inicialmente quando a madeira é exposta a diferentes condições de umidade, até atingir o chamado ponto de saturação de fibras (PSF); e a água de adesão ou higroscópica, localizada no interior das paredes

celulares, que é liberada quando o teor de umidade da madeira está abaixo do PSF (POTULSKI, 2010).

2.3.1.2 Densidade

De acordo com Rezende e Escobedo (1988), do ponto de vista prático existem três maneiras para expressar a densidade da madeira: densidade aparente, definida como a relação entre a massa e o volume, determinada nas mesmas condições de umidade (geralmente a 12% de umidade); densidade a 0%, definida como a relação entre a massa e o volume obtidos para umidade a 0%; densidade básica, definida como a relação entre a massa seca e volume saturado em água.

A densidade básica é um importante parâmetro para avaliação da qualidade da madeira, sendo uma variável complexa, pois resulta da combinação de diversos fatores como dimensão das fibras, espessura da parede celular, volume dos vasos e parênquimas, proporção entre madeira do cerne e alburno, arranjo dos elementos anatômicos e propriedades químicas (FOELKEL et al., 1971).

Brito et al. (2006) avaliaram o comportamento da densidade básica da madeira de *Eucalyptus grandis* termorretificada (tratada termicamente), procurando compará-la à madeira original e verificaram que o tratamento térmico não influenciou de modo significativo a densidade da madeira.

Brunetti et al. (2007) tratando termicamente duas madeiras comercialmente importantes na Itália (*Juglans regia* e *Prunus* sp) relataram a diminuição da densidade das amostras tratadas em relação às não tratadas. Mohebbi e Sanaei (2005) tratando termicamente a madeira de *Fagus orientalis* relatam, da mesma forma, diminuição da densidade básica para a madeira tratada em relação à não tratada. Ferreira (2012) relata também diminuição da densidade básica para a madeira de maçaranduba tratada termicamente a 180, 200 e 220°C.

2.3.1.3 Retratibilidade da madeira

Quando a madeira entra em contato com a umidade, as moléculas de água, seja no estado de vapor ou líquido, penetram na parede da célula e pela união com as moléculas de hidrogênio, passam a fazer parte dos seus componentes (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985).

Com a diminuição da umidade da madeira, além da perda de massa, tem-se também uma perda em volume, denominada de retração volumétrica parcial ou simplesmente retração volumétrica. Desta forma, a retratibilidade volumétrica total se refere à perda total de água desde a amostra totalmente saturada até sua secagem completa em estufa. Sabe-se também que a variação em volume na madeira se processa praticamente para umidades inferiores a 30% aproximadamente, sendo a madeira praticamente estável, com pequenas variações volumétricas, para umidades acima deste valor. Este valor crítico para a umidade é o ponto de saturação de fibras (PSF) (REZENDE e ESCOBEDO, 1988).

O fenômeno é mais importante na direção tangencial; para redução da umidade de 30% até 0%, a retração tangencial varia de 5% a 10% da dimensão verde, conforme as espécies. A retratibilidade na direção radial é cerca da metade da direção tangencial. Na direção longitudinal, a retração é menos pronunciada, valendo apenas 0,1% a 0,3% da dimensão verde, para secagem de 30% a 0%, e por isso diversos estudos não a contabilizam. A retração volumétrica é aproximadamente igual à soma das três retrações lineares ortogonais (PFEIL e PFEIL, 2003).

A razão entre a retratibilidade tangencial e radial (relação T/R), comumente chamada de fator ou coeficiente de anisotropia, geralmente varia de 1,5 a 2,5, e tornou-se um índice muito importante nos estudos de contração da madeira; quanto maior essa relação, maior será a tendência ao fendilhamento e empenamento da madeira. Para usos que envolverem estabilidade dimensional da madeira, a mais recomendada é aquela que apresentar a menor taxa T/R (OLIVEIRA e SILVA, 2003). O coeficiente de anisotropia, segundo Nock et al. (1975) é utilizado na indicação da qualidade da madeira quanto aos defeitos oriundos da secagem e um coeficiente anisotrópico igual a 1 representaria uma alteração igual de dimensões nos sentidos radial e tangencial, situação considerada ideal e que não provocaria a formação de tensões internas.

O tratamento térmico reduz a higroscopicidade da madeira através da degradação de seu constituinte mais hidrófilo, que é a hemicelulose. Ao reduzir a capacidade da madeira de permutar água com o meio, minimizam-se problemas de contração e inchamento. A menor variação dimensional da peça agrega valor ao produto comercializado permitindo utilização de madeiras antes descartadas, além da obtenção de um produto com maior qualidade (BORQUES e QUIRINO, 2004).

Calonego (2009) tratando termicamente a madeira de *Eucalyptus grandis* relata que houve melhoras significativas nas retratibilidades volumétrica, radial e tangencial. Ferreira (2012), da mesma forma, menciona que para a madeira de maçaranduba tratada termicamente respondeu bem aos tratamentos térmicos entre as temperaturas de 180 e 220°C, aumentando sua estabilidade dimensional.

Dos Anjos (2014) aplicou o tratamento térmico em três espécies tropicais, utilizando temperaturas entre 140 e 180°C e tempos diferentes. O autor relata um aumento da estabilidade dimensional, sendo que o tratamento com a maior temperatura proporcionou uma maior influência na diminuição da retratibilidade das espécies testadas, quando comparado com a variável tempo. Batista et al. (2011), da mesma forma, tratando termicamente a madeira de *Eucalyptus grandis* a 200 e 230°C por 1, 2 e 3 horas concluem que a temperatura foi mais significativa que o tempo na redução da instabilidade dimensional da madeira.

2.3.1.4 Módulo de ruptura e módulo de elasticidade

Propriedades mecânicas são primárias para selecionar produtos ou estabelecer funções para diferentes materiais. Essas propriedades incluem módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) e como a madeira se comporta quando flexionada, tensionada ou comprimida (USDA, 2010).

O módulo de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE) são dois parâmetros normalmente determinados em testes de flexão estática e são de grande importância na caracterização tecnológica da madeira, porque ambos estimam a resistência do material submetido a uma força aplicada perpendicularmente ao eixo longitudinal da peça (SCANAVACA JUNIOR e GARCIA, 2004).

Os módulos de ruptura e elasticidade são propriedades mecânicas que se referem ao comportamento que a madeira possui ao ser submetida a uma carga aplicada em sua face tangencial, com o objetivo de provocar seu flexionamento. De maneira geral, a madeira, até determinado ponto, apresenta um comportamento elástico, onde se cessarmos a força aplicada que a deforma, ela ainda apresenta capacidade de voltar ao seu estado original. A partir do ponto em que a madeira deixa de ser elástica, passa a ser plástica, ou seja, ela não apresenta mais a capacidade de retornar ao seu estado original, mesmo que a força aplicada seja cessada (MORESCHI, 2010).

As alterações das propriedades mecânicas provocadas por tratamentos térmicos dependem da temperatura e duração do ensaio, e de maneira geral acredita-se que quanto maior a temperatura e tempo de tratamento maior é a redução da resistência. Estudos mostram reduções de 5% a 50% da resistência, dependendo do método empregado (FTA, 2003). Ferreira (2012) relata que para a madeira de maçaranduba tratada termicamente houve uma redução no módulo de elasticidade e ruptura em flexão estática em relação à madeira não tratada. Brunetti et al. (2007), diferentemente, relataram aumento do módulo de elasticidade à flexão estática para as madeiras de *Juglans regia* e *Prunus sp* tratadas termicamente. Alguns autores, entretanto, não encontraram alteração dos módulos de elasticidade e ruptura à flexão estática em madeiras tratadas termicamente (MOTTA et al., 2013; XAVIER, 2013; CALONEGO, 2009). Já Esteves et al. (2008) relataram redução de 4% no módulo de ruptura para a madeira de Pinus tratada termicamente por 2 horas a 180°C e redução de 38% quando aumentaram o tempo do tratamento para 12 horas, enquanto Bekhta e Niemz (2003) encontraram para a madeira de Pinus tratada a 200°C por 2 horas reduções de 44% a 50% no módulo de ruptura, elucidando o quanto as condições de ensaio podem alterar diferentemente as propriedades mecânicas da madeira.

2.3.2 Avaliações não destrutivas da madeira

Os métodos de avaliação não destrutiva da madeira permitem estimar propriedades tecnológicas importantes sem alterar sua estrutura, preservando o material e desta forma não comprometendo seu uso. Os ensaios não destrutivos são baseados no pressuposto de que algumas propriedades físicas simples podem indicar de maneira satisfatória características físicas, mecânicas ou químicas que são determinantes na qualidade da madeira (BUCUR, 2006). O uso de propriedades acústicas, como a propagação de ondas de tensão e propriedades elétricas, como a resistência elétrica, são comuns em técnicas não destrutivas (DUNDAR et al., 2012).

O desenvolvimento e utilização de tecnologias não destrutivas têm permitido muitos avanços na classificação da qualidade da madeira e de seus subprodutos, em aplicações estruturais e não estruturais (PELLERIN e ROSS, 2002).

Diversos métodos podem ser empregados na avaliação dos parâmetros de qualidade da madeira e a avaliação não destrutiva tornou-se, nos últimos anos, uma importante ferramenta na inferência de propriedades físicas e mecânicas da madeira, devido,

principalmente, ao baixo custo dos equipamentos, rapidez e praticidade dos testes (SILVA, 2010).

Testes clássicos determinam o módulo de elasticidade estático (MOE), utilizando uma máquina de ensaio universal, equipamento caro que exige custos de manutenção elevados e demora uma média de 5 a 15 minutos por amostra, dependendo das espécies e condições de ensaio utilizadas. Portanto, em busca de mais rapidez, métodos alternativos que utilizam outras técnicas surgem com importância fundamental no contexto da ciência e tecnologia da madeira. Trabalhos que realizem os ensaios convencionais e os ensaios não destrutivos e comparem as duas técnicas são essenciais no sentido de atestar tais métodos para diferentes madeiras para difundi-los (LEITE, 2012).

Ferreira (2012) estudando a influência do tratamento térmico na madeira de maçaranduba (*Manilkara* sp) relata que o tratamento a 180, 200 e 220°C promoveram redução significativa em relação à testemunha do módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo ultrassom e o mesmo foi verificado para o módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo stress wave.

2.3.2.1 Ultrassom

O método ultrassonoroso se apoia na análise da propagação de uma onda e sua relação entre a resposta ao ultrassom e às constantes elásticas da madeira. Em geral, o método consiste em gerar, no interior de um corpo de prova, uma ou várias ondas elásticas com a ajuda de uma sonda "piezoelétrica". As ondas se propagam com velocidades que dependem da direção de propagação e das constantes elásticas do material. A medição do tempo de propagação da onda, isto é, de sua velocidade, permite determinar estas constantes (NOGUEIRA e BALLARIN, 2003).

As ondas ultrassônicas se propagam por meio de um circuito eletrônico que emite pulsos elétricos. Esses pulsos são conduzidos por cabos coaxiais e convertidos em ondas elásticas pelo cristal piezoelétrico, localizado nos transdutores. As vibrações mecânicas então se deslocam pelo material que atenua o sinal emitido pelo gerador. O sinal retardado é recuperado por outro cristal piezoelétrico, que passa a ser amplificado e transformado novamente em pulsos elétricos, de modo a permitir a medição do tempo de propagação da onda. A partir do tempo e distância do percurso percorrido pela onda sonora, calcula-se a velocidade da mesma (CALEGARI, 2006).

Bucur e Bohnke (1994) relatam que os fatores que influenciam a propagação de ondas ultrassônicas na madeira são: propriedades físicas do substrato, características geométricas da espécie, condições do meio (temperatura e umidade) e procedimento utilizado para a tomada das medidas.

Na vibração causada a uma determinada espécie de madeira, a força elástica restaurada é proporcional ao deslocamento e a força dissipativa é proporcional à velocidade. Portanto, quando a força é aplicada com curta duração, o material se comporta como um sólido elástico, enquanto que para uma longa duração o comportamento é igual ao de um líquido viscoso. Esse comportamento é mais proeminente no ensaio de flexão estática, o qual apresenta longa duração se comparado ao ensaio de ultrassom. Como consequência, a constante elástica dinâmica obtida em ensaio de ultrassom é, em geral, maior que o módulo de elasticidade à flexão estática (OLIVEIRA et al., 2003).

Stangerlin et al. (2010) analisando a estimativa das propriedades mecânicas da madeira de *Peltophorum dubium* relata que apesar dos valores dos módulos de elasticidade obtidos pelo método destrutivo e não destrutivo serem diferentes em razão da natureza viscoelástica da madeira, o método ultrassonoroso é eficiente por avaliar, de forma rápida e eficaz, as diferenças relativas à qualidade da madeira.

Missio et al. (2013) tratando termicamente a madeira de *Pinus taeda* estimaram o módulo de elasticidade por meio do equipamento de ultrassom e concluíram que o módulo de elasticidade dinâmico foi bom estimador do módulo de elasticidade estático e que o tratamento térmico reduziu os valores encontrados para essa propriedade à flexão estática e utilizando o ultrassom em relação à madeira não tratada.

2.3.2.2 Ondas de tensão

O *Stress Wave Timer* é um equipamento que se utiliza do método de propagação de ondas de tensão, usado como técnica de avaliação não destrutiva, da mesma forma que o ultrassom. Primeiramente, uma onda de tensão é induzida no exemplar da madeira através de um dispositivo, que mantém contato com a mesma. Este dispositivo possui um acelerômetro, que emite os sinais de partida do impulso. Concomitantemente, um segundo acelerômetro, o qual é mantido no outro lado do objeto (madeira) serve para propagar as ondas de tensão de uma ponta à outra da madeira, e após isso enviar um sinal de parar para

o temporizador. O tempo levado para as ondas de tensão se propagarem entre o acelerômetro é registrado no temporizador (GONÇALEZ et al., 2012).

Em suma, um dispositivo (martelo) exerce uma determinada pressão no exemplar da madeira, chocando-se com ela. Na madeira, acopla-se um acelerômetro, que possui um ponto de partida e um ponto de chegada. As ondas de tensão geradas pelo impacto do dispositivo na madeira serão registradas no acelerômetro, que por sua vez passará a informação ao temporizador, que registra quanto tempo levou a onda de tensão para sair do ponto inicial (de partida) e chegar no ponto de chegada (final) (ROSS e HUNT, 2000).

Del Menezzi et al. (2010) estimando as propriedades de flexão estática de seis espécies de madeiras amazônicas por meio da técnica de ondas de tensão, relata que o método é adequado para prever as propriedades de flexão onde há variação, por exemplo, entre espécies.

Shimoyama (2005) concluiu, estimando as propriedades da madeira de pinus através do método de emissão de ondas de tensão, que a qualidade dos produtos de madeira podem ser estimados aplicando a técnica de propagação de ondas de tensão não somente em amostras de madeira, mas em árvores em pé e em toras, podendo ser utilizada como ferramenta na seleção do melhor material para diversas finalidades, dentre elas, a produção de celulose, pastas, papel, madeira serrada e laminados.

Garcia et al. (2012) tratando a madeira de *Eucalyptus grandis* a quatro diferentes temperaturas (180, 200, 215 e 230°C) durante três tempos de duração (15 minutos, 2 e 4 horas) concluíram que o módulo de elasticidade dinâmico mensurado pelo equipamento de stress wave foi estatisticamente diferente da testemunha somente para o ensaio mais severo (230°C por 4 horas), onde diminuiu cerca de 13%. Ferreira (2012) mostra em sua pesquisa que o tratamento térmico aplicado a madeira de maçaranduba (*Manilkara* sp) promoveu uma redução significativa, em relação á testemunha, no módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo stress wave.

2.3.2.3 Colorimetria da madeira

A percepção da cor resulta da interpretação pelo olho-cérebro de uma sensação dos raios luminosos, em um intervalo que se localiza entre 400 e 700 nanômetros no espectro eletromagnético (CAMARGOS, 1999) como ilustrado na Figura 2.3.

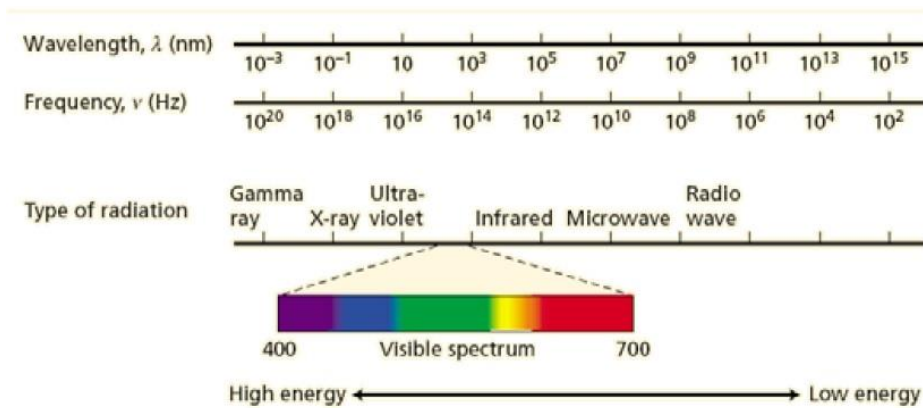


Figura 2.3. Espectro eletromagnético (TAIZ e ZEIGER, 2002).

A cor de um objeto é determinada quando a radiação eletromagnética incide sobre o mesmo. Uma parte dessa radiação será absorvida e outra será refletida, e é justamente o comprimento de onda refletido que caracterizará a cor do material. No espectro visível destacam-se sete cores, que refletem a luz em intervalos de comprimento de onda característicos, denominados por domínios da cor (GONÇALEZ, 1993). A Figura 2.4 ilustra a divisão aproximada entre esses domínios.

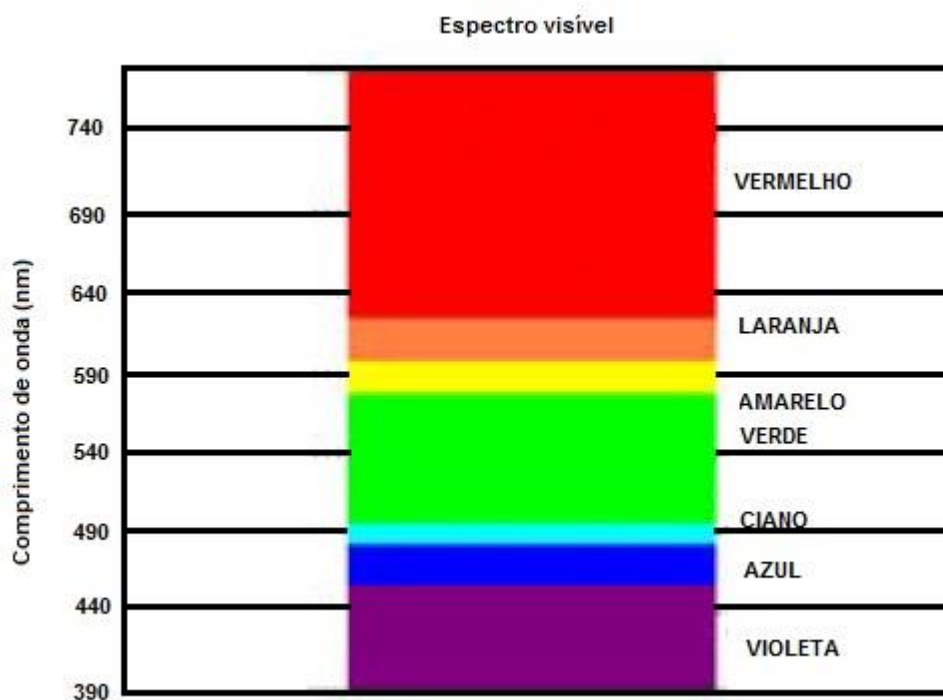


Figura 2.4. As cores e seus comprimentos de onda de domínio (adaptado de GOUVEIA, 2008).

A análise final da cor de qualquer produto lhe garante um padrão de qualidade no mercado, exigido mundialmente. Ela é um dos componentes mais importantes da estética,

que se associa à superfície e ao desenho de uma peça de madeira. Por esta razão, essa propriedade deve ser incorporada ao planejamento visando a caracterização tecnológica para atender aos usos mais nobres desse material (MORI et al., 2004).

A cor quando analisada qualitativamente apresenta-se como um parâmetro muito subjetivo para análises e comparações entre diferentes madeiras por isso é preciso caracterizá-la quantitativamente. A técnica que reproduz essa análise é a do sistema CIELAB. A Comissão Internationale de L'Eclairage (CIE) – cujo trabalho baseia-se no uso de luz e cor – desenvolveu métodos para expressar numericamente as cores, sendo que o de mensuração cromática $L^*a^*b^*$, descrito em 1976, considera três eixos espaciais perpendiculares entre si, cujos pontos fornecem diferenças numéricas mais uniformes em relação às diferenças visuais (GONÇALEZ, 1993).

A variável L^* representa a luminosidade ou claridade, a qual varia de zero (preto) a 100 (branco) enquanto que, a^* e b^* representam as coordenadas cromáticas, ambas variando entre -60 e +60. A saturação (C) é a distância radial entre a localização da cor e o centro do espaço, e está diretamente ligada com a concentração do pigmento. A tonalidade ou o ângulo de tinta (h^*) define a cor em si. No diagrama do sistema CIELAB, os sinais positivos e negativos significam: $+a^*$ aumento na cor vermelha, $-a^*$ aumento na cor verde, $+b^*$ aumento na amarela e $-b^*$ aumento na cor azul, representando a tonalidade (GONÇALEZ, 1993).

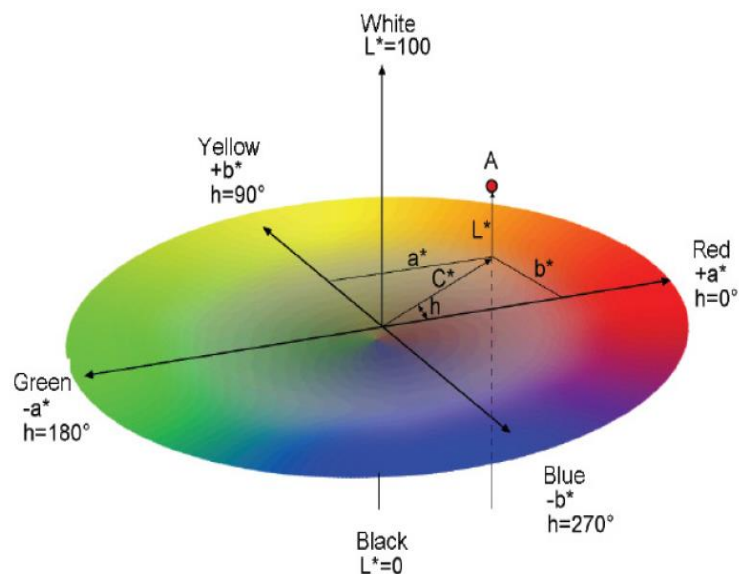


Figura 2.5. Espaço de cor tridimensional do sistema CIE- $L^*a^*b^*$ (KONICA MINOLTA, 2014).

Atualmente, o dispositivo de mensuração de cor mais utilizado é o espectrofotômetro, que é constituído por uma unidade de base, um instrumento de mão e um cabo de fibra ótica conectado entre eles que passa as informações para um computador, que por sua vez apresenta a curva de refletância de uma amostra em função do comprimento de onda. (TAKATSUI, 2011).

Ainda que recente, a técnica para a determinação da cor da madeira por meio da colorimetria quantitativa mostra-se precisa e eficaz. O sistema CIELAB de 1976, que determina os parâmetros colorimétricos luminosidade ou brilho, a tonalidade ou matiz e a saturação ou cromaticidade já se mostra eficiente para a determinação da cor de diversas madeiras (AUTRAN e GONÇALEZ, 2006).

A cor para a madeira é um dos atributos estéticos mais importantes, sendo tão importante quanto suas outras propriedades físicas e mecânicas e pode ser influenciada por vários fatores, tais como estrutura anatômica, composição química, método de derrubada, posição da amostra na árvore, condições do meio ambiente, a altura, o diâmetro e a idade da árvore, além de fatores genéticos inerentes a cada espécie (GONÇALEZ, 1993). Além dos inúmeros fatores afetando a cor original da madeira, a cor é instável, sofrendo alterações importantes quando exposta às intempéries (sol, chuva, variação de temperatura e umidade), e esse fenômeno pode afetar o seu valor do ponto de vista estético (LOPES, 2012).

Marimonio (2011) avaliou o efeito da densidade e do teor de extrativos na variação da cor da madeira de *Tectona grandis*, proveniente de plantios de diferentes espaçamentos da região de Cáceres, Mato Grosso. As madeiras mais densas do cerne apresentaram mais pigmento amarelo (b^*) na seção radial, enquanto que na seção tangencial, as madeiras mais densas são mais escuras (menor L^*) e apresentam menos pigmento amarelo (b^*). Já as madeiras mais densas de alburno são mais escuras (menor L^*) e apresentaram mais pigmento vermelho (a^*) nas seções longitudinal, radial e tangencial.

Amorim et al. (2013) caracterizaram tecnologicamente as madeiras de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* por meio da colorimetria e concluíram que a propriedade melhor estimada por essa técnica foi a densidade, seguida pelo módulo de elasticidade e módulo de ruptura. Mori et al. (2004) verificou que as características tecnológicas da

madeira de eucalipto e a quantidade de extrativos (polifenóis, basicamente), tem alta correlação com a cor da madeira.

Lopes (2012) determinou o efeito do espaçamento entre árvores na cor original da madeira e a alteração da cor após o processo de termorreificação. Constatou que o cerne e o alburno apresentaram o mesmo padrão de luminosidade nos diferentes espaçamentos e que após a termorreificação, a madeira teve perda de luminosidade, tornando-se mais escura.

Gouveia (2008) tratou termicamente três espécies de madeiras tropicais: *Simarouba amara*, *Sextonia rubra* e *Cariniana micrantha*. Concluiu que todas escureceram e tiveram comportamentos distintos em relação aos parâmetros a^* e b^* , de forma que o tratamento térmico afeta cada espécie de uma maneira diferente em relação à cor. Zanuncio (2014) tratando termicamente *Eucalyptus grandis* observou que a termorreificação reduziu a claridade, a matriz vermelho (a^*) e a matriz amarelo (b^*). Zhang e Yu (2013) relatam a mesma tendência para a espécie *Phyllostachys pubescens* tratada termicamente.

2.3.3 Propriedades químicas

A madeira é composta basicamente por três polímeros: a celulose, a hemicelulose e a lignina, em uma proporção aproximada de 50:25:25, distribuídas na parede celular. O conjunto de carboidratos, ou seja, a celulose e a hemicelulose é denominado de holocelulose. Além dos componentes principais, a madeira também possui os compostos de baixo peso molecular, que são formados pelos extrativos e pelas substâncias minerais (PASTORE, 2004). A variação nas proporções desses componentes e na estrutura celular tornam as madeiras mais densas ou mais macias, mais rígidas ou flexíveis (USDA, 2010).

Considerando as madeiras de coníferas e folhosas, verifica-se que ambas apresentam quantidades de celulose próximas, porém no primeiro grupo o teor de lignina é maior e o de hemiceluloses menor. Com relação à estrutura molecular, a celulose apresenta a mesma estrutura, tanto nas coníferas como nas folhosas; entretanto, as estruturas das hemiceluloses e da lignina variam. Quanto aos extrativos encontrados nesses grupos de madeira, eles apresentam variação tanto na quantidade presente como na sua estrutura molecular. Na literatura há várias comparações entre as composições químicas da madeira de coníferas e de folhosas. Normalmente, os dados apresentados por um autor não

coincidem com os de outro, pois dependem do estudo ou fonte em que cada um se respaldou (D'ALMEIDA et al., 2013).

2.3.3.1 Celulose

A celulose é, provavelmente, o polímero mais abundante do planeta. É um composto de unidades anidra de D-glucanopirranose, ligadas entre si por ligações β -(1-4)-glucosídicas. É uma repetição de unidades de celobiose, que contém dois açúcares. O número de unidades de glicose na molécula de celulose é referida como o grau de polimerização (ROWELL, 2005).

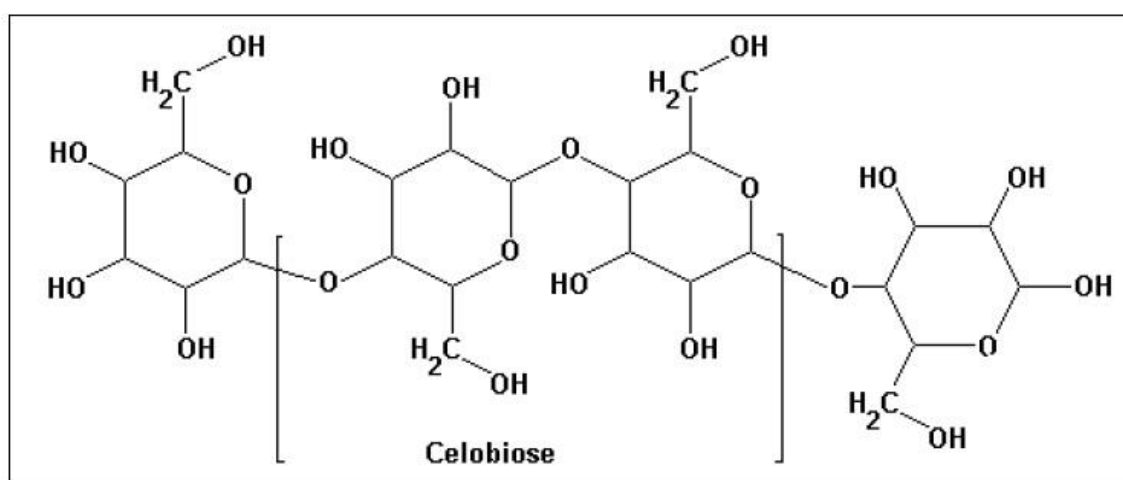


Figura 2.6. Estrutura parcial da celulose e da unidade repetidora celobiose (PASTORE, 2004).

As moléculas de celulose tendem a formar pontes de hidrogênio intramoleculares (entre unidades de glicose de moléculas adjacentes). O primeiro tipo de interação é responsável por certa rigidez do polímero de celulose e o segundo tipo, pela formação da fibra vegetal, ou seja, as moléculas de celulose se alinham, formando as microfibrilas, as quais formam as macrofibrilas que, por sua vez, se ordenam para formar as sucessivas paredes celulares da fibra (PASTORE, 2004).

As formas e arranjos da celulose geram nas fibras regiões altamente ordenadas e regiões desordenadas. Essas regiões não possuem fronteiras bem definidas, mas parece haver uma transição de um arranjo ordenado das cadeias de celulose para um estado desordenado, no qual estas cadeias apresentam uma orientação menor. As regiões ordenadas são conhecidas como cristalinas, porque nelas é possível detectar uma cela unitária que se repete e tem dimensões bem definidas. Nas celulosas da madeira, a

porcentagem de regiões cristalinas fica na faixa de 50% a 70%, enquanto na celulose do algodão a faixa chega a 95% (D'ALMEIDA et al., 2013).

A degradação da celulose entende-se como a cisão da ligação entre dois monômeros de glicose. A degradação produz moléculas com grau de polimerização menor, afetando, portanto, as propriedades que dependem do comprimento da cadeia molecular da celulose, como as de resistência mecânica. A degradação pode ser microbiológica e por efeito térmico, quando a temperatura atinge um patamar acima de 140°C e as reações são aceleradas (ROWELL, 2005).

2.3.3.2 Hemiceluloses

As hemiceluloses são polissacarídeos constituídos por pelo menos duas unidades de açúcares, incluindo basicamente hexoses, pentoses, oxihexoses e ácidos urânicos, formando polímeros ramificados e de cadeias curtas. Não possuem natureza cristalina ou formam estrutura fibrosa, mas estão nas fibras intimamente associados á celulose. A estabilidade térmica e química costuma ser menor, possivelmente por causa da falta de cristalinidade e do baixo grau de polimerização (D'ALMEIDA, 1988).

2.3.3.3 Lignina

A lignina consiste em polímeros de natureza aromática compostos por unidades de fenilpropano com alto peso molecular. Há mais lignina em coníferas que em folhosas e nas folhosas a lignina apresenta-se com uma estrutura química mais complexa do que a observada nas coníferas. É um composto amorfo localizado na lamela média e na parede secundária. Durante o desenvolvimento das células a lignina é incorporada como o último componente, interpenetrando as fibrilas e fortalecendo as paredes celulares (FENGEL e WEGEMER, 1989).

As ligninas podem ser classificadas de acordo com seus três elementos estruturais básicos: álcool p-coumaril, álcool coniferil e álcool sinapil. As madeiras de folhosas contém dois deles, o álcool coniferil (50-75%) e o álcool sinapil (25-50%), e as coníferas contém somente o álcool coniferil. A polimerização do álcool coniferil produz ligninas guaiacil, enquanto que a polimerização dos alcoóis coumaril e sinapil produzem as ligninas siringil-guaiacil das folhosas (PASTORE, 2004).

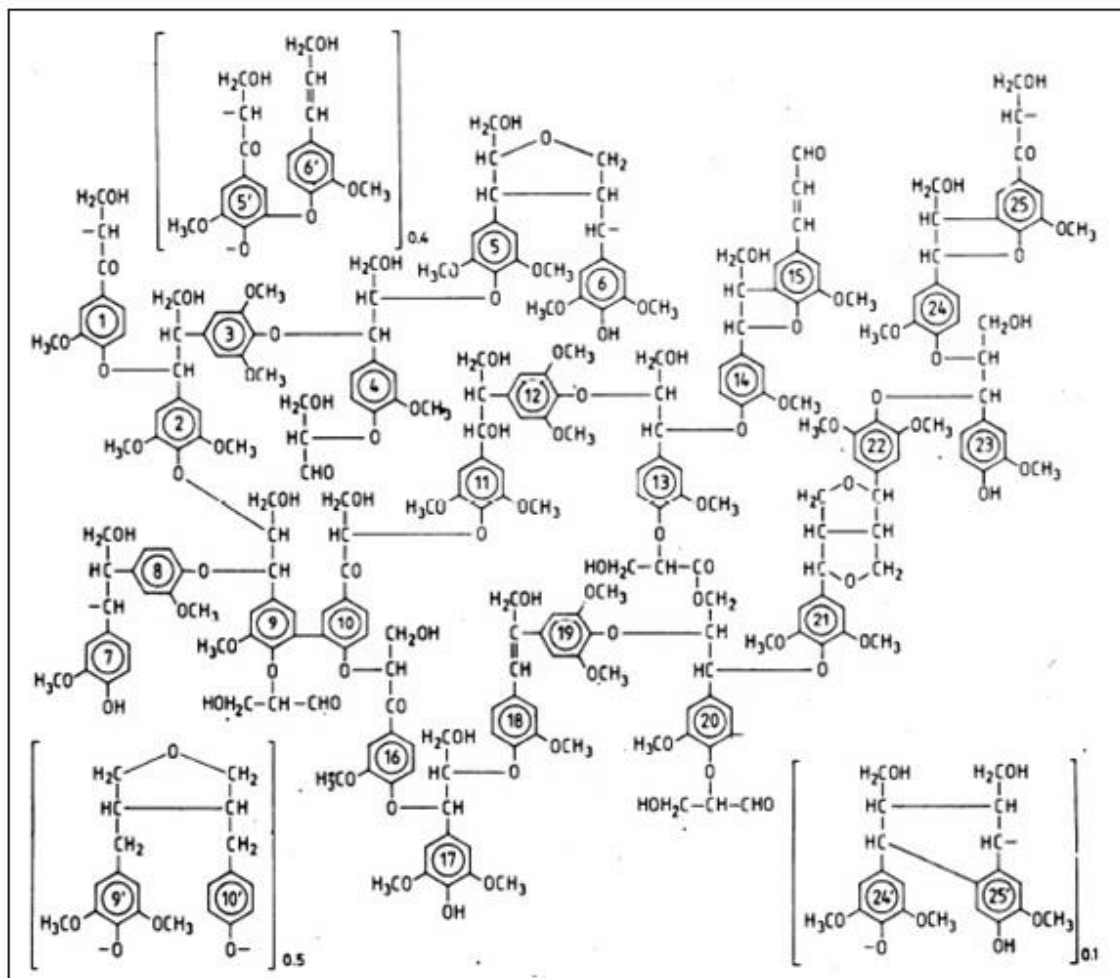


Figura 2.7. Fórmula esquemática bi-dimensional da estrutura da lignina das dicotiledôneas (LEPAGE, 1986).

A estrutura tridimensional das ligninas explica a resistência às forças de compressão, pois gera uma estrutura resistente ao impacto ao conferir rigidez à parede da célula e agir como um agente de ligação permanente entre as células. Tecidos lignificados resistem mais ao ataque por microorganismos impedindo a penetração de enzimas destruidoras da parede celular (PHILIPP e D'ALMEIDA, 1988).

A madeira frente à elevação da temperatura causada pelo tratamento térmico degrada, inicialmente, as hemiceluloses, depois a celulose e, por fim, a lignina. Embora a lignina comece a degradar em temperaturas mais baixas (em torno de 150°C), sua degradação é mais lenta, ao contrário da celulose e hemiceluloses. A hemicelulose se degrada mais facilmente que a celulose devido a sua natureza amorfa, e por isso, menos estável (STAMM et al., 1946).

2.3.3.4 Extrativos

Os compostos orgânicos que podem ser extraídos da madeira com solventes orgânicos (etanol, acetona ou diclorometano) e água são chamados de extrativos. O teor de extrativos e a sua composição varia muito de acordo com a espécie e entre as diferentes partes do vegetal. Por serem substâncias muito diversas podem ser divididos em três subgrupos: compostos alifáticos (principalmente gorduras e ceras), terpenóides e fenólicos (SJOSTROM, 1993).

Os extrativos são frequentemente responsáveis por determinadas características da madeira como cor, cheiro, resistência natural, gosto e propriedades abrasivas. Sua composição e quantidade relativa dependem de diversos fatores, como espécie, idade e região de procedência (fatores abióticos). Aproximadamente de 3% a 10% da madeira seca é constituída de extrativos, sendo que geralmente para as madeiras de coníferas esse teor fica na faixa de 5% a 8% e para as folhosas de região temperada 2% a 4%, podendo alcançar valores superiores a 10% em espécies de regiões tropicais (KLOCK, 2005).

2.3.3.5 Cinzas

A porção inorgânica da madeira é analisada como cinza por incineração do material orgânico. A porcentagem de cinzas está entre 0,2-0,5% no caso de madeiras de zonas temperadas e frequentemente valores mais altos podem ser encontrados em madeiras tropicais. Os principais componentes das cinzas são: fósforo, cálcio e magnésio, e são obtidos pela queima na forma de óxidos (KLOCK, 2005).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ORIGEM E CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

As madeiras de angelim vermelho (*Dinizia excelsa*) e sapucaia (*Lecythis pisonis*) usadas no estudo foram provenientes da indústria do Distrito Federal. Para cada espécie foram obtidas três peças iniciais de 30cm x 6cm x 200cm (largura, espessura e comprimento), que tiveram sua identificação confirmada pelos anatomistas de madeira no Setor de Anatomia da Madeira do Laboratório de Produtos Florestais do Serviço Florestal Brasileiro (LPF-SFB). As peças foram desdobradas em corpos de prova no Setor de Carpintaria do LPF em 35 amostras de cada espécie de 2cm x 2cm x 30cm (largura,

espessura e comprimento) e 35 corpos de prova de 2cm x 2cm x 10cm, totalizando 70 amostras de cada espécie (Figura 3.1). Os corpos de prova então foram colocados em sala de climatização, onde permaneceram por 50 dias para atingir teor de umidade médio de 12% e depois seguiram para os tratamentos térmicos.

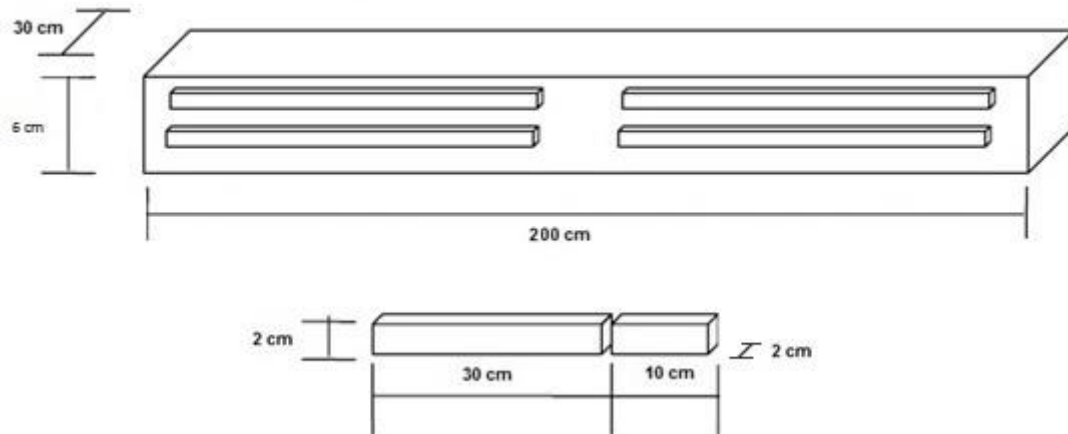


Figura 3.1. Esquema de confecção dos corpos de prova.

3.2 TRATAMENTO TÉRMICO

Os ensaios térmicos foram realizados no Laboratório de Produtos Florestais (LPF), no Setor de Energia e foi utilizado um forno mufla Quimis (Figura 3.2).



Figura 3.2. Mufla Quimis do Setor de Energia do LPF (SFB).

Foram realizados ensaios preliminares para verificar as melhores condições para o tratamento. A partir desses ensaios, a taxa de aquecimento adotada foi de 2°C/minuto. A Fase 1 diz respeito ao aquecimento, definida de t_0 a t_1 . O tempo em que as amostras permaneceram no forno mufla após atingirem a temperatura final (T^*) é chamado de patamar final, definido de t_1 a t_2 , e constitui a Fase 2 do processo. Com o término do patamar final o tratamento térmico se encerra e o forno mufla passa para a etapa de resfriamento, definida como Fase 3 (t_2 a t_3). O teor de umidade inicial das amostras tratadas termicamente foi de 12%. A Figura 3.3 ilustra o programa adotado para os tratamentos térmicos.

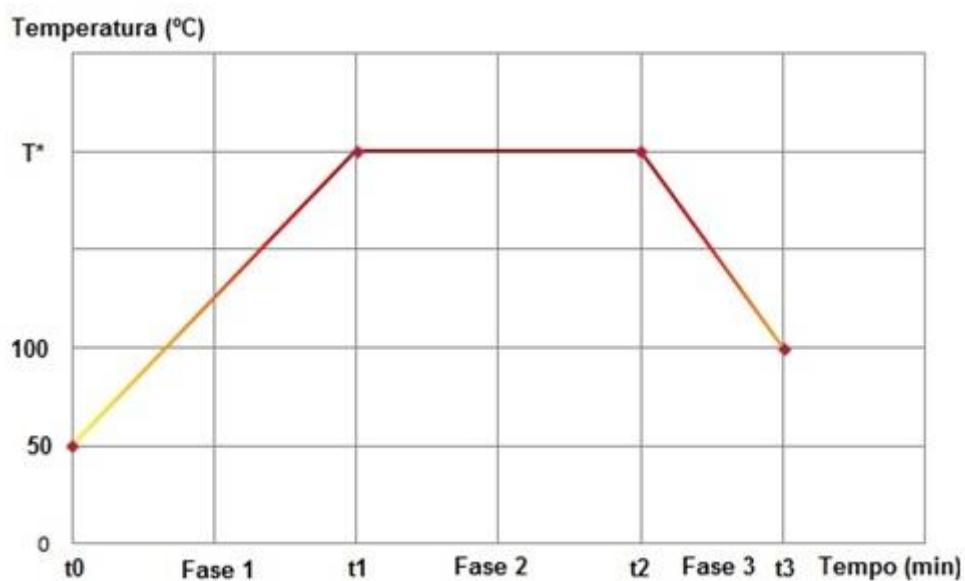


Figura 3.3. Programa de temperatura e tempo aplicado aos tratamentos das amostras das duas espécies de madeira.

Os tratamentos térmicos das amostras foram iniciados a uma temperatura de 50°C e na etapa de resfriamento as amostras eram retiradas do forno mufla quando o equipamento atingia uma temperatura de cerca de 100°C.

Para realização do ensaio foram usados corpos de prova das duas espécies em estudo (angelim vermelho e sapucaia) nas duas diferentes dimensões: 2cm x 2cm x 10cm e 2cm x 2cm x 30cm.

Estas amostras foram divididas em cinco tratamentos (Testemunha, T1, T2, T3 e T4), utilizando-se sete corpos de prova para cada um. Os tratamentos térmicos (T1, T2, T3 e T4) foram separados em função do tempo e temperatura de exposição. As temperaturas e

tempos ensaiados foram respectivamente 180°C e 215°C e 20 e 40 minutos conforme Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Tratamentos utilizados para as amostras de madeira em função da temperatura e tempo.

Tratamento	Temperatura final (°C)	Tempo no patamar (minutos)
Testemunha	0	0
T1	180	20
T2	180	40
T3	215	20
T4	215	40

Os corpos de prova foram dispostos no forno mufla de forma que não fizessem contato direto com as paredes internas do equipamento, tendo os corpos de prova empilhados utilizando pequenos pedaços de madeira como separadores.

Os ensaios que foram realizados para os corpos de prova de diferentes dimensões das duas espécies seguem na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Dimensão dos corpos de prova e respectivos ensaios realizados.

Dimensões dos corpos de prova	Ensaios realizados
2cm x 2cm x 10cm	Densidade Perda de Massa Retratibilidade
2cm x 2cm x 30cm	Flexão estática Ultrassom Stress Wave Colorimetria Análise Química

3.3 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

3.3.1 Densidade

A densidade básica foi determinada de acordo com a norma COPANT 461, correspondendo á relação entre a massa das madeiras secas em estufa a 103±2°C até atingirem massa constante e seu volume saturado, obtido pela mensuração das suas faces, tangencial e radial, em seu estado de total saturação (após permanecerem submersos em

água por 40 dias), segundo a Equação 3.1. Todas as medidas foram feitas com paquímetro digital Caliper de 0,01 mm de precisão.

$$Db = \frac{Ms}{V_{sat}} \quad (\text{Equação 3.1})$$

Onde:

Db = densidade básica (g/cm³);

Ms = massa seca (g);

Vsat = volume saturado (cm³).

A densidade a 12% foi calculada utilizando-se a mesma equação, só que a massa e o volume da amostra estavam com o teor de umidade de 12%.

3.3.2 Perda de massa

O teor de umidade das peças de madeira antes do tratamento térmico era de 12%. Para avaliar a perda de massa foi necessário, inicialmente, calcular a massa seca da madeira, com base em sua umidade, de acordo com a Equação 3.2.

$$ms = \frac{100 \cdot mi}{U + 100} \quad (\text{Equação 3.2})$$

Onde:

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

mi = Massa inicial da madeira (g);

U = Teor de umidade inicial da madeira (%);

Com o resultado da massa seca a perda de massa é calculada com base na Equação 3.3.

$$PM = \frac{ms - mf}{ms} \times 100 \quad (\text{Equação 3.3})$$

Onde:

PM = Perda de massa (%);

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

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

3.3.3 Retratibilidade da madeira

Para determinar a retratibilidade das amostras foi utilizada a norma COPANT 462. Os corpos de prova de cada tratamento para cada espécie, incluindo a testemunha, tiveram suas medidas de dimensões radial, tangencial e longitudinal, obtidas depois dos tratamentos em condição seca em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ e em condição de completa saturação das fibras, depois de submersas em água por 40 dias. As Equações 3.4 e 3.5 foram usadas para calcular as retrações lineares (radial e tangencial) e a retratibilidade volumétrica, respectivamente.

$$Rt \text{ ou } Rr = \frac{Du - Ds}{Du} \times 100 \quad (\text{Equação 3.4})$$

Onde:

Rt = retratibilidade tangencial (%);

Rr = retratibilidade radial (%);

Du = dimensão linear (face tangencial ou radial) da amostra em condição saturada (cm);

Ds = dimensão linear (face tangencial ou radial) da amostra em condição seca (cm);

$$Rv = \frac{Vu - Vs}{Vu} \times 100 \quad (\text{Equação 3.5})$$

Onde:

Rv = retratibilidade volumétrica (%);

Vu = volume da amostra em condição saturada (cm³);

Vs = volume da amostra em condição seca (cm³);

Coeficiente de anisotropia

Com base nos valores obtidos para a retratibilidade radial e tangencial o coeficiente de anisotropia foi obtido pela Equação 3.6.

$$Ca = \frac{Rt}{Rr} \quad (\text{Equação 3.6})$$

Onde:

Ca = coeficiente de anisotropia;

Rt = Retratibilidade tangencial (%);

Rr = Retratibilidade radial (%).

Nock et al. (1975) fazem uma classificação da madeira quanto ao coeficiente de anisotropia, segundo a Tabela 3.3. Quanto mais próximo de 1 maior é a qualidade da madeira, já que um coeficiente anisotrópico igual a 1 representaria uma alteração igual de dimensões nos sentidos radial e tangencial, situação considerada ideal e que não provocaria a formação de tensões internas.

Tabela 3.3. Coeficiente de anisotropia, qualidade e uso da madeira (Nock et al., 1975)

Coeficiente de anisotropia	Qualidade da madeira	Utilização indicada para a madeira
1,2 a 1,5	Excelente	Móveis finos, esquadrias, barcos, e etc.
1,5 a 2,0	Normal	Estantes, mesas, armários e usos que permitam pequenos empenamentos
Acima de 2,0	Ruim	Construção civil (observadas às características mecânicas), carvão, lenha e etc.

3.3.4 Módulo de ruptura e módulo de elasticidade à flexão estática

O ensaio foi realizado no Laboratório de Tecnologia da Madeira no Departamento de Engenharia Florestal (UnB) utilizando a máquina de ensaios universal EMIC modelo DL com capacidade de carga de 30 kN, seguindo a norma COPANT 555.

Foram ensaiados sete corpos de prova (2x2x30cm) de cada tratamento térmico e as testemunhas de cada espécie, sendo a madeira apoiada em suas duas extremidades, à 1 cm, e a força aplicada no centro da peça na face tangencial, como ilustrado nas Figuras 3.4 e 3.5. A máquina é acoplada ao computador e o programa utilizado para leitura e visualização do ensaio foi o TESC versão 3.04.

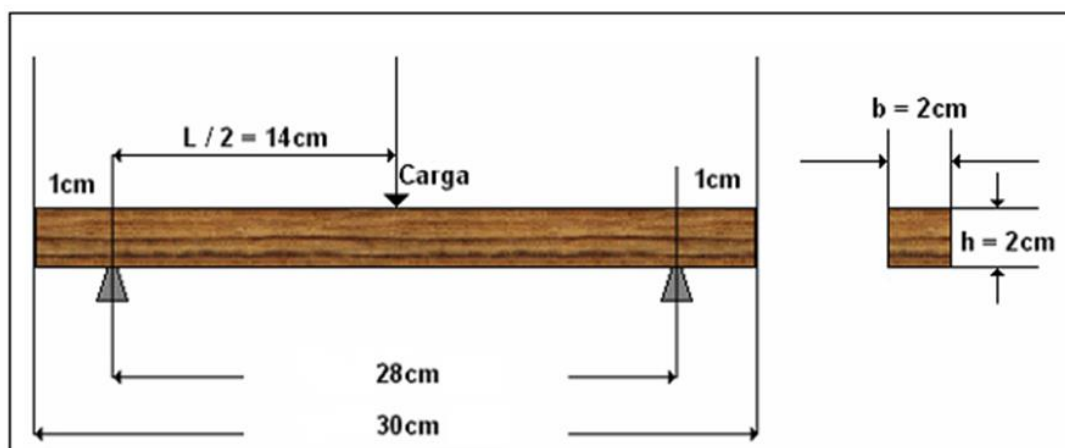


Figura 3.4. Esquema do ensaio de flexão estática.



Figura 3.5. Ensaio de flexão estática.

As Equações 3.7 e 3.8 usadas para determinação do módulo de elasticidade estático (MOE) e módulo de ruptura (MOR) e os resultados foram transformados em MPa.

$$\text{MOE} = \frac{PL^3}{4bdh^3} \quad (\text{Equação 3.7})$$

Onde:

MOE = módulo de elasticidade à flexão estática (kgf/cm²);

P = carga no limite proporcional (kg);

d = deformação correspondente à carga no limite proporcional (cm);

L = distância entre apoios, vão livre (cm).

$$\text{MOR} = \frac{3P_m L}{2bh^2} \quad (\text{Equação 3.8})$$

Onde:

MOR = módulo de ruptura à flexão estática (kgf/cm²);

P_m = carga máxima aplicada (kg);

L = distância entre apoios, vão livre (cm);

b = base da amostra (cm);

h = altura da amostra (cm).

3.3.5 Ultrassom

Para o estudo de ondas ultrassônicas foram utilizados os mesmos corpos de prova do ensaio de flexão estática, antes de serem submetidos ao ensaio destrutivo. As amostras de todos os tratamentos para cada espécie apresentaram uma orientação longitudinal e as duas faces planas e paralelas. O equipamento utilizado foi o ultrassom da marca USlab Agricef com frequência de 45 kHz (Figura 3.6). Com os valores dos tempos de propagação e a distância percorrida, foram calculadas as velocidades de propagação para cada um dos corpos de prova, de acordo com a Equação 3.9.

$$V = \frac{Co}{\Delta t} \quad (\text{Equação 3.9})$$

Em que:

V = velocidade de propagação de ondas (m/s);

Co = Comprimento dos corpos de prova (m);

Δt = tempo que a onda demorou a percorrer o corpo de prova (s).

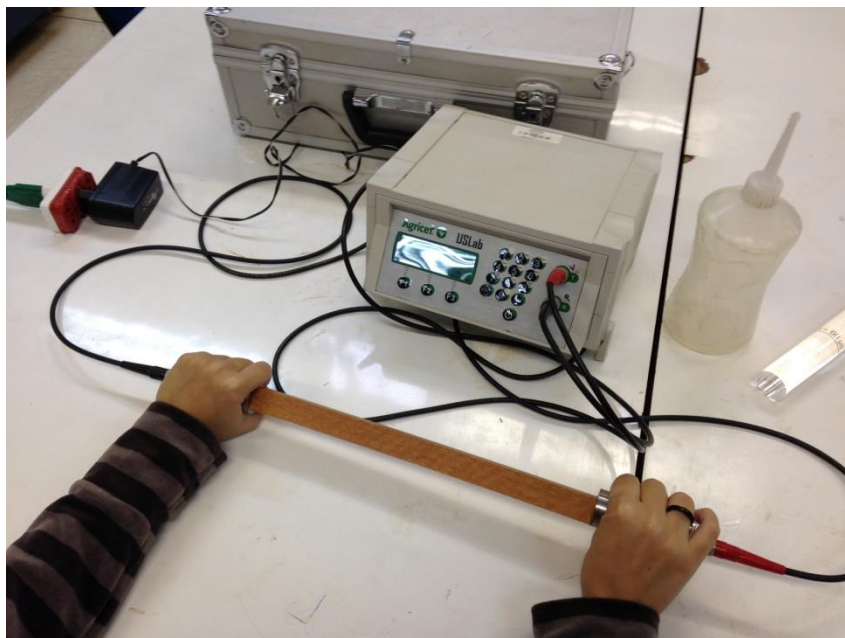


Figura 3.6. Posicionamento dos transdutores no corpo de prova para o ensaio de ultrassom.

Obtidos os dados de velocidade de propagação da onda calculou-se o módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo ultrassom (MOEdu), segundo a Equação 10.

$$\text{MOEdu ou MOEds} = V^2 \times Dap \quad (\text{Equação 3.10})$$

Onde:

MOEdu = módulo de elasticidade dinâmico utilizando o ultrassom (kgf/cm²);

MOEds = módulo de elasticidade dinâmico utilizando o stress wave (kgf/cm²);

V = velocidade da propagação das ondas (m/s);

Dap = densidade aparente (g/cm³).

3.3.6 Ondas de tensão

Os mesmos corpos de prova usados no ensaio de ultrassom foram utilizados neste ensaio. O equipamento utilizado foi o *Stress Wave Timer* da marca Metriguard, modelo 239A (Figura 3.7). As amostras foram posicionadas entre dois acelerômetros, um em cada extremidade das peças. O primeiro sensor posicionado no lado onde foi produzido o impacto que gerou a onda de tensão, e o segundo no lado oposto, desta forma, o tempo de propagação começa a ser contado quando a onda de tensão chega ao acelerômetro de partida e termina quando atinge o acelerômetro de parada. O resultado foi visualizado automaticamente no visor do aparelho. Foram feitas três medições de tempo de propagação da onda para cada amostra, totalizando 21 medições para cada tratamento e testemunha para cada espécie.

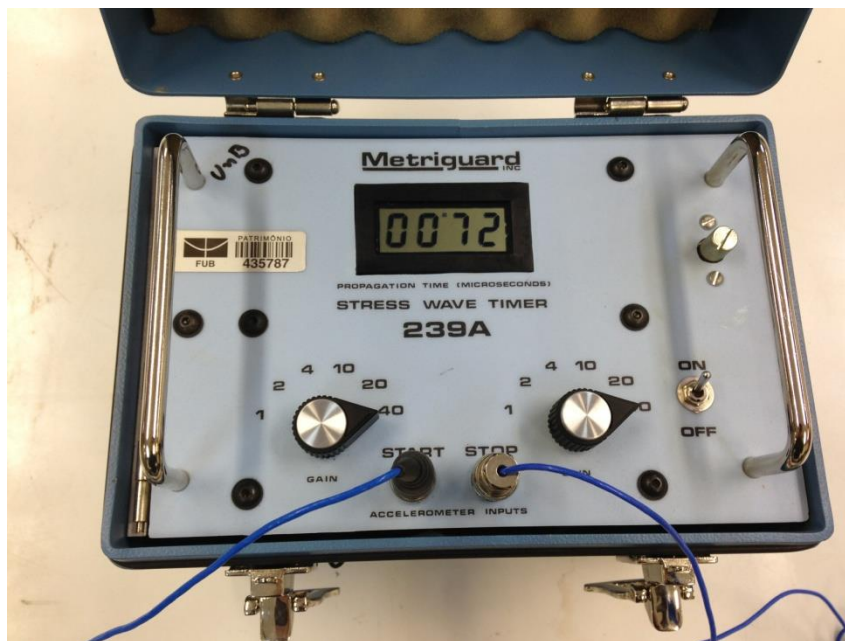


Figura 3.7. Equipamento *Stress Wave Timer* Metriguard 239A.

Obtidos os dados de velocidade de propagação da onda por meio da média das medições para cada amostra e a distância entre cada transdutor foi calculado o módulo de elasticidade dinâmico (MOEds), utilizando a Equação 3.10. É importante destacar que foi desconsiderada a aceleração da gravidade para o cálculo do MOEd e do MOEds.

3.3.7 Colorimetria

Para o ensaio de colorimetria foi utilizado um espectrofotômetro da marca X-Rite Color Eye XTH com resolução de 3nm, equipado com uma esfera integradora de refletância difusa, iluminante D65 e ângulo de 10°, em temperatura ambiente, acoplado a um microcomputador.

Nos mesmos corpos de prova de determinação do MOEd (ultrassom e stress wave) realizou-se 15 leituras por face (radial e tangencial) em cada corpo de prova, totalizando 210 medidas para cada tratamento e testemunha para as duas espécies. A metodologia adotada para a determinação dos parâmetros colorimétricos foi o sistema CIELAB 1976, conforme Gonzalez (1993).

Os parâmetros colorimétricos determinados neste trabalho foram L* (claridade), coordenadas a* (coloração vermelha-verde) e b* (coloração amarelo-azul), C (saturação) e h* (ângulo de tinta). Para o cálculo dos parâmetros C (saturação) e h* (ângulo de tinta) foram utilizadas as Equações (3.11) e (3.12), conforme procedimento descrito por Gonzalez (1993).

$$C = \frac{(a^{*2} + b^{*2})}{2} \quad (\text{Equação 3.11})$$

Onde:

C = saturação;

a* = matiz do eixo vermelho-verde;

b* = matiz do eixo amarelo-azul;

$$h^* = \tan^{-1} \frac{b^*}{a^*} \quad (\text{Equação 3.12})$$

Onde:

h* = ângulo de tinta.

Os valores de todas as variáveis colorimétricas foram obtidos diretamente pelo *software* de aquisição de dados do aparelho e posteriormente tabulados em planilha eletrônica.

Para quantificar a alteração total da cor (ΔE^*) foi utilizada a Equação 3.13.

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (\text{Equação 3.13})$$

Onde:

ΔE^* = alteração total da cor;

ΔL^* = alteração da claridade: L^* das amostras tratadas menos L^* das amostras não tratadas (testemunha);

Δa^* e Δb^* = alteração das coordenadas cromáticas: a^* e b^* das amostras tratadas menos a^* e b^* das amostras não tratadas (testemunha);

Para a classificação da alteração da cor foi utilizada a Tabela 3.4, proposta por Hikita et al. (2001) apud Barreto e Pastore (2009), baseada nos níveis de percepção visual.

Tabela 3.4. Classificação da variação total da cor de madeiras (Hikita et al., 2001 citado por Barreto e Pastore, 2009).

Alteração total da cor (ΔE^*)	Classificação
0,0 - 0,5	Desprezível
0,5 - 1,5	Ligeiramente perceptível
1,5 - 3,0	Notável
3,0 - 6,0	Apreciável
6,0 - 12,0	Muito apreciável

3.4 ANÁLISE QUÍMICA

A análise química foi realizada no Setor de Química do LPF. A preparação da madeira para análise seguiu a norma TAPPI 257 cm-85, o teor de umidade seguiu a norma TAPPI 264 om-88 e o teor de extrativos a norma TAPPI 204 om-88. A lignina total foi obtida pelo somatório da lignina solúvel e insolúvel, obtidas utilizando as normas LAP 003 e 004. O teor de cinzas na madeira foi mensurado segundo a norma TAPPI 211 om-93.

3.4.1 Preparação da Madeira e Teor de Extrativos

Os corpos de prova foram transformados em amostras menores, de dimensões de 2 cm x 2 cm x 6 cm e posteriormente transformados em palitos de dimensões variáveis (0,1

cm x 0,1 cm x 0,6 cm, aproximadamente), como ilustrado na Figura 3.8. Os palitos foram então submetidos a um processo de moagem e peneiramento utilizando um moedor (Figura 3.8) e duas peneiras (40 mesh e 60 mesh), obtendo-se cerca de 100 gramas de serragem para cada tratamento, classificada entre 40 e 60 mesh (de granulometria maior que 0,25 mm e menor que 0,42 mm).



Figura 3.8. Transformação dos corpos de prova para a análise química. Palitos de madeira de dimensões variáveis (A). Moedor utilizado para moer os palitos de madeira (B).

A Norma TAPPI 264 om-88 estabelece que a madeira deve passar por uma preparação para a análise química, que consiste em eliminar os materiais que não são considerados parte da substância madeira, chamados de extrativos. Foram feitas três repetições de cada tratamento térmico e testemunha. Esse processo foi feito por meio da extração em solventes organo-solúveis em um extrator tipo Soxhlet, consistindo em três etapas: a) Extração 2:1 (v/v) partes de tolueno/etanol, por aproximadamente 10 horas, com o objetivo de remover os extrativos da madeira (Figura 3.9); b) Extração com etanol, por aproximadamente 10 horas, com o objetivo de promover a limpeza completa do material e c) Água deionizada em ebulição no banho maria de laboratório Tecnal TE – 184 por 1 hora.



Figura 3.9. Preparação da madeira para análise química em extrator do tipo Soxhlet.

O teor de extrativos foi obtido ainda na primeira etapa da limpeza, com tolueno e etanol. Os extrativos ficam retidos nos balões de fundo chato utilizados no equipamento como produto da extração, misturados com o solvente, que foi evaporado (Figura 3.9). Os balões ao serem pesados (em balança digital Metler AE160, usada em todas as demais pesagens) ainda sem conteúdo e depois do processo de limpeza, com os extrativos retidos no fundo, forneceram por diferença de massa a quantidade de extrativos.

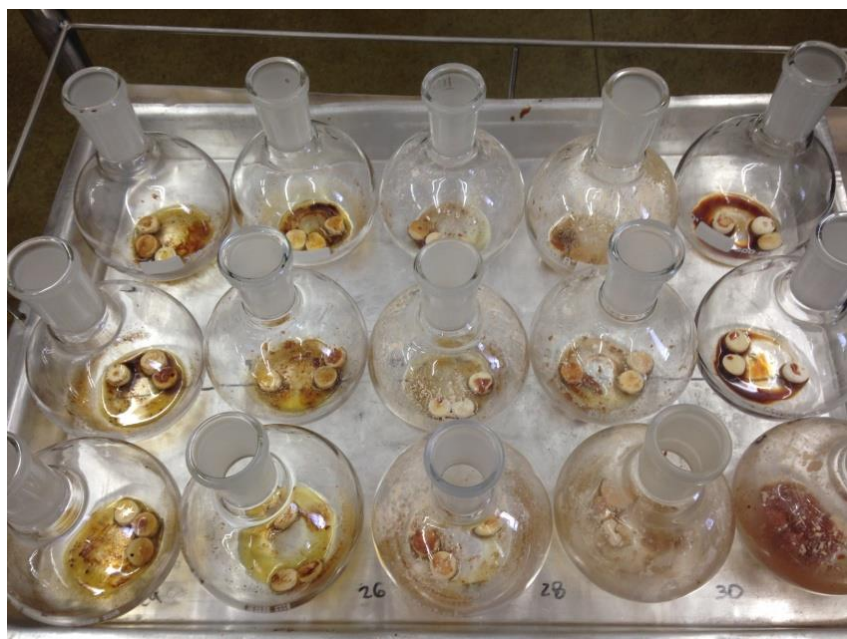


Figura 3.10. Extrativos retidos nos balões do tipo fundo chato

O teor de umidade foi determinado em duplicata para cada tratamento térmico e testemunha. Placas metálicas identificadas com 1 g das amostras foram pesadas e posteriormente inseridas em estufa à $105 \pm 2^\circ\text{C}$ e posteriormente pesadas após atingirem massa constante.

As amostras livres de extrativos secaram ao ar livre por cerca de dois dias e em seguida foram submetidas à análise para determinação da lignina (LAP 003 e 004).

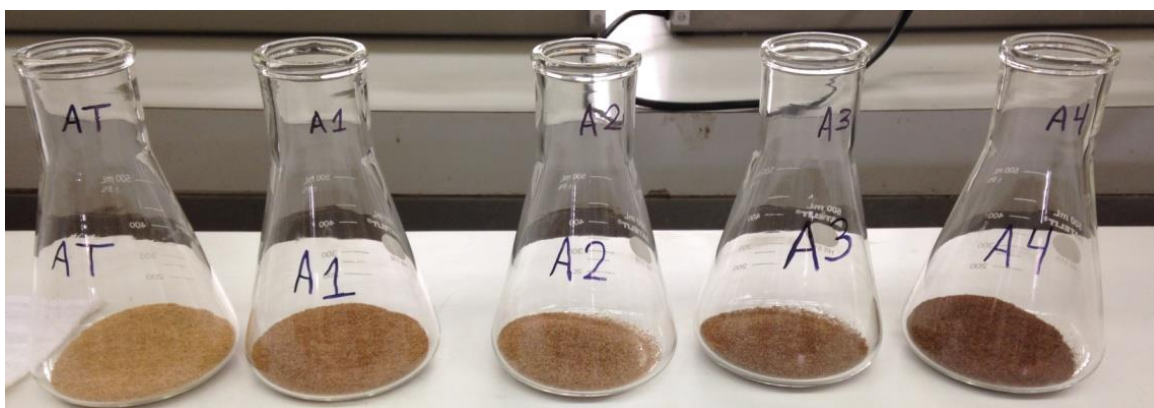


Figura 3.11. Amostras livres de extrativos, onde AT = Testemunha; A1 = T1; A2 = T2; A3 = T3 e A4 = T4 para a madeira de angelim.

3.4.2 Lignina Insolúvel em Ácido

Em tubos de ensaio foram colocados 0,3 g do material livre de extrativos que foram submetidos à hidrólise com 3 ml de ácido sulfúrico em banho maria a $30,0 \pm 1,0^\circ\text{C}$ por 2 horas. Em seguida, as amostras foram para a autoclave em recipientes para hidrólise autoclaváveis (apropriados para suportar alta temperatura) a 122°C por 90 minutos e depois o conteúdo foi filtrado em cadinhos filtrantes de vidro, considerando-se o sólido retido como a lignina insolúvel. Foram feitas três repetições para cada tratamento.

3.4.3 Lignina Solúvel em Ácido

O líquido remanescente da filtração da lignina insolúvel foi analisado pela espectroscopia na região do ultravioleta (UV-VIS). Foi utilizado um espectrofotômetro UV VIS da marca Femto 700 plus. As absorbâncias foram medidas a 205 nm, tomando-se como referência uma solução de ácido sulfúrico diluído nas mesmas proporções. O fator de diluição foi a diluição da solução a qual foi registrado o espectro em água deionizada. Foi

utilizado o fator de diluição 5, ou seja, 2 ml do filtrado para 8 ml de água deionizada. Foram feitas duas leituras para cada repetição de cada tratamento.

3.4.4 Lignina Total

O teor de lignina total consiste na soma da fração solúvel e insolúvel.

3.4.5 Teor de Cinzas e Teor de umidade

Foram utilizadas duas repetições de cada tratamento. Cadinhos de porcelana previamente calcinados em uma mufla da marca Quimis modelo Q318 M24 a 1000°C por 2 horas foram resfriados em dessecador. Em cada cadinho foram colocados $2 \pm 0,00015$ g de amostra. Para determinação do teor de umidade os cadinhos seguiram para estufa à $105 \pm 2^\circ\text{C}$ até atingirem massa constante e para o teor de cinzas os cadinhos foram posteriormente levados novamente à mufla, em temperatura de $525 \pm 25^\circ\text{C}$ por 4 horas, seguiram para resfriar em dessecador e depois sua massa foi novamente pesada.

3.4.6 Holocelulose

A holocelulose, que é a soma da celulose mais a hemicelulose, foi obtida por meio da diferença entre a massa do material livre de extrativos, da lignina total e das cinzas conforme a Equação 3.14.

$$TH = 100 - (TLT + TCZ) \quad (\text{Equação 3.14})$$

Onde:

TH = Teor de holocelulose (%);

TLT = Teor de lignina total (%);

TE = Teor de cinzas (%).

3.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os valores dos resultados obtidos nos ensaios foram submetidos à análise de variância (ANOVA) com o auxílio do programa ASSISTAT 7.7, a fim de verificar se existia diferença estatística entre os tratamentos. Para os dados que diferiram estatisticamente, ou seja, quando o valor de F foi significativo ($\alpha = 0,05$), foi aplicado o teste de médias de Tukey a 5% de significância.

Antes da análise de variância, a normalidade das distribuições entre as médias foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk a 95% de probabilidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos no estudo são apresentados e discutidos ao mesmo tempo para as duas espécies dentro de cada tópico correspondente.

4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

4.1.1 Densidade básica, Retratibilidade e Perda de massa

A Tabela 4.1 contém os valores médios das propriedades físicas da madeira de angelim vermelho (*Dinizia excelsa*). A densidade básica média encontrada para a madeira não tratada foi de 0,85 g/cm³, próxima a encontrada pelo IBDF (1983), de 0,83 g/cm³ e por Nascimento et al. (1997) de 0,88 g/cm³.

Tabela 4.1. Valores médios das propriedades físicas da madeira de angelim.

Tratamento	Db (g/cm ³)	Rv(%)	Rt(%)	Rr(%)	CA	PM (%)
Testemunha	0,853a (0,08)	10,85a (1,29)	6,46a (0,68)	4,39a (0,74)	1,49a (0,17)	- -
T1	0,872a (0,03)	9,64ab (1,22)	5,65a (1,00)	3,98ab (0,48)	1,43a (0,24)	7,49a (0,02)
T2	0,853a (0,07)	9,05ab (1,09)	5,48a (1,02)	3,57b (0,20)	1,53a (0,28)	7,73a (0,02)
T3	0,835a (0,05)	9,17ab (1,67)	5,64a (1,41)	3,53b (0,35)	1,59a (0,32)	8,09a (0,02)
T4	0,850a (0,02)	8,44b (1,37)	4,99a (1,19)	3,45b (0,24)	1,44a (0,28)	8,86a (0,02)

Em que: Db = densidade básica; Rv = retratibilidade volumétrica; Rt = retratibilidade linear; Rr = retratibilidade radial; CA = coeficiente de anisotropia; PM = perda de massa; Os valores entre parênteses são referentes ao desvio padrão. Valores assinalados com letras diferentes para as médias, dentro da mesma coluna, diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

Os valores referentes à retratibilidade tangencial e radial da madeira não tratada de angelim, iguais a 6,46% e 4,39%, respectivamente, foram inferiores aos encontrados pelo IBDF (1983), de 9,5% e 5,7%, e por Chichignoud et al. (1990), de 8,3% e 5,7% e bem próximos aos encontrados pelo IPT (2013), de 6,6% para contração tangencial e de 4,2% para a radial.

Os tratamentos térmicos não alteraram estatisticamente a densidade básica, a retratibilidade tangencial e o coeficiente de anisotropia para a madeira de angelim. Já a retratibilidade volumétrica e a radial, a partir do primeiro tratamento térmico, T1, obtiveram redução significativa em seus valores. Para o tratamento T4, a 215°C durante 40 minutos, tiveram a maior redução, de 22,21% para a retratibilidade volumétrica e 21,41% para a retratibilidade radial, em relação a testemunha. Não existiu diferença estatística para a perda de massa da madeira de angelim entre os tratamentos térmicos estudados, entretanto, é possível perceber que com o aumento da temperatura e do tempo houve um ligeiro aumento na perda de massa.

Para a madeira de sapucaia (*Lecythis pisonis*) os valores médios das propriedades físicas são mostrados na Tabela 4.2. A densidade encontrada para a madeira não tratada foi de 0,83 g/cm³, próxima a de 0,84 g/cm³ encontrada pelo IBDF (1988) e IBDF (1983).

Tabela 4.2. Valores médios das propriedades físicas da madeira de sapucaia.

Tratamento	Db (g/cm ³)	Rv(%)	Rt(%)	Rr(%)	CA	PM (%)
Testemunha	0,835a (0,10)	12,26a (0,97)	7,93a (0,74)	4,33a (0,28)	1,83a (0,12)	- -
T1	0,800a (0,07)	12,04a (1,67)	7,55a (1,29)	4,48a (0,44)	1,68ab (0,18)	4,35a (0,01)
T2	0,800a (0,10)	11,14a (2,87)	6,93a (1,91)	4,21a (1,03)	1,64ab (0,20)	5,23ab (0,01)
T3	0,804a (0,06)	11,38a (2,75)	6,86a (1,94)	4,52a (0,88)	1,50b (0,21)	6,44bc (0,1)
T4	0,803a (0,07)	11,51a (3,33)	6,72a (2,29)	4,79a (1,16)	1,39b (0,27)	7,82c (0,02)

Em que: Db = densidade básica; Rv = retratibilidade volumétrica; Rt = retratibilidade linear; Rr = retratibilidade radial; CA = coeficiente de anisotropia; PM = perda de massa; Os valores entre parênteses são referentes ao desvio padrão. Valores assinalados com letras diferentes para as médias, dentro da mesma coluna, diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

A retratibilidade tangencial e radial para a madeira não tratada foi de 7,93% e 4,33%, respectivamente, semelhante a valores encontrados na literatura (IBDF, 1993; CHICHIGNOUD et al.,1990).

Para essa espécie a densidade básica, as retratibilidades volumétrica, tangencial e radial, apesar de mostrarem uma tendência de diminuir com os tratamentos térmicos, não foram significativamente diferentes entre si. O coeficiente de anisotropia (CA), por sua vez, apresentou redução significativa para todos os tratamentos em relação à testemunha,

principalmente para o tratamento mais severo, T4, talvez refletindo a diminuição do valor das retratibilidades tangencial e radial não acusadas no teste estatístico mencionado anteriormente.

A madeira de sapucaia inicialmente classificada, segundo Nock et al. (1975), como de qualidade normal (coeficiente de anisotropia entre 1,5 e 2,0) passa a ser classificada como de excelente qualidade ao ser tratada a 215°C durante 20 e 40 minutos (T3 e T4), mostrando uma evolução na redução da instabilidade dimensional dessa espécie. Pode-se atribuir a utilização de madeiras com índice de coeficiente de anisotropia de qualidade normal à confecção de estantes, mesas, armários, usos que permitam pequenos empenamentos e de qualidade excelente a móveis finos, esquadrias e barcos.

Diversos trabalhos mostram a influência da temperatura e do tempo na retratibilidade da madeira. Menezes et al. (2014) avaliaram o efeito da modificação térmica no inchamento total e coeficiente de anisotropia da madeira de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna* tratadas a temperaturas finais de 140, 160 e 180°C durante 2,5 horas utilizando estufa. Observaram que, no geral, a modificação térmica foi eficiente na redução do inchamento total e do coeficiente de anisotropia de ambas as espécies, sendo os valores mais expressivos observados nos tratamentos de maiores temperaturas, como observado nesse estudo para as madeiras de angelim e sapucaia.

Takeshita e Jankowsky (2015) trataram termicamente as madeiras de Jatobá e Muiracatiara a temperaturas inferiores as normalmente utilizadas, ou seja, a 60, 75 e 90°C por períodos mais longos de 24, 48, 72 e 96 horas. Concluíram que o tratamento térmico à temperatura de 90°C foi o mais efetivo, reduzindo a higroscopicidade da madeira e, conseqüentemente, a sua movimentação dimensional e que o tempo não influenciou este parâmetro.

Da mesma forma, Borges e Quirino (2004) tratando termicamente a madeira de *Pinus caribaea* relatam que a retificação térmica foi eficiente para promover a redução na higroscopicidade da madeira e, conseqüentemente, pode tornar-se uma alternativa promissora para promover maior estabilidade dimensional da madeira.

Calonego (2009) tratando termicamente a madeira de *Eucalyptus grandis* relata que houve melhora significativa na estabilidade dimensional da madeira, existindo diminuição das retratibilidades volumétrica, radial e tangencial para as madeiras tratadas.

Batista et al. (2011) analisando o efeito do tratamento térmico também em *Eucalyptus grandis* a 200 e 230°C por 1, 2 e 3 horas concluíram que a temperatura foi mais significativa que o tempo na redução da instabilidade dimensional da madeira.

Dos Anjos (2014) tratou termicamente a 140, 160 e 180°C por 1h30 e 3h as espécies maçaranduba (*Manilkara huberi*), pau-roxo (*Peltogyne recifensis*) e cupiúba (*Goupia glabra*) e obteve como resultado aumento da estabilidade dimensional das três espécies, sendo o ensaio utilizando a temperatura mais elevada o que mais influenciou tal propriedade.

Observa-se que as diversas temperaturas e tempos estudados, assim como o tipo de madeira (espécie) e os equipamentos utilizados em cada pesquisa, têm mostrado comportamentos diferentes. Na maioria das vezes, como neste estudo, o tratamento térmico contribui para a melhoria da estabilidade da madeira.

A densidade não teve alterações significativas com a aplicação dos tratamentos térmicos para nenhuma das madeiras. Hill (2006) explicando os fatores que influenciam os tratamentos térmicos analisa que a densidade não apresenta alteração nos casos em que a variação da massa e de volume acontecem de maneira semelhante. Brito et al. (2006), assim como neste estudo, não detectaram alteração significativa na densidade básica da madeira termorretificada de eucalipto. Bal (2013) estudando a influência do tratamento térmico nas propriedades físicas das madeiras de *Populus euramericana* e *Platanus orientalis* a 150 e 200°C durante 3 horas, relata que a densidade da *P.euramericana* só reduziu significativamente quando tratada a 200°C. Para a outra espécie não houve alteração, assim como relatado neste estudo para as espécies de sapucaia e angelim.

A perda de massa para a madeira de sapucaia aumentou significativamente entre os tratamentos, evidenciando, desta forma, que o aumento de temperatura e tempo teve influência na perda de massa. A perda de massa e a temperatura tem relação direta, resultante da pirólise e/ou degradação dos constituintes químicos da madeira, principalmente as hemiceluloses que são o composto menos estável termicamente, devido a sua estrutura amorfa (CONTE et al., 2014; MOHEBBY e SANAEI, 2005).

Esteves et al. (2008) estudando a madeira de pinus encontraram resultados de perda de massa inferiores aos encontrados neste estudo para as duas espécies, de 0,3% para a temperatura de 170°C e de 3% para 200°C. Dos Anjos (2014) encontrou perdas de massa

ligeiramente superiores as desta pesquisa, de 10,20%, 9,07% e 10,45% para pau-roxo, maçaranduba e cupiúba, respectivamente, ao tratá-las a 180°C por 1 hora e 30 minutos. Poubel et al. (2013) estudando a termorreificação de pinus a 200 e 220°C durante duas horas verificaram perdas de massa de 9,94% e 21,03% para as duas temperaturas testadas. Os autores citados, desta forma, encontraram perda de massa consideravelmente maior para o ensaio com maior temperatura, assim como o encontrado neste estudo para a madeira de sapucaia. Na literatura outros autores descrevem essa tendência de crescimento de perda de massa com o aumento da temperatura (CONTE et al., 2014; MOURA et al., 2012; SURINI et al., 2012; BORREGA e KARENLAMPI, 2008). Esteves et al. (2005) trataram termicamente a madeira de eucalipto e pinus portuguesas em estufa a temperaturas que variaram de 170 a 200°C e em autoclave de 190 a 210°C durante 2, 4, 6, 8, 12 e 24 horas. Os autores observaram maior perda de massa em autoclave para o eucalipto e uma pequena melhora em relação à estabilidade dimensional das espécies após os tratamentos mais severos.

A diferença nos valores de perda de massa encontrados pelos autores pode ser explicada pelos diferentes métodos de tratamentos térmicos utilizados, das combinações entre temperatura e tempo, além do tipo de espécie madeireira estudada, o que poderia explicar também o ocorrido no estudo. É possível perceber, entretanto, que de maneira geral temperaturas mais elevadas promovem maiores perdas de massa.

4.1.2 Módulo de Ruptura e Módulo de Elasticidade

As Tabelas 4.3 e 4.4 contém os valores médios das propriedades mecânicas (flexão estática) das madeiras de angelim e sapucaia, respectivamente.

Os valores encontrados para a madeira de angelim não tratada (testemunha) foram de 121,38 MPa para o módulo de ruptura e de 12.600 MPa para o módulo de elasticidade à flexão estática (Tabela 4.3). Estes valores estão próximos aos encontrados na literatura (NASCIMENTO et al., 1997; CHICHIGNOUD et al., 1990; IBDF, 1983).

Os valores referentes ao módulo de ruptura à flexão estática são estatisticamente iguais para a testemunha da madeira de angelim e aquelas submetidas aos tratamentos térmicos. Os tratamentos térmicos estudados não afetaram significativamente essa propriedade. Para o módulo de elasticidade estático os tratamentos térmicos não diferiram em relação à testemunha, exceto os tratamentos T1 e T3, que apresentaram valores

inferiores à testemunha. O tratamento térmico T1 favoreceu esta propriedade, havendo um aumento significativo no módulo de elasticidade estático desta espécie. Já o tratamento T3 levou a uma diminuição do valor desta propriedade.

Ainda para a madeira de angelim, o módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo stress wave (MOEds) não teve alteração significativa entre os tratamentos térmicos em relação à testemunha. Já o MOEdu, estimado pelo ultrassom, teve um comportamento próximo ao do módulo de elasticidade estático, apesar de apresentar valores maiores devido a natureza viscoelástica da madeira. O tratamento T1 melhorou esta propriedade, aumentando o seu valor.

Tabela 4.3. Valores médios das propriedades de flexão estática e dos módulos de elasticidades dinâmicos da madeira de angelim.

Tratamento	Flexão estática		Ultrassom	Stress Wave
	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOEdu (MPa)	MOEds (MPa)
Testemunha	121,38a (23,8)	12.600b (876,8)	25.467ab (1.668)	16.446a (1.866)
T1	133,85a (35,4)	15.156a (1.408)	26.983a (1.960)	18.049a (1.578)
T2	89,53a (30,1)	12.592b (2.418)	25.309ab (2.293)	17.869a (2.204)
T3	98,01a (30,4)	11.344c (1.842)	23.566c (2.276)	15.781a (1.322)
T4	107,66a (35,0)	13.129b (2.220)	25.504ab (2.257)	17.887a (2.002)

Em que: MOR = módulo de ruptura à flexão estática; MOE = módulo de elasticidade estático; MOEdu = módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo ultrassom; MOEds = módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo stress wave.

Os valores entre parênteses são referentes ao desvio padrão. Valores assinalados com letras diferentes para as médias, dentro da mesma coluna, diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

Os valores encontrados para o módulo de ruptura de 143,38 MPa e módulo de elasticidade de 18.145 MPa para a madeira de sapucaia não tratada (Tabela 4.4) também são semelhantes aos encontrados na literatura para a mesma espécie (NASCIMENTO et al. 1997; IBDF, 1983).

Os valores dos módulos de ruptura e de elasticidade à flexão estática da madeira de sapucaia não sofreram alteração significativas quando tratada termicamente. Os resultados para os módulos de elasticidade dinâmicos obtidos por stress wave foram estatisticamente

iguais ao encontrado para a testemunha, exceto para o tratamento T2. Este tratamento mostrou um aumento do módulo de elasticidade em relação à testemunha e ao tratamento 2 (T2). Para o módulo de elasticidade dinâmico obtido por ultrassom não foi verificada diferença significativa entre a testemunha e os tratamentos.

Tabela 4.4. Valores médios das propriedades de flexão estática e dos módulos de elasticidades dinâmicos da madeira de sapucaia.

Tratamento	Flexão estática		Ultrassom	Stress Wave
	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOEdu (MPa)	MOEds (MPa)
Testemunha	143,38a (14,0)	18.145a (3.155)	30.526a (1.239)	20,994a (876,9)
T1	150,17a (11,0)	17.162a (2.350)	32.461a (1.337)	21.130a (527,3)
T2	154,28a (25,3)	17.782a (1.586)	32.611a (1.403)	23.044b (1.306)
T3	142,24a (33,5)	17.515a (1.212)	32.098a (1.507)	22.477ab (1.208)
T4	144,20a (30,6)	17,019a (1.387)	31.205a (1.611)	21.887ab (1.611)

Em que: MOR = módulo de ruptura à flexão estática; MOE = módulo de elasticidade estático; MOEdu = módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo ultrassom; MOEds = módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo stress wave.

Os valores entre parênteses são referentes ao desvio padrão. Valores assinalados com letras diferentes para as médias, dentro da mesma coluna, diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

Durante o tratamento térmico a madeira pode perder resistência mecânica devido à diminuição de componentes como a xilose, a galactose e arabinose. Cada madeira, entretanto, pode reagir de modo diferente devido à variação entre os tipos de tratamentos térmicos e das características intrínsecas a cada espécie (WINANDY e ROWELL, 2005). Vernois (2000) estudando o tratamento térmico na França ressalta que, dependendo da espécie, as propriedades mecânicas a temperaturas de até 210°C permanecem com valores próximos aos originais.

Motta et al. (2013) verificaram o efeito do tratamento térmico na resistência à flexão estática da madeira de teca proveniente de Minas Gerais. Adotaram o aquecimento por meio de autoclave sob pressão de 1,2 kgf/cm². Os autores constataram, assim como nesse estudo, que os tratamentos térmicos não influenciaram o módulo de elasticidade (MOE) à flexão estática e o módulo de ruptura (MOR) à flexão estática. Ferreira (2012),

diferentemente ao encontrado neste estudo, relata que o módulo de elasticidade e ruptura à flexão estática tiveram redução significativa em relação à testemunha quando a madeira de *Manilkara* sp. foi tratada a 180, 200 e 220°C. No entanto, os tratamentos a 200 e 220°C não se diferenciaram estatisticamente em relação a essa propriedade.

Xavier (2013) estudando a influência dos tratamentos térmicos nas madeiras de eucalipto e pinus tratadas a 180 e 200°C por 1 e 2 horas relatou que, assim como neste estudo, os tratamentos não exerceram influência significativa no módulo de elasticidade à flexão estática em relação às testemunhas. Da mesma forma, Calonego (2009) não encontrou para a madeira de *Eucalyptus grandis* termorretificada entre 140 e 220°C alteração significativa no módulo de elasticidade à flexão estática.

Zhang e Yu (2013) tratando termicamente a espécie *Phyllostachys pubescens* a 110 e 220°C durante 1, 2, 3 e 4 horas observaram ligeiro aumento do módulo de elasticidade à flexão estática quando a espécie foi tratada a 110°C e queda desta propriedade quando a temperatura do tratamento foi de 220°C.

Garcia et al. (2012) estudaram *Eucalyptus grandis* e verificaram que o módulo de elasticidade dinâmico determinado pelo equipamento de stress wave diminuiu cerca de 13% quando a madeira foi tratada termicamente a 240°C por 4 horas, sugerindo que tratamentos mais severos possam causar maiores variações na estrutura anatômica da madeira e, conseqüentemente, afetar mais o módulo de elasticidade dinâmico.

Ferreira (2012) relata que os módulos de elasticidade dinâmico obtidos pelo ultrassom e pelo stress wave foram eficientes no acompanhamento da propriedade de elasticidade da madeira de maçaranduba quando submetida ao tratamento térmico entre as temperaturas de 180 e 220°C, tendo seus valores reduzidos em relação à testemunha.

Novamente, a diferença nos valores das propriedades mecânicas encontrados pelos autores pode ser explicada pelos diferentes métodos de tratamentos térmicos utilizados, das combinações entre temperatura e tempo, além do tipo de espécie madeireira estudada, o que poderia explicar também o ocorrido no estudo.

As Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, mostram as análises de regressão entre os dados dos módulos de elasticidade obtidos nos ensaios de flexão estática e os estimados pelos equipamentos de ultrassom e stress wave para as madeiras de angelim e de sapucaia.

Foram realizadas análises de variância para verificar a validade e qualidade dos modelos propostos.

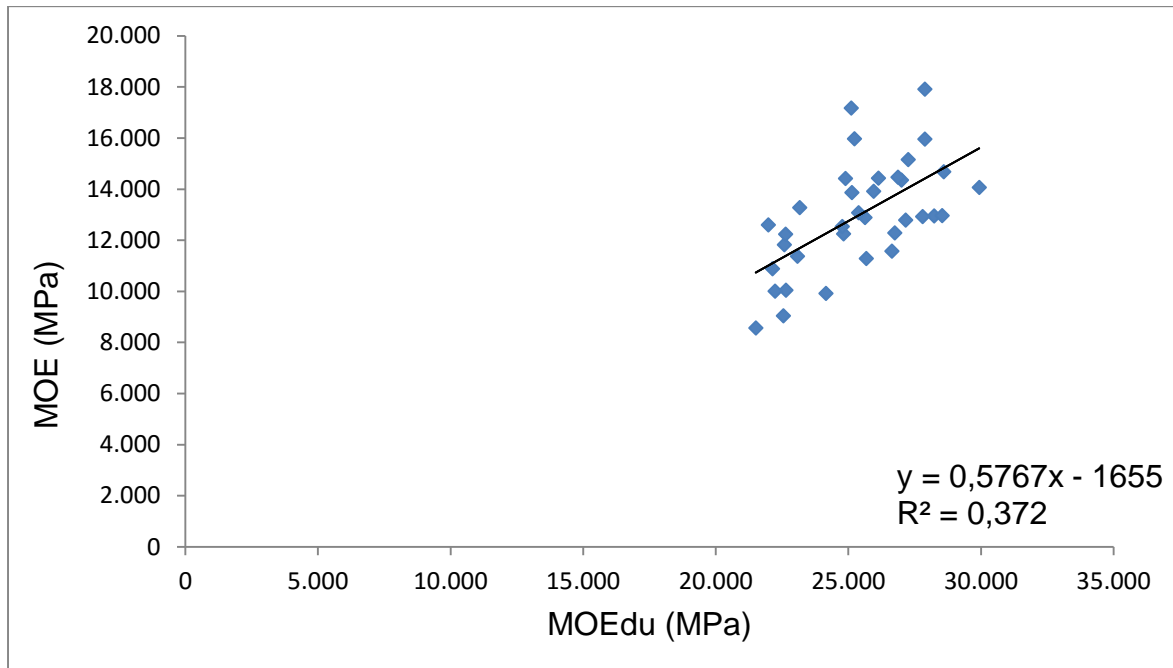


Figura 4.1. Análise de regressão linear para a predição do módulo de elasticidade estático (MOE) em função do módulo de elasticidade dinâmico (MOEdu) obtido pelo Ultrassom para a madeira de angelim. A regressão foi significativa ao nível de 5% de significância.

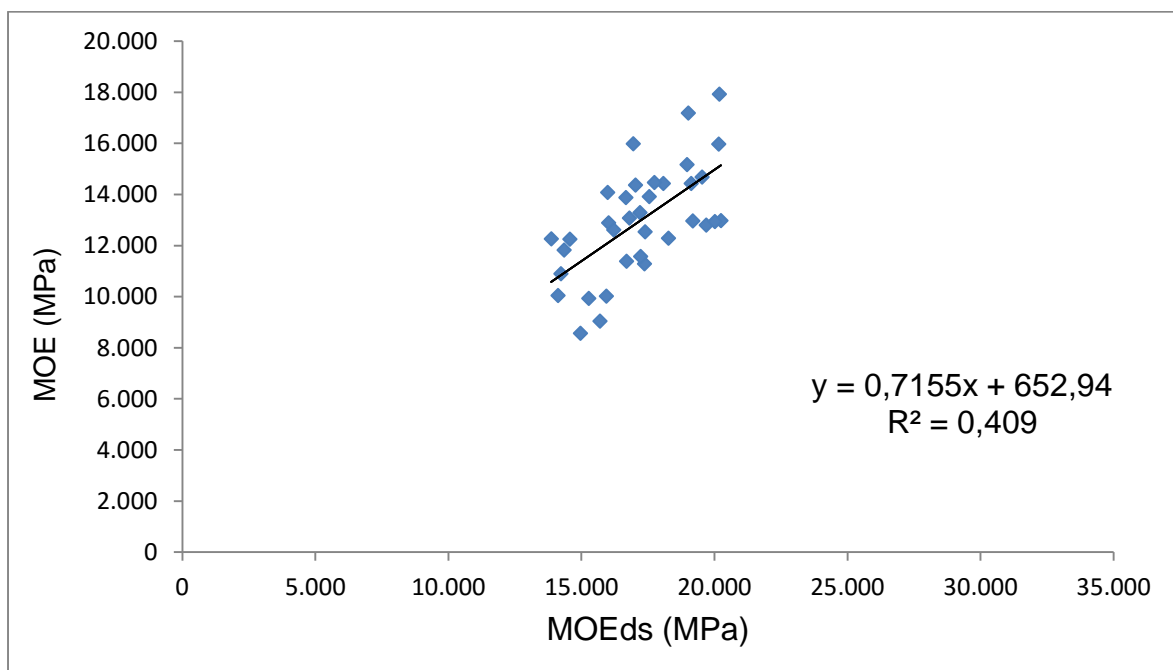


Figura 4.2. Análise de regressão linear para a predição do módulo de elasticidade estático (MOE) em função do módulo de elasticidade dinâmico (MOEds) obtido pelo Stress Wave para a madeira de angelim. A regressão foi significativa ao nível de 5% de significância.

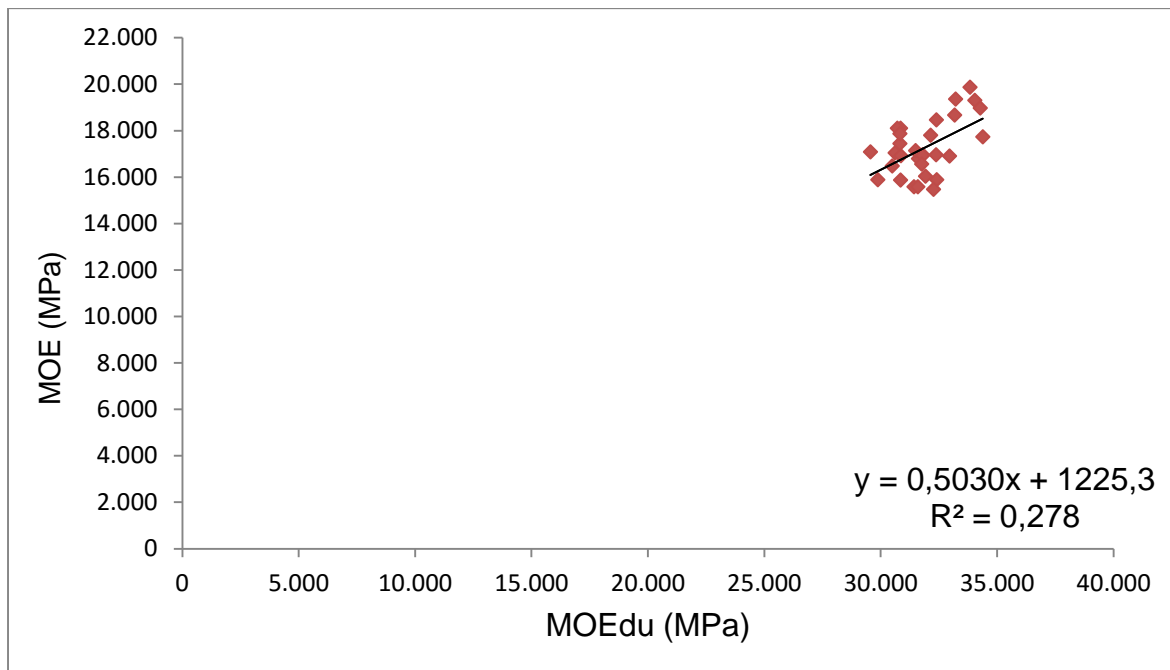


Figura 4.3. Análise de regressão linear para a predição do módulo de elasticidade estático (MOE) em função do módulo de elasticidade dinâmico (MOEdu) obtido pelo Ultrassom para a madeira de sapucaia. A regressão foi significativa ao nível de 5% de significância.

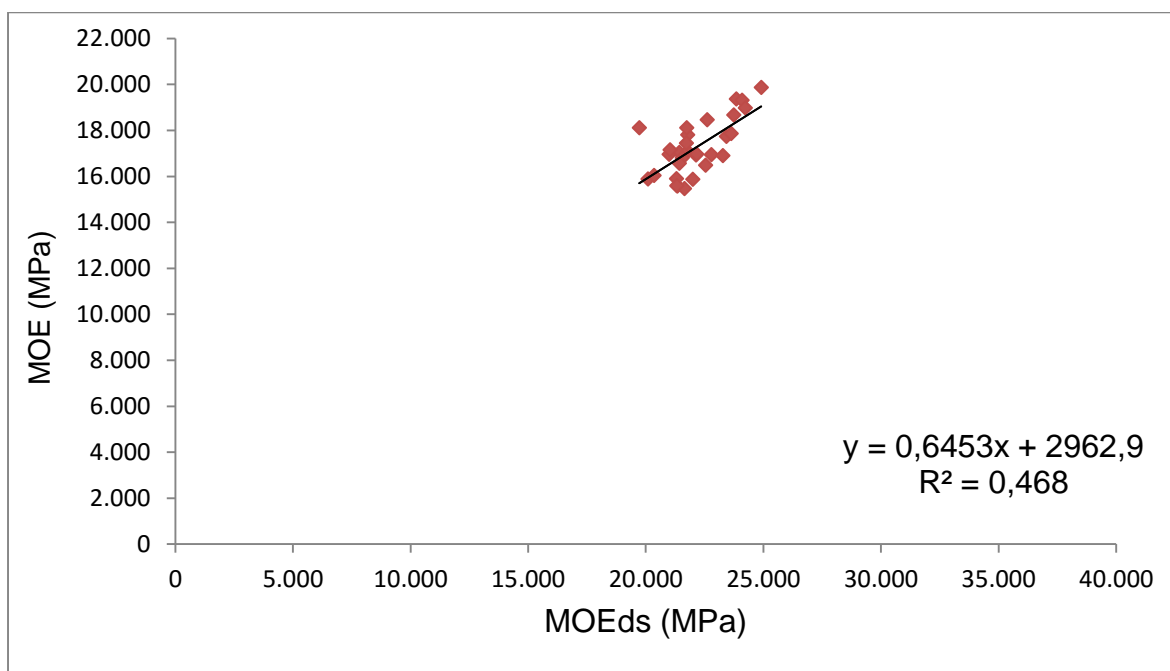


Figura 4.4. Análise de regressão linear para a predição do módulo de elasticidade estático (MOE) em função do módulo de elasticidade dinâmico (MOEds) obtido pelo Stress Wave para a madeira de sapucaia. A regressão foi significativa ao nível de 5% de significância.

De uma forma geral, para ambas as espécies, verifica-se que os módulos de elasticidades dinâmicos, tanto obtidos por ultrassom como por stress wave, foram bons estimadores do módulo de elasticidade estático das madeiras, encontrando-se regressões

significativas a 5% de significância. A regressão entre o MOE estático, obtido pela flexão estática, e o dinâmico obtido pelo stress wave e pelo ultrassom tiveram valores de coeficiente de determinação (R^2) iguais a 0,372 e 0,409 para a madeira de angelim e de 0,278 e 0,468 para a sapucaia, respectivamente. Embora o valor de R^2 não seja muito elevado, a correlação é significativa a 5%.

Coefficientes de determinação semelhantes foram encontrados na literatura (MISSIO et al., 2013; RIBEIRO, 2009; SALES et al., 2004) e são considerados satisfatórios para um material de origem natural e anisotrópico como a madeira (RIBEIRO, 2009). Nota-se, ainda, que neste estudo o método de stress wave foi mais preciso que o de ultrassom para estimar o módulo de elasticidade, considerando os coeficientes de determinação. Missio et al. (2013) relatam ainda que o módulo de elasticidade da madeira termoretificada em autoclave e estufa de *Pinus taeda* por meio do ultrassom foi bom estimador do módulo de elasticidade estático, encontrando uma regressão significativa a 1% de significância entre o módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico e um coeficiente de determinação de 0,514.

4.1.3 Colorimetria

As Tabelas e Figuras 4.5 e 4.6 mostram os valores dos parâmetros colorimétricos das faces radial e tangencial da madeira de angelim não tratada e submetida aos tratamentos térmicos.

Os valores dos parâmetros colorimétricos da testemunha da madeira de angelim foram: $L^* = 50,75$; $a^* = 15,44$; $b^* = 22,99$; $C = 27,70$; e $h^* = 56,10$. De acordo com estes valores, a cor original da madeira dessa espécie foi definida como marrom avermelhada, segundo a classificação proposta por Camargos e Gonzalez (2001).

Tabela 4.5. Valores médios dos parâmetros colorimétricos L*, a* e b* da madeira de angelim testemunha e submetidas aos tratamentos térmicos.

Tratamento	L*		a*		b*	
	Tang.	Radial	Tang.	Radial	Tang.	Radial
Testemunha	49,71Aa (1,10)	51,80Ba (2,23)	15,56Aa (1,33)	15,30Aab (0,91)	22,45Aa (1,56)	23,52Aa (1,88)
T1	44,06Ab (3,03)	46,52Ab (1,87)	16,20Aa (0,47)	17,01Ba (0,38)	18,60Ab (1,58)	20,17Aa (1,13)
T2	42,99Ab (2,46)	45,60Ab (3,38)	16,11Aa (0,78)	16,58Aa (1,96)	17,26Ab (1,05)	18,66Ba (1,21)
T3	36,07Ac (1,97)	38,54Ac (3,07)	12,17Ab (1,86)	13,64Ab (2,59)	12,37Ac (1,56)	13,46Ac (1,69)
T4	29,92Ad (2,00)	31,53Ad (1,99)	8,97Ac (2,41)	10,17Ac (2,11)	8,04Ad (1,85)	8,64Ad (1,83)

As letras minúsculas comparam as médias entre linhas e as letras maiúsculas entre colunas, para a mesma variável. As médias com letras iguais não são estatisticamente diferentes entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. Os valores entre parênteses são referentes ao desvio padrão.

Em que: L* = luminosidade; a* = matizes do eixo vermelho-verde; b* = matizes do eixo amarelo-azul.

Tabela 4.6. Valores médios dos parâmetros colorimétricos h* e C da madeira de angelim testemunha e submetidas aos tratamentos térmicos.

Tratamento	C		h*	
	Tang.	Radial	Tang.	Radial
Testemunha	27,33Aa (1,98)	28,07Aa (2,05)	55,29Aa (1,12)	56,90Ba (0,82)
T1	24,69Aab (1,40)	26,40Ba (1,08)	48,83Ab (2,05)	49,80Ab (1,11)
T2	23,63Ab (1,08)	25,02Aa (1,44)	46,90Ab (1,83)	48,47Ab (4,29)
T3	17,43Ac (1,75)	19,27Ab (2,19)	45,43Abc (5,73)	44,80Abc (6,78)
T4	12,06Ad (3,02)	13,35Ac (2,78)	42,12Ac (1,60)	40,39Bc (0,85)

As letras minúsculas comparam as médias entre linhas e as letras maiúsculas entre colunas, para a mesma variável. As médias com letras iguais não são estatisticamente diferentes entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. Os valores entre parênteses são referentes ao desvio padrão.

Em que: C = saturação; h* = ângulo de tinta.

A madeira de angelim (testemunha) apresentou a cor da face tangencial diferente da face radial para os parâmetros L* (claridade ou luminosidade) e h* (ângulo de tinta), ou seja, a madeira não tratada apresenta a face radial mais clara que a tangencial. Segundo

Gonçalez (1993), os elementos anatômicos presentes nas faces tangencial e radial da madeira são as principais causas das diferenças de cores entre estas.

O tratamento térmico propiciou uma aproximação das cores das duas faces para essa espécie, tornando a cor da face radial semelhante à cor da face tangencial, fato explicado, principalmente, pela variável luminosidade (L^*), que não mostra diferenças significativas. Na prática, o que ocorreu foi um maior escurecimento da face radial, igualando-se a tangencial. Isso pode ser explicado pelo aumento de valores das coordenadas a^* e b^* , nesta face, superior ao da tangencial, apesar de nem sempre significativo. Segundo Gonçalez (1993), a interação entre estes pigmentos (vermelho e amarelo) pode ser a causa principal da diminuição do valor de L^* na madeira. Autran e Gonçalez (2006) encontraram para a madeira de seringueira resultado semelhante, não observando diferença significativa entre as faces tangencial e radial.

Analisando ainda as Tabelas e Figuras 4.5 e 4.6, verifica-se que a claridade da madeira de angelim diminui quando tratada termicamente. No tratamento T4, condição em que a madeira foi tratada a maior temperatura por mais tempo, esta atinge o maior escurecimento. Gouveia (2008) ao analisar o comportamento da cor da madeira de três espécies tropicais tratadas a 150 e 200°C, verificou que as madeiras tornaram-se mais escuras com a aplicação de tratamentos mais agressivos, corroborando com este estudo.

A madeira perde pigmento amarelo e vermelho ao longo dos tratamentos, com perdas mais proeminentes nos ensaios de maior temperatura (T3 e T4). O pigmento vermelho se mantém praticamente constante nos dois primeiros ensaios, diminuindo apenas na condição de ensaio sob maior temperatura (215°C). Para a face tangencial a madeira passa a ter mais pigmento vermelho que amarelo no tratamento T4 e para a face radial o mesmo acontece anteriormente, no tratamento T3, o que representa que a madeira passa a ser mais vermelha que amarela em tais condições.

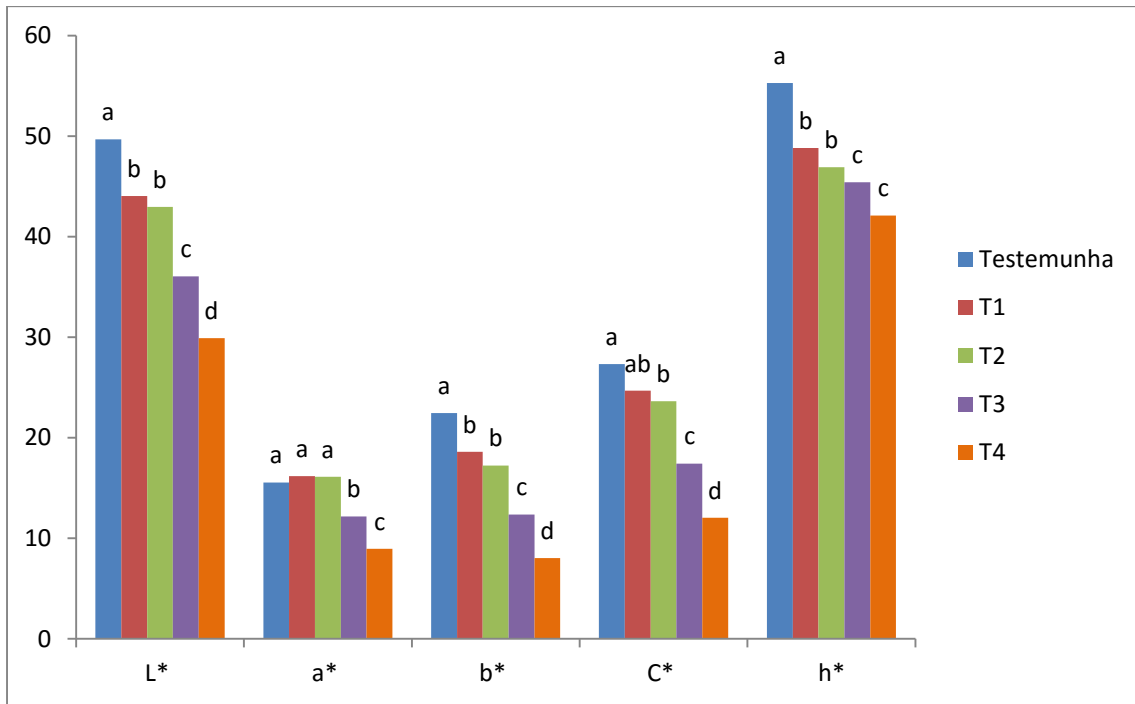


Figura 4.5. Valores médios dos parâmetros colorimétricos a*, b* C e h* da madeira de angelim para a face tangencial. As médias com letras iguais, para a mesma variável, não são estatisticamente diferentes entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

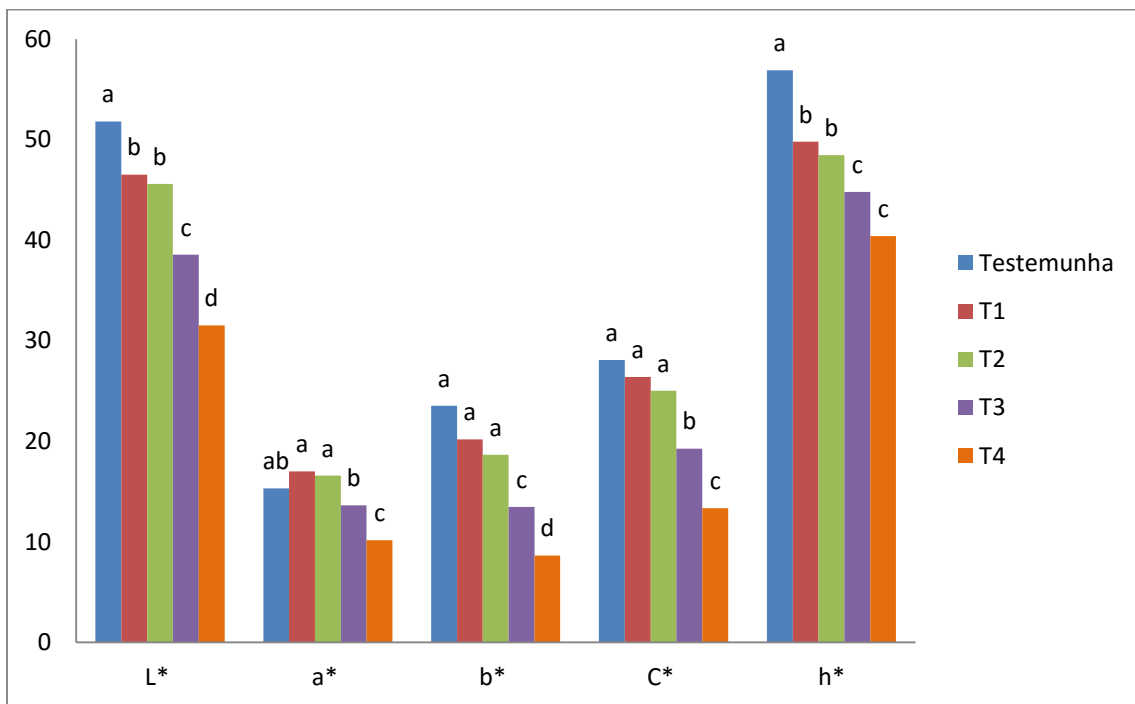


Figura 4.6. Valores médios dos parâmetros colorimétricos a*, b* C e h* da madeira de angelim para a face radial. As médias com letras iguais, para a mesma variável, não são estatisticamente diferentes entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Para a madeira testemunha da sapucaia foram encontrados os valores de $L^* = 53,13$; $a^* = 20,86$; $b^* = 30,44$; $C = 36,92$; e $h^* = 55,57$, classificando-a, segundo Camargos e Gonzalez (2001), como de cor amarelo amarronzado (Tabelas 4.7 e 4.8). As coordenadas a^* e b^* apresentam valores altos apresentando uma forte saturação (C) para ambas as faces. No entanto, a coordenada b^* (coloração amarela) é a principal responsável pela caracterização da cor desta espécie, apresentando valores mais elevados.

Assim como a madeira de angelim, a sapucaia apresenta a face tangencial distinta da radial segundo os parâmetros L^* , b^* e h^* (Tabelas e Figuras 4.7 e 4.8). A face radial é mais amarela e clara, levando o ângulo de tinta (h^*) a ficar mais próximo do eixo b^* no sistema CIELAB 1976, confirmando a proximidade desta face com a coloração amarela. A direção de desdobro torna-se um fator importante na estética da madeira, considerando a sua cor neste caso, podendo o mercado optar pela face que oferecer maior demanda.

Tabela 4.7. Valores médios dos parâmetros colorimétricos L^* , a^* e b^* da madeira de sapucaia.

Tratamento	L^*		a^*		b^*	
	Tang.	Radial	Tang.	Radial	Tang.	Radial
Testemunha	51,13Aa (0,96)	55,14Ba (1,28)	21,07Aa (0,91)	20,64Aa (0,36)	29,57Aa (1,10)	31,32Ba (0,62)
T1	37,89Ab (2,25)	45,22Bb (2,21)	21,01Aa (1,29)	20,50Aa (0,57)	21,00Ab (3,35)	26,67Aab (1,65)
T2	36,55Ab (1,47)	43,89Bbc (2,79)	19,34Aab (1,56)	20,98Aa (0,64)	18,26Abc (2,69)	25,31Bb (1,50)
T3	34,39Abc (1,57)	38,45Bcd (1,15)	15,31Ab (1,25)	16,88Ab (0,93)	14,44Acd (1,76)	18,66Bc (1,70)
T4	30,15Ac (2,76)	34,73Ad (3,05)	10,65Ac (2,43)	14,70Ab (2,39)	10,16Ad (2,94)	15,66Ac (3,55)

As letras minúsculas comparam as médias entre linhas e as letras maiúsculas entre colunas, para a mesma variável, sendo que as médias com letras iguais não são estatisticamente diferentes entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. Os valores entre parênteses são referentes ao desvio padrão.

Em que: L^* = luminosidade; a^* = matizes do eixo vermelho-verde; b^* = matizes do eixo amarelo-azul.

Tabela 4.8. Valores médios dos parâmetros colorimétricos h* e C da madeira de sapucaia.

Tratamento	C		h*	
	Tang.	Radial	Tang.	Radial
Testemunha	36,32Aa (1,30)	37,51Aa (0,48)	54,53Aa (0,90)	56,61Ba (0,82)
T1	29,74Aab (3,25)	33,65Aa (1,60)	44,76Ab (3,02)	54,42Bb (1,19)
T2	26,62Abc (2,96)	32,89Ba (1,28)	43,16Ab (2,10)	50,31Bbc (1,77)
T3	21,05Acd (2,10)	25,17Ab (1,88)	43,18Ab (1,42)	47,80Bcd (1,06)
T4	14,73Ad (3,78)	21,49Ab (4,21)	43,31Ab (1,87)	46,49Ad (2,10)

As letras minúsculas comparam as médias entre linhas e as letras maiúsculas entre colunas, para a mesma variável, sendo que as médias com letras iguais não são estatisticamente diferentes entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. Os valores entre parênteses são referentes ao desvio padrão.

Em que: C = saturação; h* = ângulo de tinta.

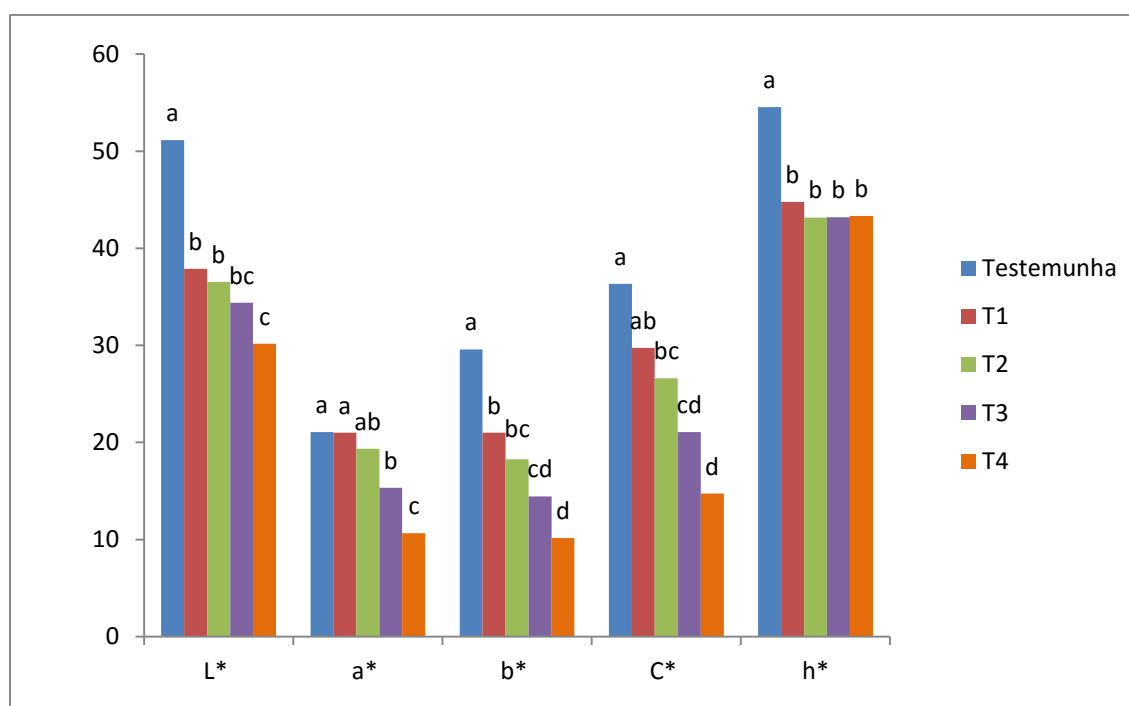


Figura 4.7. Valores médios dos parâmetros colorimétricos a*, b* C e h* da madeira de sapucaia para a face tangencial. As médias com letras iguais, para a mesma variável, não são estatisticamente diferentes entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

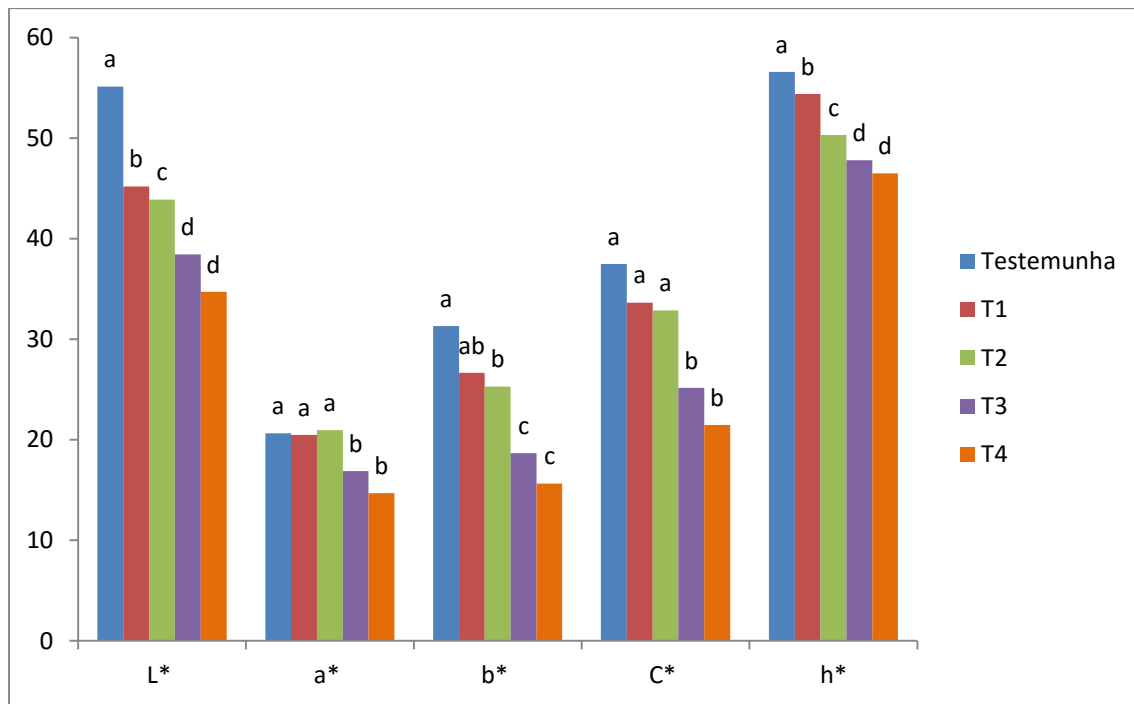


Figura 4.8. Valores médios dos parâmetros colorimétricos a*, b* C e h* da madeira de sapucaia para a face radial. As médias com letras iguais, para a mesma variável, não são estatisticamente diferentes entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

O tratamento térmico levou ao escurecimento das duas faces, tendo afetado de forma mais ou menos proporcional ambas as variáveis (a* e b*), responsáveis pela alteração da cor da madeira. Os tratamentos com temperaturas mais elevadas foram os que apresentaram maior escurecimento das faces, verificando uma maior aproximação do ângulo de tinta (h*) do eixo a* no sistema CIELAB 1976. No entanto, a face radial continuou com o pigmento amarelo predominante, mesmo depois dos tratamentos térmicos. O tratamento térmico T4 promoveu uma aproximação de cores das faces (os valores de L* não apresentaram diferenças estatísticas), tornando-se uma opção para igualar a cor das faces da madeira desta espécie. No tratamento térmico T1 a queda do parâmetro L* foi de 25,90% em relação à testemunha e os demais tratamentos apresentaram quedas semelhantes em relação à testemunha, ou seja, o primeiro tratamento proporcionou um escurecimento bem proeminente e os tratamentos posteriores a ele praticamente não diferiram em relação ao escurecimento já proporcionado.

Comparando os tratamentos térmicos de ambas as espécies, a madeira de angelim perdeu pigmento a* à 215°C e 20 minutos (T3) e pigmento b* logo no primeiro tratamento, a 180°C (T1). Para a sapucaia o tratamento térmico à 215°C por 40 minutos (T4) promoveu perda significativa do pigmento vermelho (a*) e o pigmento amarelo (b*)

sofreu redução significativa no primeiro ensaio, à 180°C por 20 minutos (T1), como no angelim. Zanuncio et al. (2014) tratou termicamente a madeira de eucalipto e obteve como resultado, diferentemente desse estudo, redução da matriz vermelha (a*) a partir de 140°C e redução da matriz amarelo (b*), a partir de 170°C.

Como os tratamentos estudados remetem a coloração da madeira não tratada ao primeiro quadrante do sistema CIELAB 1976, pode-se considerar a variação do ângulo de cor (h*) entre 0° e 90°, o que significa variação da matiz amarela para a vermelha (LIMA et al., 2013). Observou-se tanto para o angelim quanto para a sapucaia ao longo dos tratamentos térmicos a diminuição no ângulo de tinta (variável h*), confirmando a influência dos tratamentos na tonalidade vermelha, levando ao escurecimento da madeira.

A Tabela 4.9 mostra os valores da variação total de cor (ΔE^*) para as duas espécies em ambas as faces de estudo.

Tabela 4.9. Valores referentes a mudança total de cor (ΔE^*) para as madeiras de angelim e sapucaia nas faces tangencial e radial.

Tratamento	Angelim		Sapucaia	
	Face Tangencial	Face Radial	Face Tangencial	Face Radial
T1	6,86	6,48	15,77	10,96
T2	8,51	7,98	18,53	12,76
T3	17,30	16,73	23,29	21,27
T4	25,32	25,67	30,42	26,40

De acordo com a Tabela de Hikita et al. (2001) citada por Barreto e Pastore (2009) todas as alterações de cor para as duas espécies são consideradas muito apreciáveis (ΔE^* maior que 6,0), reafirmando a capacidade dos tratamentos térmicos em modificar a cor da madeira.

Para a madeira de sapucaia a alteração da cor foi maior para a face tangencial para todos os tratamentos térmicos, enquanto na madeira de angelim as alterações de cor das duas faces permaneceram próximas em todos os tratamentos térmicos. As maiores alterações de cor foram verificadas para os ensaios mais severos, tanto em tempo como em temperatura, tendo a temperatura na madeira de angelim sido mais significativa na alteração de cor que para a madeira de sapucaia. Ferreira (2012) relata que os valores médios de ΔE^* para a madeira de maçaranduba tratada a 180, 200 e 220°C apresentaram diferenças de cor muito apreciáveis para todos os tratamentos, assim como neste estudo.

As Tabelas 4.10 e 4.11 classificam, respectivamente, as madeiras de angelim e sapucaia, após os tratamentos térmicos, considerando a tabela de cores de Camargos e Gonzalez (2001). As Figuras 4.9 e 4.10 ilustram a cor da madeira de angelim e sapucaia, respectivamente, após os tratamento térmicos.

Tabela 4.10. Classificação da cor da madeira de angelim, após cada tratamento térmico estudado.

Tratamento	Angelim	
	Tangencial	Radial
Testemunha	Marrom-avermelhada	Amarelo-amarronzado
T1	Marrom escuro	Marrom escuro
T2	Marrom escuro	Amarelo-amarronzado
T3	Marrom escuro	Marrom escuro
T4	Marrom-arroxeadado	Marrom-arroxeadado

Tabela 4.11. Classificação da cor da madeira de sapucaia após cada tratamento térmico estudado.

Tratamento	Sapucaia	
	Tangencial	Radial
Testemunha	Amarelo amarronzado	Amarelo-alaranjado
T1	Vermelho	Amarelo-amarronzado
T2	Vermelho	Amarelo-amarronzado
T3	Marrom escuro	Vermelho
T4	Marrom-arroxeadado	Marrom escuro

A mudança da cor foi perceptível para os tratamentos térmicos, assim como a diferença entre as faces tangencial e radial para a madeira de sapucaia. Sundqvist (2004) relata que a modificação térmica, dependendo da temperatura dentro de um intervalo de 150-250°C, e do tempo, altera fortemente as propriedades colorimétricas, ao ponto de a madeira tratada tornar-se um material aparentemente distinto. As madeiras estudadas constataram essa afirmação, já que mudaram sua cor completamente em relação ao seu estado natural.

Analisando o efeito do tratamento térmico nos parâmetros colorimétricos nas madeiras de *Robinia pseudoacacia* e *Intsia bijuga*, Varga e Van Der Zee (2008) observaram que a alteração da cor da madeira tratada depende muito da espécie e que quanto mais alta a temperatura e maior a duração do tratamento, maiores são as mudanças na cor da madeira. Os autores descrevem, ainda, que para essas espécies os parâmetros que mais sofreram alteração foram o L* e o b*. Lopes et al. (2014) tratando termicamente a

madeira de teca a 180 e 200°C por 2h30 relatam que, após o tratamento, a madeira teve perda de luminosidade, tornado-se mais escura, e que esse escurecimento se mostrou mais acentuado para o tratamento a 200°C. Del Menezzi et al. (2009) afirmam que a variação colorimétrica deve ser mais afetada por temperatura de tratamento do que pelo tempo.

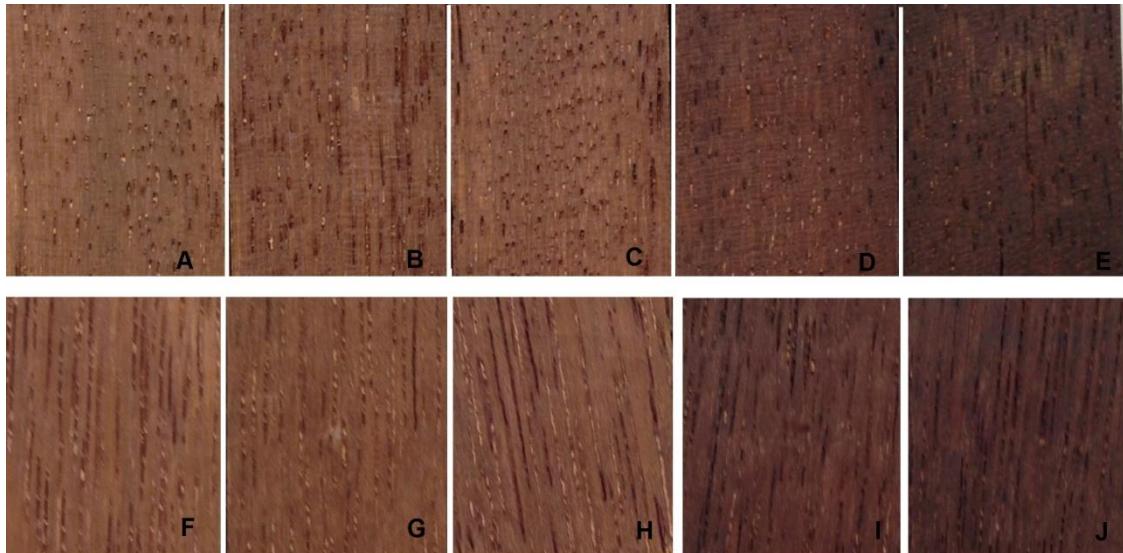


Figura 4.9. Testemunha e tratamentos térmicos da madeira de angelim:

Face tangencial - (A) – Testemunha; (B) – tratamento T1; (C) – Tratamento T2; (D) – Tratamento T3; (E) – Tratamento T4.

Face radial - (F) – Testemunha; (G) – tratamento T1; (H) – Tratamento T2; (I) – Tratamento T3; (J) – Tratamento T4.

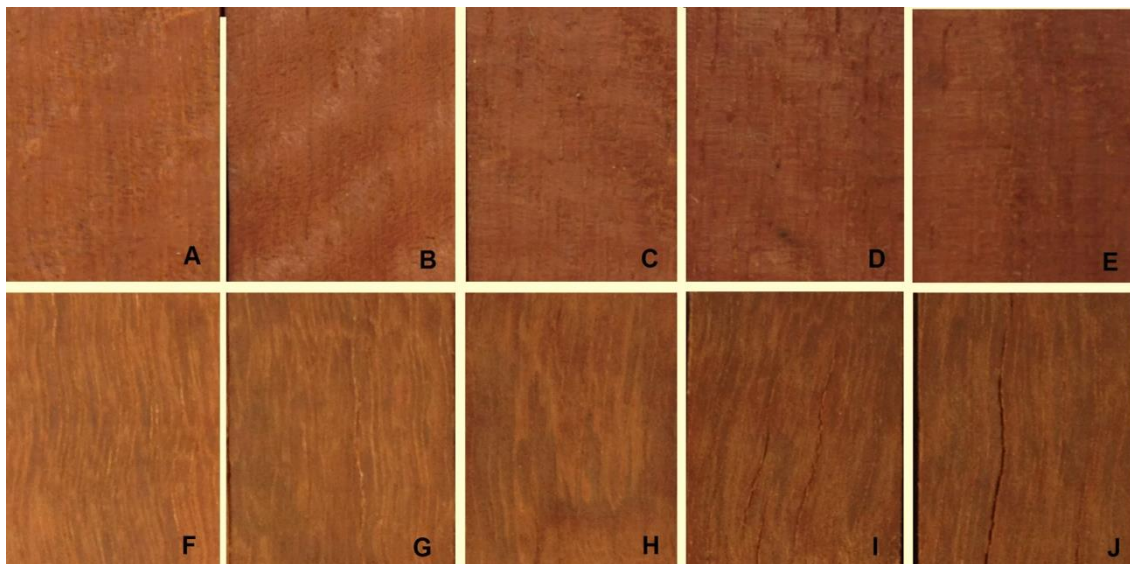


Figura 4.10. Testemunha e tratamentos térmicos da madeira de sapucaia:

Face tangencial - (A) – Testemunha; (B) – tratamento T1; (C) – Tratamento T2; (D) – Tratamento T3; (E) – Tratamento T4.

Face radial - (F) – Testemunha; (G) – tratamento T1; (H) – Tratamento T2; (I) – Tratamento T3; (J) – Tratamento T4.

As assinaturas espectrais das madeiras de angelim e sapucaia para as faces radial e tangencial da madeira para as testemunhas e para as amostras tratadas termicamente são apresentadas nas Figuras 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14. Observa-se que para as duas madeiras, em ambas as faces, os tratamentos promoveram o escurecimento, já que foi verificada uma diminuição da refletância para os tratamentos térmicos. Para as duas madeiras em ambas as faces também foi verificada uma inflexão positiva nas curvas referentes aos tratamentos térmicos acima do comprimento de onda de 620 nm, onde há domínio de cor do vermelho, bem como uma baixa refletância para os comprimentos de onda de 560 a 590 nm, região de domínio da cor amarela, o que caracteriza a coloração mais escura das espécies nessas condições.

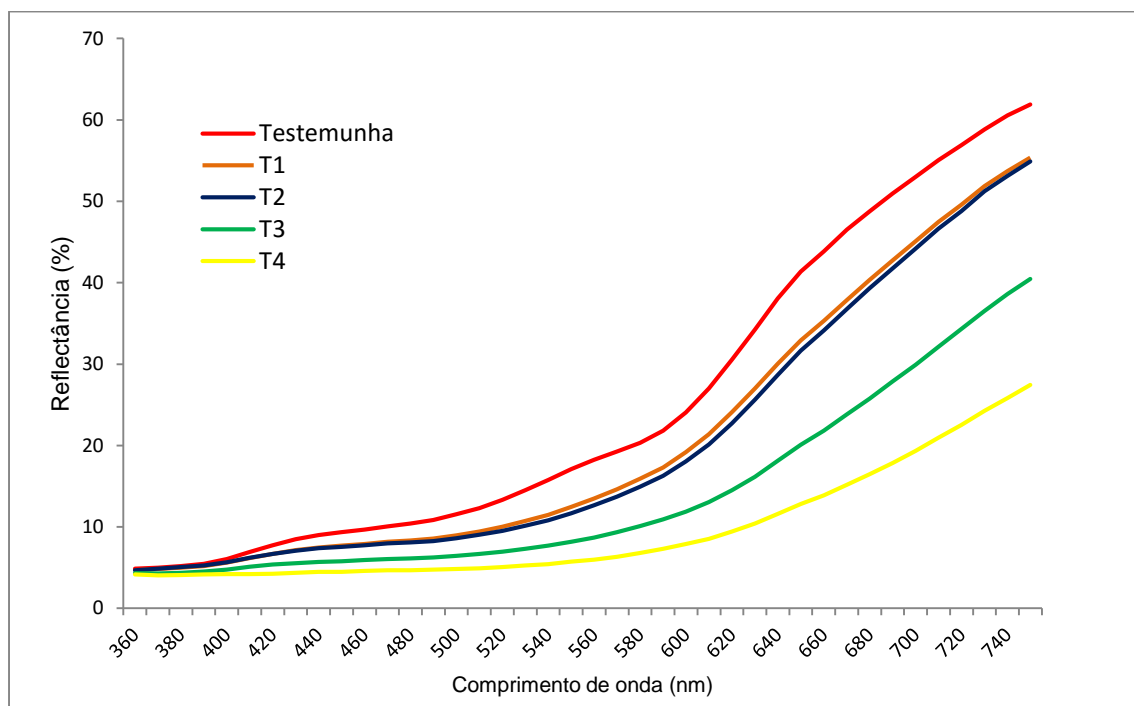


Figura 4.11. Assinatura espectral na região do visível da face tangencial da madeira de angelim não tratada e para os tratamentos térmicos.

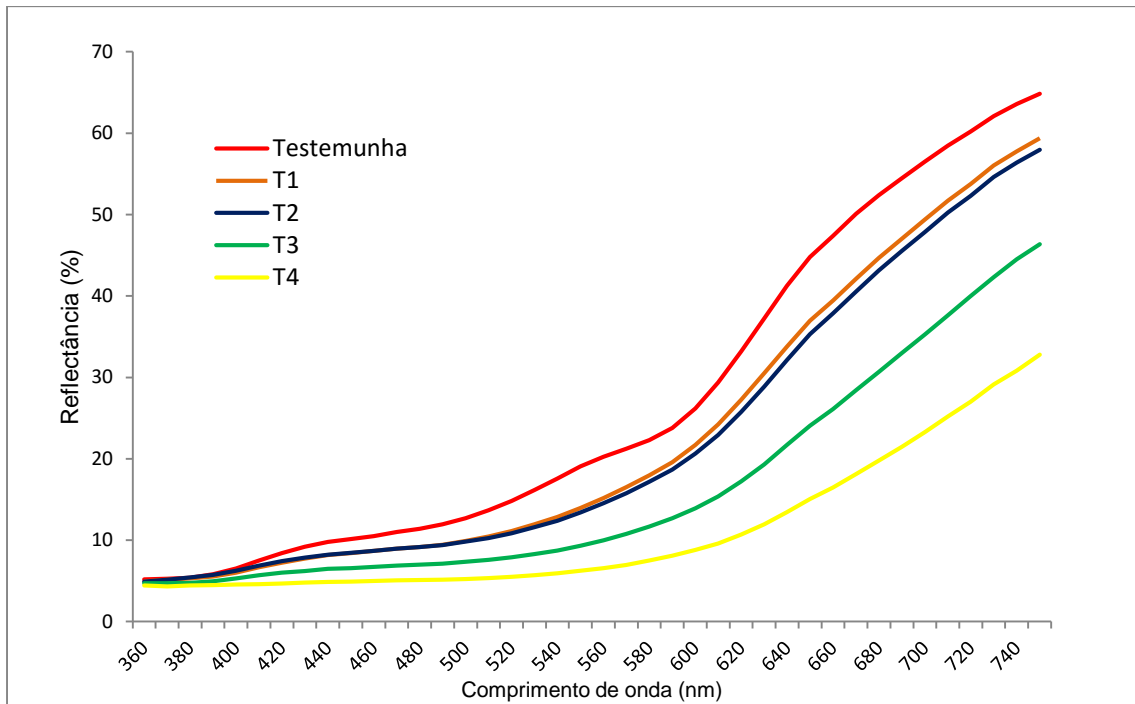


Figura 4.12. Assinatura espectral na região do visível da face radial da madeira de angelim não tratada e para os tratamentos térmicos.

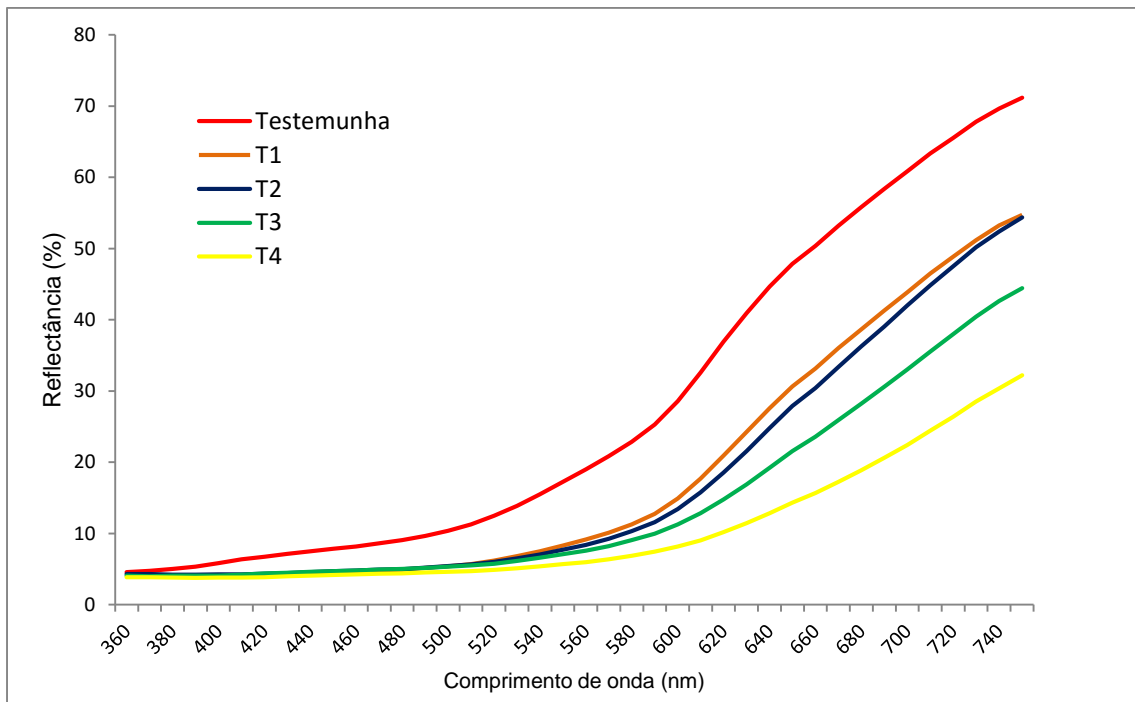


Figura 4.13. Assinatura espectral na região do visível da face tangencial da madeira de sapucaia não tratada e para os tratamentos térmicos.

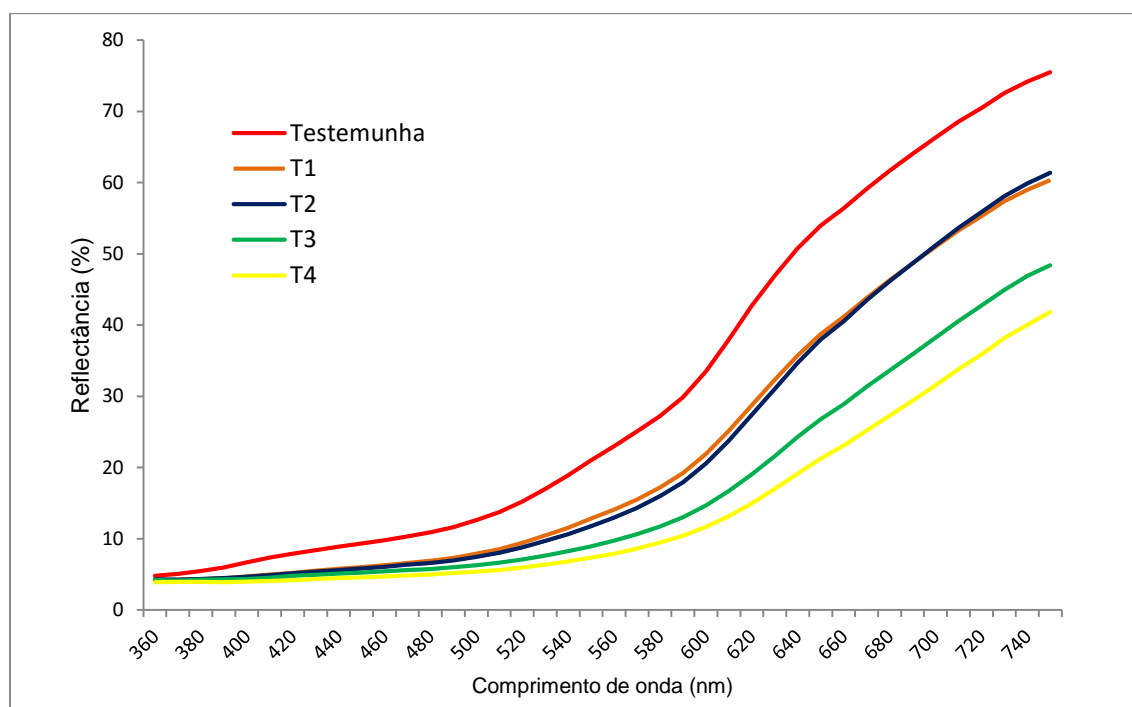


Figura 4.14. Assinatura espectral na região do visível da face radial da madeira de sapucaia não tratada e para os tratamentos térmicos.

4.2 ANÁLISE QUÍMICA

As Tabelas 4.12 e 4.13 e as Figuras 4.15 e 4.16 mostram os valores médios das análises químicas das madeiras tratadas termicamente e não tratadas (testemunhas) das duas espécies em estudo.

Tabela 4.12. Valores médios referentes à análise química da madeira de angelim.

Tratamento	TE(%)	TLIns. (%)	TLSol.(%)	TLT (%)	TCZ (%)	TH (%)
Testemunha	16,95a (0,36)	35,71a (0,28)	1,70a (0,05)	37,41a (0,33)	0,43a (0,01)	62,17a (0,33)
T1	11,83bc (0,37)	38,06b (0,24)	1,60ab (0,05)	39,66b (0,28)	0,41a (0,06)	59,93b (0,28)
T2	12,68b (0,18)	38,21b (0,85)	1,55bc (0,03)	39,76b (0,84)	0,26a (0,03)	59,99b (0,84)
T3	10,95cd (0,77)	39,11b (0,76)	1,48cd (0,05)	40,58b (0,74)	0,34a (0,08)	59,08b (0,74)
T4	9,83d (0,74)	42,32c (0,33)	1,42d (0,05)	43,74c (0,30)	0,36a (0,01)	55,90c (0,30)

Em que: TE = teor de extrativos; TLIns. = teor de lignina insolúvel em ácido; TLSol. = teor de lignina solúvel em ácido; TLT = teor de lignina total; TCZ = teor de cinzas; TH = teor de holocelulose. Os valores entre parênteses são referentes ao desvio padrão. Valores assinalados com letras diferentes para as médias, dentro da mesma coluna, diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

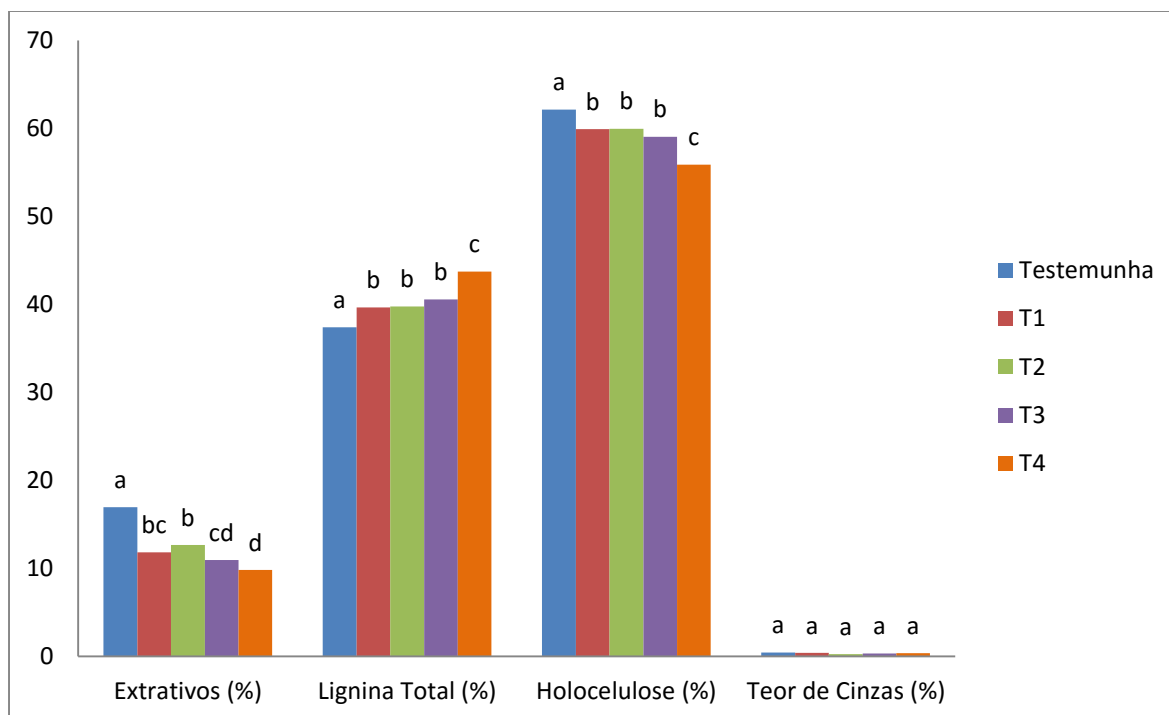


Figura 4.15. Valores médios da composição química da madeira de angelim. As médias com letras iguais, para a mesma variável, não são estatisticamente diferentes entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Tabela 4.13. Valores médios referentes à análise química da madeira de sapucaia.

Tratamento	TE(%)	TLIns. (%)	TLSol.(%)	TLT (%)	TCZ (%)	TH (%)
Testemunha	8,80a (0,35)	37,78a (0,26)	0,59ab (0,09)	38,37a (0,23)	0,66a (0,06)	60,97a (0,24)
T1	4,25b (0,27)	38,11a (0,21)	0,68a (0,06)	38,79a (0,24)	0,65a (0,05)	60,56a (0,24)
T2	5,49c (0,24)	40,98b (0,53)	0,54ab (0,06)	41,52b (0,58)	0,69a (0,05)	57,79b (0,59)
T3	4,61bd (0,23)	41,45b (0,14)	0,56ab (0,04)	42,01b (0,17)	0,69a (0,01)	57,3b (0,17)
T4	5,30cd (0,29)	42,46c (0,13)	0,51b (0,01)	42,97c (0,12)	0,71a (0,01)	56,32c (0,13)

Em que: TE = teor de extrativos; TLIns. = teor de lignina insolúvel em ácido; TLSol. = teor de lignina solúvel em ácido; TLT = teor de lignina total; TCZ = teor de cinzas; TH = teor de holocelulose.

Os valores entre parênteses são referentes ao desvio padrão. Valores assinalados com letras diferentes para as médias, dentro da mesma coluna, diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

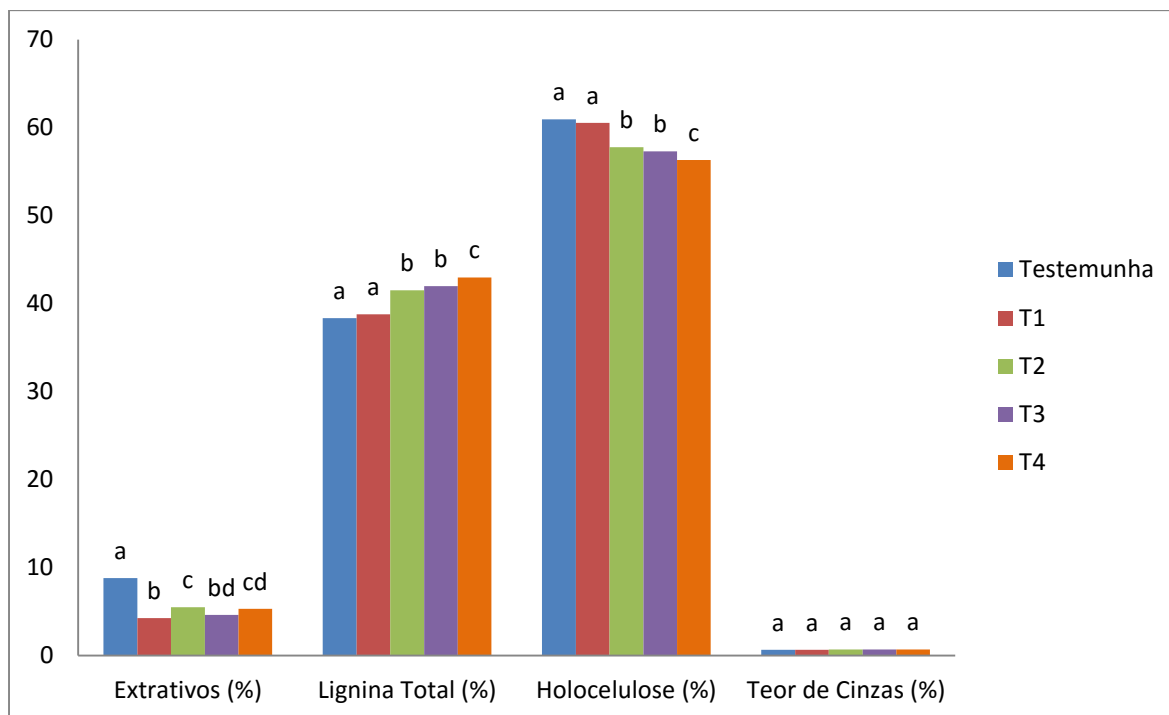


Figura 4.16. Valores médios da composição química da madeira de sapucaia. As médias com letras iguais, para a mesma variável, não são estatisticamente diferentes entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Entre as duas espécies, a madeira de angelim apresenta um maior teor médio de extrativos totais (16,95%), contra 8,80% da madeira de sapucaia. Para os parâmetros teor de lignina insolúvel, lignina total e holocelulose, as duas espécies apresentam valores próximos.

As duas espécies mostraram comportamentos de seus constituintes químicos semelhantes durante os processos de tratamentos térmicos. O teor de extrativos diminuiu com o aumento das temperaturas. A lignina total comporta-se de forma inversa, ou seja, o aumento da temperatura e do tempo leva a um aumento do teor de lignina total, por consequência da diminuição percentual dos demais componentes.

Para a sapucaia, o tratamento T2 promoveu aumento significativo do teor de extrativos em relação ao tratamento T1. Existem relatos na literatura da degradação das hemiceluloses, a partir de 200°C, formando produtos solúveis em álcool/tolueno e desta forma aumentando o teor de extrativos totais (ZANUNCIO et al., 2014; MUSINGUZZI et al., 2012; BARNETO et al., 2011), o que poderia explicar o ocorrido no estudo entre esses tratamentos. A 180°C por 20 minutos perde-se mais extrativos que a 180°C por 40 minutos, indicando que o tempo pode ter influenciado na formação desses produtos solúveis para esta espécie.

A redução das hemiceluloses e de parte da região amorfa da celulose diminui os sítios de absorção de água e grupos hidroxilas, aumentando a estabilidade dimensional da madeira (HILLIS e ROZSA, 1985). As reduções mais significativas de holocelulose acontecem no tratamento T4 para as duas espécies. Isto também ocorre com a estabilidade dimensional, discutida anteriormente.

Para ambas as espécies de madeira o teor de lignina solúvel praticamente permaneceu constante e o aumento da lignina insolúvel e da lignina total a partir de 200°C se dá pela degradação dos outros constituintes, como os extrativos e hemiceluloses (SEVERO et al., 2012), mostrando que a ligninas são mais resistentes à degradação térmica (TUMEN et al., 2010). No estudo, a degradação das hemiceluloses (componente da holocelulose) e dos extrativos é mais significativa a 215°C e 40 minutos, tendo o tempo entre os tratamentos T3 e T4 parecer influenciar nessa diminuição, bem como no aumento da lignina insolúvel e total e na manutenção da lignina solúvel.

Brito et al. (2008) verificaram para o *Eucalyptus grandis* tratado a 180°C por 1 hora aumento do teor de lignina de 27,1% para 35,9%, havendo ainda uma redução no teor de holoceluloses, de 67,9% para 62,17%. Severo et al. (2012) para a madeira de pinus tratada também a 200°C por 4 horas observaram alteração no teor de lignina de 29,18% para 30,40% e de holoceluloses de 67,6% para 65,27%.

No presente estudo as maiores alterações de composição química para a madeira de angelim foram em 215°C de 37,41% para 43,74% para lignina total e de 62,17% para 55,90% para o teor de holoceluloses. Para a madeira de sapucaia tratada a 215°C de 38,37% para 42,97% para a lignina e de 60,97% para 56,32% no teor de holoceluloses. Nota-se que o eucalipto, o angelim e a sapucaia tiveram reduções maiores no teor de holoceluloses e maiores incrementos de lignina em relação ao pinus.

Segundo Pierre et al. (2011), as hemiceluloses das dicotiledôneas são mais sensíveis à degradação térmica, gerando uma maior quantidade de produtos, como furfural. Esta molécula, por sua vez, pode reagir com compostos da lignina fenólica, aumentando o teor de lignina, reações de degradação da celulose podem também, ao mesmo tempo, contribuir para este aumento. Dicotiledôneas possuem unidades de lignina do tipo guaiacil e siringil, enquanto coníferas contém apenas lignina do tipo guaiacil. Ainda segundo este autor, a condensação de unidades siringil ocorre mais facilmente que unidades de guaiacil, o que pode explicar o maior teor de lignina para as dicotiledôneas em relação à conífera

nos estudos relatados, já que a degradação das hemiceluloses no primeiro grupo de árvores (dicotiledôneas) é maior e ainda as coníferas resistem mais à degradação térmica da lignina. Silva (2012) encontrou a mesma relação estudando o tratamento térmico para as madeiras de eucalipto e pinus.

As Tabelas 4.14 e 4.15 mostram as correlações entre as propriedades físicas e análises químicas para as duas espécies estudadas.

Tabela 4.14. Correlação entre os propriedades físicas e as análises químicas para a madeira de angelim.

Correlação	Coefficiente de Correlação	Significância
Db x TE	0,1558	ns
Db x TLT	-0,2329	ns
Db x TH	0,2243	ns
Rt x TE	0,9267	*
Rt x TLT	- 0,9357	*
Rt x TH	0,9284	*
Rr x TE	0,8813	*
Rr x TLT	-0,8238	ns
Rr x TH	0,8090	ns
Rv x TE	0,9311	*
Rv x TLT	-0,9110	*
Rv x TH	0,9002	*

Em que: Db = densidade básica; TE = teor de extrativos; TLT = teor de lignina total; TH = teor de holocelulose; Rt = retratibilidade tangencial; Rr = retratibilidade radial; Rv = retratibilidade volumétrica.

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$); * = significativo ao nível de 5% de significância ($0,01 \leq p < 0,05$); ns = não significativo ($p \geq 0,05$) para o Teste t aos níveis de 1 e 5% de significância.

Tabela 4.15. Correlação entre os parâmetros físicos e as análises químicas para a madeira de sapucaia.

Correlação	Coefficiente de Correlação	Significância
Db x TE	0,9485	*
Db x TLT	-0,5870	ns
Db x TH	0,5850	ns
Rt x TE	0,6312	ns
Rt x TLT	-0,9769	**
Rt x TH	0,9763	**
Rr x TE	-0,3596	ns
Rr x TLT	0,4825	ns
Rr x TH	-0,4823	ns
Rv x TE	0,5284	ns
Rv x TLT	-0,8525	ns
Rv x TH	0,8520	ns

Em que: Db = densidade básica; TE = teor de extrativos; TLT = teor de lignina total; TH = teor de holocelulose; Rt = retratibilidade tangencial; Rr = retratibilidade radial; Rv = retratibilidade volumétrica.

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$); * = significativo ao nível de 5% de significância ($0,01 \leq p < 0,05$); ns = não significativo ($p \geq 0,05$) para o Teste t aos níveis de 1 e 5% de significância.

Para a madeira de angelim, a densidade básica não apresentou correlação significativa para o teor de extrativos, lignina e holocelulose, enquanto a retratibilidade tangencial e volumétrica apresentaram correlação alta e positiva para o teor de extrativos e o teor de holocelulose e negativa para o teor total de lignina. A retratibilidade radial só apresentou correlação significativa para o teor de extrativos. Para a madeira de sapucaia a densidade básica e o teor de extrativos apresentaram correlação significativa e positiva. Já a retratibilidade tangencial apresentou correlação negativa com o teor total de lignina e positiva com o teor de holocelulose.

Vale et al. (2010) analisando a influência da composição química na densidade básica e retratibilidade da madeira observaram que a lignina apresentou correlação positiva e significativa com a densidade básica e não apresentou correlação significativa com a retratibilidade volumétrica. Os autores não encontraram correlações das propriedades físicas com os extrativos da madeira. Brito e Barrichelo (1977) estudando dez espécies de eucalipto não encontraram correlação entre o teor de lignina e a densidade básica. Por outro lado, Trugilho et al. (1996) encontraram correlação negativa entre o teor de lignina e a densidade básica, ao estudar a madeira de *Eucalyptus saligna*.

De maneira geral, madeiras com maior densidade possuem mais compostos que formam a parede celular. Desta forma, quanto maior a densidade da madeira, maior a tendência à retratibilidade. A presença de extrativos, entretanto, pode mascarar esta relação, pois tendem a diminuir o ponto de saturação de fibras (BOWYER et al., 2013).

É fato que os constituintes químicos da madeira têm influência em suas propriedades, no entanto, sua maior ou menor participação depende de cada propriedade e da espécie estudada. Também deve-se alertar que nem sempre é possível observar estas relações devido, geralmente, ao insuficiente número de repetições utilizadas nos estudos químicos da madeira (duplicatas ou triplicatas), dificultando as análises estatísticas. As análises químicas são caras e muitas vezes complexas, exigindo equipamentos nem sempre disponíveis, daí as normas limitarem as suas repetições, o que dificulta as correlações com outras propriedades da madeira e entre estudos. No entanto, mesmo com um número

reduzido de repetições do estudo dos constituintes químicos da madeira, são válidas as tentativas de colocar em evidência estas possíveis correlações com outras propriedades, pois ajudam a compreender o comportamento tecnológico da madeira em seus vários usos (GONÇALEZ, 1993).

As Tabelas 4.16 e 4.17 apresentam para as madeiras de angelim e sapucaia as correlações entre os parâmetros colorimétricos para as duas faces e os parâmetros químicos analisados.

Tabela 4.16. Correlação simples entre os parâmetros colorimétricos e as análises químicas para a madeira de angelim.

Correlação	Coefficiente de Correlação	Significância
L* x TE	0,8780	ns
L* x TLT	-0,9689	**
L* x TH	0,9681	**
a* x TE	0,5768	ns
a* x TLT	-0,8336	ns
a* x TH	0,8401	ns
b* x TE	0,8694	ns
b* x TLT	-0,9621	**
b* x TH	0,9602	**
C x TE	0,8053	ns
C x TLT	-0,9484	*
C x TH	0,949	*
h* x TE	0,9578	*
h* x TLT	-0,9558	*
h* x TH	0,9495	*

Em que: L* = luminosidade; a* = eixo cromático vermelho-verde; b* = eixo cromático amarelo-azul; C = cromaticidade; h* = ângulo de tinta; TE = teor de extrativos; TLT = teor de lignina total; TH = teor de holocelulose;

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$); * = significativo ao nível de 5% de significância ($0,01 \leq p < 0,05$); ns = não significativo ($p \geq 0,05$) para o Teste t aos níveis de 1 e 5% de significância.

Tabela 4.17. Correlação simples entre os parâmetros colorimétricos e as análises químicas para a madeira de sapucaia.

Correlação	Coefficiente de Correlação	Significância
L* x TE	0,8057	ns
L* x TLT	-0,8729	ns
L* x TH	0,8717	ns
a* x TE	0,3292	ns
a* x TLT	-0,8391	ns
a* x TH	0,8394	ns
b* x TE	0,6756	ns
b* x TLT	-0,9246	*
b* x TH	0,9239	*
C x TE	0,5838	ns
C x TLT	-0,918	*
C x TH	0,9175	*
h* x TE	0,858	ns
h* x TLT	-0,8555	ns
h* x TH	0,8541	ns

Em que: L* = luminosidade; a* = eixo cromático vermelho-verde; b* = eixo cromático amarelo-azul; C = cromaticidade; h* = ângulo de tinta; TE = teor de extrativos; TLT = teor de lignina total; TH = teor de holocelulose;

** = significativo ao nível de 1% de significância ($p < 0,01$); * = significativo ao nível de 5% de significância ($0,01 \leq p < 0,05$); ns = não significativo ($p \geq 0,05$) para o Teste t aos níveis de 1 e 5% de significância.

Observando-se as Tabelas 4.16 e 4.17, verifica-se que para a madeira de angelim a claridade, a coordenada b* (coloração amarela), a cromaticidade (C) e o ângulo de tinta (h*) apresentam correlações positivas com o teor de holoceluloses e correlações negativas com o teor total de lignina, enquanto a coordenada a*(coloração vermelha) não apresenta correlação significativa com nenhum parâmetro químico. Desta forma, quanto mais lignina e, conseqüentemente, menos holocelulose, menos amarela e mais escura é a madeira. A madeira de sapucaia apresentou correlações significativas das variáveis b* e C, com teor total de lignina e de holoceluloses.

As variações na cor da madeira dependem de componentes que interagem com a luz dentro do comprimento de onda visível, entre 380 e 780 nm. A lignina possui estruturas moleculares que apresentam grupos cromóforos na madeira abaixo do comprimento de onda de 500nm, e os extrativos fenólicos, como taninos, flavonoides e estilbenos, para comprimentos acima de 500nm, sendo que os extrativos parecem participar menos que a lignina na formação da cor da madeira tratada termicamente. Subprodutos da degradação

das hemiceluloses também podem levar a madeira a uma tonalidade escura, ou seja, redução de sua luminosidade ou claridade. A formação de produtos de oxidação, como as quinonas, também é referida como uma razão para a mudança de cor na madeira tratada com calor (ESTEVEES et al., 2008).

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os tratamentos térmicos não alteraram significativamente a densidade básica das madeiras de angelim vermelho e sapucaia. A perda de massa foi semelhante entre os tratamentos para ambas as espécies, onde a temperatura à 215°C promoveu maior perda de massa.

A retratibilidade volumétrica da madeira de angelim reduziu quando tratada a 215°C por 40 minutos. Para a madeira de sapucaia o coeficiente de anisotropia apresentou redução significativa nos tratamentos a 215°C. Os tratamentos mais severos, T3 e T4, aumentaram a estabilidade dimensional das duas espécies.

O módulo de ruptura e elasticidade à flexão estática não sofreram alteração significativa para as madeiras de angelim e sapucaia tratadas termicamente em relação às testemunhas. Para este estudo, o Stress Wave Timer foi melhor estimador do módulo de elasticidade que o ultrassom.

O tratamento térmico promoveu, para as duas espécies, aproximação da cor entre as faces radial e tangencial, tornando-o uma opção para uniformizar as cores de um lote de madeira;

Os tratamentos térmicos promoveram, para as duas espécies, diminuição da claridade (L^*) e das matizes a^* e b^* , sendo que a coordenada b^* (pigmento amarelo) diminuiu mais expressivamente em todos os tratamentos em relação a coordenada a^* (pigmento vermelho). Para o angelim e para a sapucaia os tratamentos térmicos promoveram o escurecimento e o avermelhamento da madeira, principalmente nos tratamentos com temperaturas mais elevadas e maior duração.

Para a sapucaia, o tratamento a 180°C por 20 minutos provocou intensa modificação da coloração da madeira, podendo este ser o mais recomendado caso o

objetivo principal seja a alteração da cor, representando o tratamento mais econômico entre os estudados;

As análises químicas detectaram redução do teor de extrativos e do teor de holocelulose, bem como aumento do teor de lignina em relação às testemunhas. Para o teor de lignina e de holocelulose as mudanças mais expressivas ocorreram nos ensaios mais severos, a 215°C por 40 minutos.

Recomenda-se, em estudos futuros, testar outras temperaturas e diferentes períodos de tempo. O aperfeiçoamento do equipamento, como por exemplo, a utilização de outras atmosferas, como nitrogênio e o vácuo também é recomendado. A utilização da espectroscopia no infravermelho deverá ser testada como ferramenta de acompanhamento dos tratamentos térmicos da madeira. A determinação química da celulose e hemicelulose separadamente também é recomendada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, P.G.R.; GONÇALEZ, J.C.; CAMARGOS, J.A.A. Propriedades da madeira de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* estimadas por colorimetria. **Revista Cerne**, v. 19, n. 3, p. 461-466, 2013.

AUTRAN, C.; GONÇALEZ, J.C. Caracterização colorimétrica das madeiras de muirapiranga (*Brosimum rubescens* Taub.) e de seringueira (*Hevea brasiliensis*, clone Tjir 16 Müll Arg.) visando à utilização em interiores. **Ciência Florestal**, v. 16, n. 4, p. 445-451, 2006.

BAL, B. C. A Comparative Study of the Physical Properties of Thermally Treated Poplar and Plane Woods. **BioResources**, v. 8, n. 4, p. 6493-6500, 2013.

BARAÚNA, E.P. Tratamento térmico de madeira serrada do angelim pedra (*Dinizia excelsa* Ducke) com boro. **Journal of biotechnology and Biodiversity**. Vol. 2. N.1. Fevereiro, 2011.

BARNETO, A. G.; VILAB, C.; ARIZA, J. Eucalyptus kraft pulp production: Thermogravimetry monitoring. **Thermochimica Acta**, v.520, n.2, p.110-120, 2011.

BARRETO, C.C.K.; PASTORE, T.C.M. Resistência ao intemperismo artificial de quatro madeiras tropicais: o efeito dos extrativos. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.19, n.1, p.23-30, 2009.

BATISTA, D.C.; TOMASELLI, I.; KLIETZKE, R.J. Efeito do tempo e da temperatura de modificação térmica na redução do inchamento máximo da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 533-540, jul.-set, 2011.

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

BORGES, L.M.; QUIRINO, W.F. Higroscopicidade da madeira de *Pinus caribaea* var. hondurensis tratado termicamente. **Biomassa & Energia**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 2, p. 173-182, 2004.

BORREGA, M.; KÄRENLAMPI, P. Mechanical behavior of heat-treated spruce (*Picea abies*) wood at constant moisture content and ambient humidity. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 66, n. 1, p.63-69, 2008.

BOWYER, J.L.; SHMULSKY, R.; HAYGREEN, J.G. **Forest products and wood science**. An Introduction. Blackwell Publishing. New York, 2003.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I. Densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. **IPEF** n.14, p 9-20, 1977.

BRITO, J.O. **Estudo das influências da temperatura, taxa de aquecimento e densidade da madeira de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus citriodora* sobre os resíduos sólidos da pirólise**. 81 f. Tese (Livre Docência) Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz, Piracicaba. 1992.

BRITO, J.O.; GARCIA, J.N.; JÚNIOR, G.B.; PESSOA, A.M.; SILVA, P.H. Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, submetida a diferentes temperaturas de termorreificação. **Revista Cerne**, v. 12, n. 2, p. 182-188, abr./jun. 2006.

BRITO, J. O.; SILVA, F. G.; LEÃO, M. M.; ALMEIDA, G. Chemical composition changes in eucalyptus and pinus woods submitted to heat treatment. **Bioresource Technology**, Essex, v. 99, p. 8545-8548, 2008.

BRUNETTI, M.; CREMONINI, C.; CRIVELLARO, A.; FECI, E.; PALANTI, S.; PIZZO, B.; ZANUTTINI, R. Thermal treatment of hardwood species from Italian plantations: preliminary studies on some effects on technological properties of wood. In: **International scientific conference on hardwood processing**, Québec City. p. 24-26. 2007.

BUCUR V. **Acoustics of Wood**. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer- Verlag; 2006. 298p.

BUCUR, V.; BOHNKE, I. **Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood.** *Ultrasonics*, v. 32, n. 5, p. 385-390, 1994.

CADEMARTORI, P.H.; FRANÇA, R.F.; NISGOSKI, S.; MAGALHÃES, W.L.; MUÑIZ, G.I.. Caracterização anatômica da madeira de *Lecythis pisonis* CAMB. **I Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira (CBCM) III Simpósio de Ciência e Tecnologia do Estado do RJ (SIMADERJ).** Petrópolis, RJ. 2013.

CALEGARI, L. **Uso da onda ultra-sônica como meio de controle do processo de secagem da madeira.** Santa Maria: UFSM, 2006. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, 2006.

CALONEGO, F.W. **Efeito da termorretificação nas propriedades físicas, mecânicas e na resistência a fungos deterioradores da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden.** Tese (Doutor em Agronomia). 149p. Botucatu, 2009.

CAMARGOS, J.A. **Colorimetria quantitativa aplicada na elaboração de uma tabela de cores para madeiras tropicais.** Brasília, 99f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Universidade de Brasília, Brasília, 1999.

CAMARGOS, J.A; GONÇALEZ, J.C. A colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira. **Brasil Florestal**, Nº 71, setembro de 2001.

CHEMICAL ANALYSIS AND TESTING. Laboratory Analytical Procedures (LAP). **LAP 003 - Determination of Acid-Insoluble Lignin in Biomass.** 1995.

CHEMICAL ANALYSIS AND TESTING. Laboratory Analytical Procedures (LAP). **LAP 004 - Determination of Acid-Soluble Lignin in Biomass.** 1996.

CHICHIGNOUD, M., D.; DETIENNE, P.; PARANT, B.; VANTOMME, P. **Atlas de maderas tropicales de America Latina.** Organización Internacional de las Maderas Tropicales/ Centre Technique Forestier Tropical. Nogent-sur-Mame, Yokohama. 1990.

COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. **COPANT 555**: maderas: método de determinación de flexión estática. La Paz, 1972a.

COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. **COPANT 461**: maderas: método de determinación del peso específico aparente. La Paz, 1972b.

COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. **COPANT 462**: maderas: método de determinación de contracción. La Paz, 1972c.

CONTE, B.; MISSIO, A. L.; PERTUZZATTI, A.; CADEMARTORI, P. H.; GATTO, D. A. Propriedades físicas e colorimétricas da madeira termorretrificada de *Pinus elliottii* var. *elliottii*. **Revista Ciencia Forestalis**, Piracicaba, v.42, n.104, p.555-563, dez. 2014.

CORADIN, V.T.R. **Estrutura Anatômica da Madeira e Princípios para a sua Identificação**. 28p. - Brasília: LPF, 2002.

COSTA, F.A. **Efeito do tratamento térmico nas fachadas em madeira de acácia, eucalpto e pinho**. Dissertação (mestrado integrado em engenharia civil). 2013.

D'ALMEIDA, M.L.O.; KOGA, M.E.T.; FERREIRA, D.C.; PIGOZZO, J.B. Composição química da madeira e matérias-primas fibrosas. In: **Celulose**. SENAI, São Paulo, 2013.

D'ALMEIDA, M.L.O. Composição química dos materiais lignocelulósicos. In: **Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. 2 ed. IPT- SENAI, São Paulo, 1988.

DEL MENEZZI, C.H.; SILVEIRA, R.R.; SOUZA, M.R. Estimativa das propriedades de flexão estática de seis espécies de madeiras amazônicas por meio da técnica não-destrutiva de ondas de tensão. **Acta Amazônica**. Vol. 40(2) p.325-332. 2010.

DEL MENEZZI, C. H. S.; TOMASELLI, I.; OKINO, E. Y. A.; TEIXEIRA, D. E.; SANTANA, M. A. E. Thermal modification of consolidated oriented strandboards: effects on dimensional stability, mechanical properties, chemical composition and surface color. **European Journal of Wood and Wood Products**, p. 383-396, 2009.

DOS ANJOS, F.P. **Efeitos da termorreificação nas propriedades físicas de três espécies madeireiras da Amazônia**. 66p. Dissertação (Mestre em ciências florestais). Belém, 2014.

DUNDAR, T. KURT, S.; NUSRET, A.; UYSAL, B.. Nondestructive evaluation of wood strength using thermal conductivity. **BioResources** 7(3). 3306-3316. 2012.

EMBRAPA. **Manual de identificação botânica e anatômica - angelim**. Belém, Pará. 2004.

ESTEVES, B.; DOMINGOS, I.; PEREIRA, H. **Melhoramento tecnológico por modificação térmica de madeiras portuguesas**. Congresso Florestal Nacional, 5º, Viseu, 2005.

ESTEVES, B.; VELEZ MARQUES, A.; DOMINGOS, I.; PEREIRA, H. Heat-induced colour changes of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood. **Wood Science and Technology**, New York, v. 42, n. 5, p.369-384, 2008.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood: chemistry, ultrastructure, reactions**. Berlin: Walter de Gruyter, 1989. 613 p.

FERREIRA, G.C.; GOMES, J.I.; HOPKINS, M.J.G. Estudo anatômico das espécies de Leguminosae comercializadas no estado do Pará como "angelim". **Revista Acta Amazonica**. Vol. 34 (3). 2004.

FERREIRA, L.V. **Aplicação de tratamento térmico para estabilização da madeira de *Manilkara* sp.** (Maçaranduba). Universidade de Brasília. Brasília, 2012.

FOELKEL, C.E.B. **Estrutura da Madeira**. Cenibra. Belo Horizonte. Janeiro, 1977.

FOELKEL, C.E.B.; BRASIL, M.A.M.; BARRICHELO, L.E.G. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, 2/3: 67-74. 1971.

FTA (Finnish Thermowood Association) - **Thermowood handbook**. FIN-00171, p.5-6. Helsinki, FINLAND, 2003.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel. 111 p. 1985.

GARCIA, R.A.; CARVALHO, A.M.; LATORRACA, J.V.F.; MATOS, J.L.M.; SANTOS, W.A.; SILVA, R.F.M. Nondestructive evaluation of heat-treated *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden wood using stress wave method. **Wood Science and Technology**, V.46, N.1-3, p.41-52, 2012.

GONÇALEZ, J.C.; ATAYDE, C.; SOUZA, F.; XAVIER, L.F.; RIBEIRO, P.G.; TELES, R.F. **Apostila Tecnologias alternativas ao Estudo da madeira e derivados**. Universidade de Brasília, 2012.

GONÇALEZ, J.C. **Caracterisation technologique de quatre especes peu connues de la forêt Amazonienne: anatomie, chimie, couleur, propriétés physiques et mécaniques**. 445 f. Thèse (Doctorat en Sciences Forestières) - Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Nancy, France, 1993.

GOUVEIA, F. N. **Aplicação de tratamentos térmicos para estabilização colorimétrica de madeiras tropicais**. 133 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)-Universidade de Brasília, Brasília. 2008.

GRIEBELER, C. G. O. **Colorimetria da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden modificada termicamente**. Dissertação (Mestre em Engenharia Florestal) Curitiba, 2013.

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

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

HILLIS, W. E.; ROZSA, A. N. High temperature and chemical effects on wood stability. **Wood Science and Technology**, New York, v. 19, n. 1, p.57-66, 1985.

IBDF (Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal). **Madeiras da Amazônia, Características e Utilização: Estação experimental de Curuá-Una**. Vol.2. Departamento de Pesquisa e Laboratório de Produtos Florestais, Brasília, DF. 1988, 236p.

IBDF (Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal). **Potencial Madeireiro do Grande Carajás**. Brasília, 134 p. 1983.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). **Catálogo de madeiras brasileiras para a construção civil**. São Paulo. 2013.

KAMDEM, D.P; JERMANNAUD, A. Durability of heat-treated wood. **Holz als Roh- und Werkstoff**. Volume 60, Issue 1, pp 1-6. 2002.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G.I.B.; HERNANDEZ, J.A.; ANDRADE,A.S. **Química da madeira**. 3 ed. Curitiba: FUPEF, 2005. 86p.

KONICA MINOLTA SENSING AMERICAS Inc. Colorimetria: **Como medir diferenças de cor**. konica Minolta Sensing Americas, Inc. 101 Williams Drive Ramsley, 2014.

LARENSTEIN, J.R. **Durability wood**. University of Applied Sciences, Prochoice, Wageningen University. p.69. Netherlands. 2009.

LEITE, E.R.S. Estimation of the dynamic properties of wood from *Copaifera langsdorffii* Desf using resonance analysis. **Revista Cerne**. vol.18.no.1. Lavras. Jan/Mar. 2012.

LEPAGE, E.S. **Manual de preservação de madeiras**. Volume I. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Ciência e Tecnologia do Estado de São Paulo. 1986.

LIMA, C.M.; GONÇALEZ, J.C.; COSTA, T.R.V. PEREIRA, R.S.; LIMA, J.B.M.; LIMA, M.S.A. Comportamento da cor de lâminas de madeira de pau-marfim (*Balfourodendron*

riedelianum) tratada com produtos de acabamento. **Revista Árvore**, Viçosa – MG. 37, n.2, p.377-384, 2013.

LOPES, J.O.; GARCIA, R.A.; LATORRACA, J.V.F.; NASCIMENTO, A.M.. Alteração da cor da madeira de Teca por tratamento térmico. **Revista Floresta e Ambiente**. 21(4):521-534. 2014.

LOPES, J. **Uniformidade e estabilidade da cor da madeira termorretificada de *Tectona grandis* L.f.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Seropédica, RJ, abril de 2012.

LORENZI, H. **Árvores Brasileiras: Manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 4. Ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2002.

MARIMONIO, G.B. **Efeito da densidade e do teor de extrativos na variação da cor da madeira de *Tectona grandis* L.f.** Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica, junho de 2011.

MENEZES, W.M. SANTINI, E.J.; SOUZA, J.T.; GATTO, D.A.; HASELEIN, C.R. Modificação térmica nas propriedades físicas da madeira. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.44, n.6, p.1019-1024, jun, 2014.

MISSIO, A.L. GATTO, D.A.; MODES, K.S.; SANTINI, E.J. STANGERLIN, D.M. CALEGARI, L. Método ultrassônico para estimativa do módulo de elasticidade de madeiras de *Pinus taeda* tratadas termicamente. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.43, n.4, p.616-622, abr, 2013.

MOHEBBY, B.; SANAEI, I. Influences of the hydro-thermal treatment on physical properties of beech wood (*Fagus orientalis*). In: **Annual Meeting Bangalore**. 2005.

MORESCHI, J.C. **Propriedades tecnológicas da madeira**. Curitiba: Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, Setor de Ciências Agrárias/UFPR, 176p. 2010.

MORI, C.L.S.; MORI, F.A.; LIMA, J.T.; TRUGILHO, P.F.; OLIVEIRA, A.C. Influência das características tecnológicas na cor da madeira de eucaliptos. **Ciência Florestal**, 14(2), 123-132. 2004.

MOTTA, J.O.; ALVES, R.C.A.; PAES, J.B. Efeito do tratamento térmico na resistência à flexão estática da madeira de *Tectona grandis* L.F. **Construindo**, Belo Horizonte, v. 5, n. 2, Jul/Dez. 2013.

MOURA, L. F.; BRITO, J. O.; JÚNIOR, G. B. Efeitos da termorretificação na perda de massa e propriedades mecânicas de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* VAR. hondurensis. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 2, p.305-314, 2012.

MUSINGUZZI, W. B. OKURE, M.A.; WANG, L.; SEBBIT, A.; LOVAS, T. Thermal characterization of Uganda's *Acacia hockii*, *Combretum molle*, *Eucalyptus grandis* and *Terminalia glaucescens* for gasification. **Biomass and Bioenergy**, v.46, p.402-408, 2012.

NASCIMENTO, C.C. GARCIA, J.N.; DIÁZ, M.P. Agrupamento de espécies madeireiras da amazônia em função da densidade básica e propriedades mecânicas. **Madera y Bosques** 3(1), 1997.

NOCK, H. P; RICHTER, H. G.; BURGER, L. M. **Tecnologia da madeira**. Curitiba: Departamento de Engenharia e Tecnologia Rurais, Universidade Federal do Paraná, 216 p. 1975.

NOGUEIRA, M.; BALLARIN, A.W. Sensibilidade dos ensaios de ultra-som à ortotropia elástica da madeira. In: **CONFERÊNCIA PAN-AMERICANA DE ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS**, 2003, Rio de Janeiro. Anais: ABENDE, 2003.

OLIVEIRA, F.G.R.; CANDIAN, M.; LUCCHETTE, F.F.; CALIL Jr., C.; SALES, A. Avaliação de propriedades mecânicas de madeira por meio de ultra-som. In: **PAN AMERICAN CONFERENCE FOR NONDESTRUCTIVE TESTING**, 3. Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: Pan American Conference for Nondestructive Testing, 5p. 2003.

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

PASTORE, T.C.M. **Estudos do efeito da radiação ultravioleta em madeiras por espectroscopias Raman (FT-Raman), de refletância difusa no infravermelho (DRIFT) e no visível (CIE-L*a*b*)**. 117f. Tese (Doutorado em Química Analítica e Inorgânica) – Universidade de Brasília, 2004.

PELLERIN, R. F.; ROSS, J. R. **Nondestructive evaluation of wood**. Madison: USDA, Forest Service, 2002.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 224p. 2003.

PHILIPP, P; D'ALMEIDA, M.L. **Celulose e Papel. Volume I. Tecnologia de fabricação de pasta celulósica**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - Centro técnico em celulose e papel. São Paulo, 1988.

PIERRE, F.; ALMEIDA, G.; BRITO, J.O.; PERRÉ, P. Influence of torrefaction on some chemical and energy properties of Maritime pine and Pedunculate oak. **Bioresources**, n.6, v.2, p.1204-1218. 2011.

POUBEL, D.S.; GARCIA, R.A.; SANTOS, W.A.; OLIVEIRA, G.L.; ABREU, H.S. Efeito da termorreificação nas propriedades físicas e químicas da madeira de *Pinus caribaea*. **Revista Cerne**, vol.19 no.3 Lavras July/Sept. 2013.

POTULSKI, D. C.; **Densidade e Retratibilidade da madeira juvenil de *Pinus maximinoi* H. E. Moore E *Pinus taeda* L.** Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

REZENDE, M.A.; ESCOBEDO, J.F. Retratibilidade volumétrica e densidade aparente da madeira em função da umidade. **IPEF**, Piracicaba, SP, n.39, p.33-40, ago.1988.

RIBEIRO, P. G. **Utilização de técnicas não destrutivas para caracterização de madeiras de *Pinus caribaea* Var. *hondurensis* e de *Eucalyptus grandis*.** 2009. 114 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

RODRIGUES, T.O. **Efeitos da torrefação no condicionamento de biomassa para fins energéticos.** Dissertação (Mestrado em ciências florestais). Universidade de Brasília. Brasília, 2009.

ROSS, R.J.; HUNT, M.O. **Stress Wave Timing nondestructive evaluation tools for inspecting historic structures: a guide for use and interpretation.** United States Department of Agriculture. Forest Products Laboratory, 2000.

ROWELL, R.M. **Wood chemistry and wood composites.** Boca Raton: CRC Press, 473p. 2005.

SALES, A.; PELIZAN, T. R.; OLIVEIRA, F. G. R.; CANDIAN, M.; LUCCHETTE, F. F.; SALGON, J. L.; MILLER, K. P. Avaliação de propriedades mecânicas de peças roliças de Eucalipto por meio de ultrassom. In: **ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA**, 9., Cuiabá, 2004.

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

SEVERO, E. T. D.; CALONEGO, F. W.; SANSÍGOLO, C. A. Physical and chemical changes in juvenile and mature woods of *Pinus elliottii* var. *elliottii* by thermal modification. **European Journal of Wood Production**, v.70, n.5, p.741-747, 2012.

SILVA, D.M.R. **Avaliação das propriedades físicas e da elasticidade da madeira de *Tectona grandis* L.f proveniente de povoamento com três densidades de plantio em Cáceres - MT.** Universidade Rural do Rio de Janeiro, Seropédica - RJ. Julho, 2010.

SILVA, M.R. **Efeito do tratamento térmico nas propriedades químicas, físicas e mecânicas em elementos estruturais de *Eucalypto citriodora* e *Pinus Taeda***. 223p. Tese (Doutor em Ciências. Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil. 2012.

SJÖSTRÖM, E. **Wood chemistry: fundamentals and applications**. 2 ed. San Diego: Academic Press, 1993, 293p.

SOUZA, M.H.; MAGLIANO, M.M.; CAMARGOS, J.A.A. **Madeiras Tropicais Brasileiras**. IBAMA/Laboratório de Produtos. Florestais, Brasília. 152p. 1997.

STAMM, A.J.; BURR, H.K; KLINE, A.A. Heat Stabilized wood (Staybwood) **Forest Products Laboratory** (U.S), 1946.

STANGERLIN, D.M.; GATTO, D.A.; MELO, R.R.; CALEGARI, L.; VIVIAN, M.A.; CASTELO, P.A. Uso do ultrassom para estimativa das propriedades mecânicas da madeira de *Peltophorum dubium*. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 01, n. 02, p. 44-53, Novembro de 2010.

SHIMOYAMA, V.R. **Estimativas de propriedades da madeira de *Pinus taeda* através do método não destrutivo de emissão de ondas de tensão, virando a geração de produtos de alto valor agregado**. Doutorado (Tese). Universidade Federal do Paraná. 2005.

SUNDQVIST, B. Color **Changes and Acid Formation in Wood During Heating**.154 p. Tese (Doutorado) - Division of Wood Material Science, Lulea University of Technology, Skelleftea, Sweden, 2004.

SURINI, T.; CHARRIER, F.; MALVESTIO, J.; CHARRIER, B.; MOUBARIK, A.; CASTÉRA, P.; GRELIER, S. Physical properties and termite durability of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) heat-treated under vacuum pressure. **Wood Science and Technology**, New York, v. 46, n. 1, p.487-501, 2012.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant Physiology**, Sinauer Assoc. Inc. Publ. Sunderland, Mass: p690, 2002.

TAKATSUI, F. **Sistema CIE Lab: análise computacional de fotografias**. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Odontologia de Araraquara, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/89626>>.

TAKESHITA, S; JANKOWSKY, I.P. Redução na movimentação dimensional da madeira de Jatobá (*Hymenaea sp.*) e Muiracatiara (*Astronium sp.*) submetidas a tratamento térmico adicional. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 106, p. 345-352, jun.2015.

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T 204 om-88: solvent extractives of wood and pulp**. Atlanta: Tappi Technology Park, 1996. v.1.

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T 211 om-93: Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C**. Atlanta: Tappi Technology Park, 1996. v.1.

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T 264 om-88: preparation of wood for chemical analysis**. Atlanta: Tappi. Technology Park, 1996. v.1.

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T 257 cm-85: sampling and preparing wood for analysis**. Atlanta: Tappi Technology Park, 1996. v.1.

TJEERDSMA, B.F; MILITZ, H. Chemical changes im hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. **Holz als Roh- und Werkstoff**. Volume 63, Issue 2, pp 102-111. 2005.

TRUGILHO, P.F.; LIMA, J.T.; MENDES, L.M. Influência da idade das características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Revista Cerne**, v.2, n.1. 1996.

TUMEN, I. AYDEMIR, D.; GONDUZ, G.; UNER, B.; CETIN, H. Changes in the chemical structure of thermally treated wood. **Bioresources**, v.5, n.3, p.1936-1944, 2010.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). Wood Handbook: **Wood as Engineering material**. USDA: Washington, 509p. 2010.

VALE, A.T.; DIAS, I.S.; SANTANA, M.A.E. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 137-145, jan.-mar, 2010.

VARGA, D. VAN DER ZEE, M.E. Influence of steaming on selected wood properties of four hardwoods species. **Holz as Roh und Werkstoff**, 2008.

VERNOIS, M. **Heat treatment of wood in France – stat of the art**. Paris: Centre Technique du Bois et de l'Ameublement, 2000.

VOVELLE, C.; MELLOOTTEE, H. **Modelisation de la pyrolyse oxydante ou noxydante de bois ou de déchets végétaux à partir de leurs composants**. In: PALZ, W.; CHARTIER, P. (Eds.). Energy from biomass. 2. ed. London: Applied Sciences, p. 925-929. 1982.

XAVIER, G. **Influência de tratamentos térmicos em duas propriedades mecânicas das madeiras de *Pinus* sp. e *Eucalyptus urograndis***. Universidade de Brasília. 2013.

WEILAND, J.J.; GUYONNET, R. Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy. **Holz als Roh-und Werkstoff**. 61(3):216-220. 2003.

WINANDY, J. E.; ROWELL, R. M. **Chemistry of wood strength. Handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton FL: CRC Press LLC: 303-347, 2005.

ZANUNCIO, A.J.V. NOBRE, J.R.; MOTTA, J.P.; TRUGILHO, P.F. Química e colorimetria da madeira de *Eucalyptus grandis* W.Mill ex Maiden termorretificada. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.38, n.4, p.765-770, 2014.

ZHANG, Ya Mei; YU, Yang Lun; YU, Wen Ji. Effect of thermal treatment on the physical and mechanical properties of *Phyllostachys pubescens* bamboo. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 71, n. 1, p. 61-67, 2013