



**PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE *Tectona grandis*
PROVENIENTE DE SÍTIOS DISTINTOS**

ROBERTA SANTOS SOUZA

**TESE DE DOUTORADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UNB**

2019

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE *Tectona grandis*
PROVENIENTE DE SÍTIOS DISTINTOS**

**ROBERTA SANTOS SOUZA
ORIENTADOR: DR° JOAQUIM CARLOS GONÇALEZ**

TESE DE DOUTORADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**Brasília
2019**

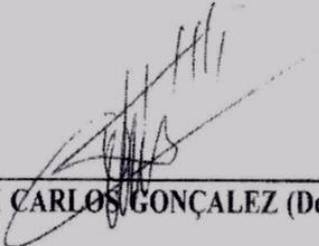
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

“PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE *Tectona grandis* PROVENIENTE
DE SÍTIOS DISTINTOS”

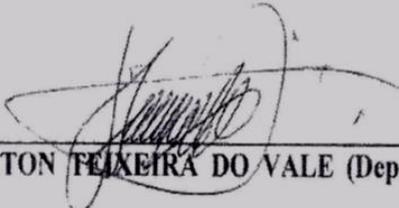
ROBERTA SANTOS SOUZA

TESE DE DOUTORADO ACADÊMICO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL, DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

APROVADA POR:



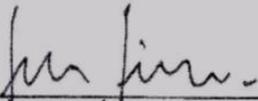
Prof. Dr. JOAQUIM CARLOS GONÇALEZ (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB);
(Orientador)



Prof. Dr. AILTON FÉLIXEIRA DO VALE (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB);
(Examinador Interno)



Prof. Dr. DIVINO ETERNO TEIXEIRA (Serviço Florestal Brasileiro – SFB);
(Examinador Externo)



Prof. Dr. JOSÉ TARCÍSIO LIMA (Universidade Federal de Lavras – UFLA);
(Examinador Externo)

FICHA CATALOGRÁFICA

SSO7299p SOUZA, ROBERTA SANTOS

PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE *Tectona grandis* PROVENIENTE DE SÍTIOS DISTINTOS/ ROBERTA SANTOS SOUZA; Orientador: JOAQUIM CARLOS GONÇALEZ. – Brasília, 2019. 167p.

Tese (Doutorado - Doutorado em Ciências Florestais) - - Universidade de Brasília, 2019.

1. Teca. 2. Sítios. 3. Anatomia. Colorimentria. 4. Propriedades. 5. Nir, propagação de ondas. I. Gonzalez, Joaquim Carlos. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUZA, R.S. (2019). Propriedades Tecnológicas de *Tectona grandis* Proveniente de Sítios Distintos. Tese de Doutorado em Ciências Florestais. Publicação PPGEFL, TD. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 167p.

CESSÃO DE DIREITOS

Autor: Roberta Santos Souza

Título: Propriedades Tecnológicas de *Tectona grandis* Proveniente de Sítios Distintos.

Grau: Doutor (a) Ano: 2019.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestá-las somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Roberta Santos Souza
Email:robertasantoz@gmail.com

AGRADECIMENTOS

A Deus;

Aos meus pais, Roberto Oliveira e Luzinete Altamira, a minha irmã Renata pela paciência, incentivo e apoio para a realização de mais esta etapa na minha vida;

À Universidade de Brasília, ao Departamento de Engenharia Florestal e ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Florestais;

De modo especial, ao meu orientador: prof. Dr. Joaquim Carlos Gonzalez, pela orientação, conselho, incentivo, compreensão, confiança, paciência e sobre tudo, pela amizade, sou muito grata por tudo;

À Universidade Federal de Mato Grosso, ao Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia, em especial a prof^a Dr. Oscarlina Lúcia dos Santos Weber pela concessão do laboratório para as análises de solo, bem como ao prof. José Fernando Scaramuzza, agradeço a ambos pela atenção, disposição e paciência;

Ao Serviço Florestal Brasileiro (SFB), por conceder o uso dos laboratórios, em especial aos servidores desta instituição na colaboração da execução deste projeto nos setores de Anatomia e Morfologia ao Alexandre Bahia, Elisa e Juliana Rodrigues, no setor de Química ao Dr. Alessandro Moreira, Francisco Lopes, Dr. Tereza Cristina Pastore, a Debora, na Engenharia e Física ao Divino Eterno e sr. João e na Marcenaria ao Ricardo e de sua equipe.

Ao Instituto Federal de Mato Grosso (IFMT) – Campus Cáceres, em especial ao prof. Felipe Neto, as empresas Teca do Brasil e a Re flora, pelo fornecimento da madeira de Teca;

À comadre Edilene Ribeiro pela amizade, pelo incentivo e companheirismo por toda esta trajetória da graduação, mestrado e doutorado;

Ao Programa de Capacitação de Profissionais de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro no fornecimento de bolsa de pesquisa;

Aos colegas de Pós-Graduação: Clarissa Melo Lima, Joabel Raabe, Marco Bruno, Marcella de Paula e Robert Mesquita;

A Loyane Fernando da Silva, estagiária do laboratório, nos ensaios para a determinação das propriedades mecânicas;

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para realização deste trabalho.

RESUMO

PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE *Tectona grandis* PROVENIENTE DE SÍTIOS DISTINTOS

Autor: **Roberta Santos Souza**

Orientador: **DR° Joaquim Carlos Gonzalez**

Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais

Brasília, fevereiro de 2019.

O presente estudo tem como objetivo determinar propriedades físicas, mecânicas, anatômicas e químicas da madeira de teca (*Tectona grandis*), provenientes de três sítios distintos do Estado do Mato Grosso, considerando as qualidades dos sítios, caracterizando tecnologicamente as madeiras provenientes de três sítios distintos, através de técnicas destrutivas e não destrutivas: análise de imagens (macroscopia, microscopia e medição de fibras), flexão estática (MOR e MOE), colorimetria, técnicas acústicas (ondas ultrassônicas e ondas de tensão) e técnica óptica (espectroscopia no infravermelho próximo). O efeito do tipo de clima, a precipitação e a qualidade do sítio onde estão estabelecidos os plantios de Teca produzem variações significativas nos parâmetros das fibras e nos raios. No entanto não foram evidenciadas mudanças significativas relacionadas aos vasos. Os parâmetros colorimétricos não sofreram influências das características dos sítios, apresentando a mesma coloração marrom-oliva para a madeira. Os constituintes químicos variaram entre os sítios. A densidade básica, as retratilidades e coeficiente de anisotropia sofreram influência da idade, espaçamento, índice pluviométrico e dos tratamentos silviculturais. A densidade aparente (12% de teor de umidade), o módulo de elasticidade estático, o módulo de ruptura e os módulos de elasticidades dinâmicos (ondas de tensão e ultrassônicas) sugerem que estas são mais influenciadas pela idade e pelo espaçamento nos sítios estudados. As ondas de tensão mostram-se mais adequadas para estimar o módulo de elasticidade em relação às ondas ultrassônicas. A técnica do infravermelho próximo (NIR) e a obtenção dos espectros na face radial da madeira de teca mostrou ser eficiente para predição do comprimento das fibras, densidade aparente e para o módulo de elasticidade.

Palavras Chaves: teca, sítios, anatomia, colorimetria, propriedades, NIR, propagação de ondas.

ABSTRACT**TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF *Tectona grandis* FROM DIFFERENT SITES**Author: **Roberta Santos Souza**Advisor: **Joaquim Carlos Gonçalves****Post-graduate Program on Forest Science****Brasília, february of 2019.**

The present study aims to determine the physical, mechanical, anatomical and chemical properties of teak (*Tectona grandis*) from three different sites of the State of Mato Grosso, considering the qualities of the sites, technologically characterizing wood from three sites (macroscopy, microscopy and fiber measurement), static bending (MOR and MOE), colorimetry, acoustic techniques (ultrasound waves and tension waves) and optical technique (infrared spectroscopy). The effect of the type of climate, precipitation and the quality of the site where the teak plantations are established, produced significant variations in the parameters of the fibers and rays. However, no significant vessel-related changes were observed. The colorimetric parameters were not affected by the characteristics of the sites, presenting the same brown coloration for the wood. Chemical constituents varied among sites. The basic density, retractibilities and coefficient of anisotropy were influenced by age, spacing, raining index and silvicultural treatments. The apparent density (12% moisture content), the static modulus of elasticity, the modulus of rupture, and the dynamic elastic moduli (stress waves and ultrasound waves) suggest that these are more influenced by age and spacing at the sites studied. *Stress waves* are more adequate to estimate the modulus of elasticity in relation to ultrasound waves. The near infrared (NIR) technique and the obtaining of the spectra in the radial face of the teak wood showed to be efficient for fiber length prediction, apparent density and for the modulus of elasticity.

Key words: teak, sites, anatomy, colorimetry, properties, NIR, wave propagation.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	OBJETIVO GERAL.....	3
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
2.3	HIPÓTESE	4
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	5
3.1	<i>Tectona grandis</i>.....	5
3.2	Caracterização Anatômica e Colorimetria.....	8
3.2.1	Anatomia.....	8
3.2.2	Análise de imagem	9
3.2.3	Colorimetria	10
3.3	Propriedades Químicas da Madeira.....	15
3.3.1	Celulose.....	16
3.3.2	Hemicelulose	17
3.3.3	Lignina	18
3.3.4	Extrativos.....	20
3.3.5	Cinzas.....	20
3.4	Propriedades Físicas e Mecânicas	21
3.4.1	Densidade.....	22
3.4.2	Retratibilidade.....	23
3.5	Métodos Mecânicos - Módulo de Elasticidade e Módulo de Ruptura	25
3.6	Técnicas de Avaliação Não Destrutiva e Destrutivas da Madeira	28
3.6.1	Técnicas de tensão/ acústicas.....	29
3.7	Espectroscopia no Infravermelho Próximo nom Transformada de Fourier (FT-NIR).....	32

3.7.1	Espectroscopia NIR aplicada à indústria de base florestal	32
3.7.2	Espectroscopia	33
3.7.3	Espectroscopia na região do infravermelho próximo (NIRS ou NIR)	34
3.7.4	Quimiometria	35
3.8	ANÁLISE MULTIVARIADA	36
3.8.1	Pré tratamento espectral.....	36
3.8.2	Métodos de regressão por mínimos quadrados parciais (PLS)	38
3.8.3	Calibração e validação	39
4	MATERIAL E MÉTODOS	40
4.1	Localização das Áreas de Estudo.....	40
4.2	Caracterização dos Sítios dos Plantios Amostrados.....	41
4.2.1	Caracterização do sítio I – Alta Floresta	41
4.2.2	Caracterização sítio II – Cáceres.....	42
4.2.3	Caracterização sítio III – Nossa Senhora do Livramento	45
4.3	Amostragem das Árvores e Preparo dos Corpos de Prova	47
4.4	CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DA MADEIRA	49
4.4.1	Análise de Imagens	49
4.4.2	Colorimetria	52
4.4.3	Análises químicas.....	53
4.4.4	Propriedades físicas da madeira	57
4.4.5	Propriedades mecânicas da madeira	60
4.4.6	Ensaio acústico/ tensão	61
4.4.7	ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO.....	63
4.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA	65
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
5.5	Análise de Imagem.....	67
5.5.1	Descrição macroscópica e microscópica da espécie <i>Tectona grandis</i>	67

5.5.2	Análise colorimétrica.....	74
5.6	Propriedades Químicas de <i>Tectona grandis</i>.....	80
5.7	Propriedades Físicas (Densidade Básica e Retratibilidade).....	83
5.7.1	Correlação entre a densidade básica (DB), retratibilidade radial (Rd), tangencial (Tg), volumétrica (Rv) e coeficiente de anisotropia (CoA) para <i>Tectona grandis</i>	85
5.8	Propriedades Mecânicas (Módulo de Elasticidade (MOE) e Módulo de Ruptura (MOR) e Módulo de Elasticidade Dinâmico (ondas de tensão e ultrassoras).....	88
5.8.1	Correlação entre a densidade, MOE e MOR e MOEds, para os sítios estudados.	93
5.8.2	Correlação entre a densidade, MOR e MOE e MOEdu para os sítios estudados.	95
5.8.3	Correlação entre as propriedades físicas, mecânicas e químicas com os parâmetros colorimétricos.	97
5.9	Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIRS) para Madeira de teca dos Sítios Estudados - Face Radial.....	101
5.9.1	Espectros na madeira (estudos preliminares dos espectros)	101
5.9.2	Análise de componentes principais	105
5.9.3	Calibração e validação para o comprimento de fibra	107
5.9.4	Calibração e validação da densidade a 12% de umidade	112
5.9.5	Calibração e validação para o módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura da madeira (MOR) da madeira de teca para os sítios estudados.	117
6	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	125
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Indicação da qualidade e do uso da madeira, em função do coeficiente de anisotropia.....	24
Tabela 2 - Valores médios do comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede de fibras, comprimento dos vasos, diâmetro dos vasos, altura, largura e frequência dos raios da madeira de <i>Tectona grandis</i> , dos três sítios estudados.	70
Tabela 3 - Valores médios dos parâmetros colorimétricos e classificação da cor de <i>Tectona grandis</i> proveniente de sítios distintos.....	74
Tabela 4 - Valores médios dos parâmetros colorimétricos para as faces Tangencial e Radial para a <i>Tectona grandis</i> , dos diferentes sítios de estudo.	76
Tabela 5 - Valores médios das análises química da madeira de <i>Tectona grandis</i> , proveniente de três sítios distintos.	80
Tabela 6 - Valores médios para a densidade básica e retratibilidades da madeira de <i>Tectona grandis</i> nos diferentes sítios de estudo.	83
Tabela 7 - Correlação entre a Densidade Básica (DB). Retratibiliades (Rr, Rt, Rv) e Coeficiente de Anisotropia (CoA) para a madeira de <i>Tectona grandis</i> proveniente de sítios distintos.....	86
Tabela 8 - Valores médios para a densidade (12%), módulo de elasticidade estático (MOE), módulo de ruptura, (MOR), Módulo de elasticidade dinâmico por Stress Wave (MOEds) e Módulo de elasticidade dinâmico por Ultrassom (MOEdu). Velocidade de propagação de onda por <i>stress wave</i> (Vels) e a velocidade de propagação de onda por ultrassom (Velu) para a <i>Tectona grandis</i> proveniente de sítios distintos.	88
Tabela 9 - Correlação de Pearson entre densidade, flexão estática e stress wave para <i>Tectona grandis</i> proveniente dos sítios distintos.....	93
Tabela 10 - Correlação de Person entre a densidade, flexão estática e ultrassom para <i>Tectona grandis</i> proveniente de sítios distintos.....	95

Tabela 11 - Correlação de Pearson entre os parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C , h^*) e propriedades físicas e mecânicas da madeira de <i>Tectona grandis</i> proveniente de sítios distintos.....	97
Tabela 12 - Correlação de Pearson entre os parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C , h^*) e as propriedades químicas da madeira de <i>Tectona grandis</i> proveniente de sítios distintos.	99
Tabela 13 - Porcentagem de variância (var) e porcentagem de variância acumulada (vac.) para a análise de PCA da Teca proveniente de três sítios distintos.....	106
Tabela 14 - Calibrações e validações para a estimativa do comprimento de fibra da madeira de <i>Tectona grandis</i> proveniente de sítios distintos, predito por NIR.....	107
Tabela 15- Calibração e validação para a estimativa da densidade a 12% da madeira de <i>Tectona grandis</i> , proveniente de três sítios distintos, predito por NIR.....	112
Tabela 16- Calibração e validação para o módulo de elasticidade em flexão estática da madeira de <i>Tectona grandis</i> proveniente de três sítios distintos, predito por NIR.	117
Tabela 17 - Calibração e validação módulo de ruptura (MOR) em flexão estática da madeira de <i>Tectona grandis</i> proveniente de três sítios distintos, predito por NIR...	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Plantio de <i>Tectona grandis</i> no município de Alta Floresta- MT (A); Folhas e Frutos (B e C) e madeira bruta (D) de teca.....	6
Figura 2 - Fotografia do sistema informatizado de medição de comprimento de fibra utilizado pela Universidade de Alberta em 1982 (MICKO et al. 1982); A - unidade de projeção (Tektronix 4956), B - painel gráfico; C – cursor; D - controlador do painel gráfico (Tektronix 4).....	9
Figura 3 - Espaço de cor tridimensional do sistema CIE-L*a*b. A variável L* representa a luminosidade. As coordenadas a* e b* concedem a cor das medições (coordenadas cromáticas) (JOHANSSON, 2005).....	11
Figura 4 - Estrutura química da celobiose (Rowell et al. 2005).	16
Figura 5 - Estrutura da hemicelulose (LAINE, 2005).	18
Figura 6 - Estruturas químicas de precursores de lignina: (1) álcool cumarílico, (2) álcool coniferílico e (3) álcool sinapílico (ROWELL et al., 2005).	19
Figura 7 - Teste de flexão com carregamento no ponto central.	26
Figura 8 - Espectro da radiação eletromagnética mostrando a região do visível e a região do infravermelho.....	33
Figura 9 - Esquema de espectrofotômetro de reflectância.	34
Figura 10 - Representação esquemática da decomposição por PCA.	37
Figura 11 - Localização das áreas de estudo no Estado do Mato Grosso.	40
Figura 12 - Localização do Povoamento de <i>Tectona grandis</i> na Fazenda IDC, em Alta Floresta.	41
Figura 13 - Localização do Povoamento de <i>Tectona grandis</i> no Campus Experimental do IFMT- Cáceres.....	43
Figura 14 - Localização do Povoamento de <i>Tectona grandis</i> , Fazenda Teca do Brasil Ltda, Nossa Senhora do Livramento MT.....	45
Figura 15 - Abate e retirada das costaneiras nas toras de teca para a confecção das vigas.....	47
Figura 16 - Espectrofotômetro no infravermelho próximo com transformada de Fourier marca: Bruker Optics, modelo tensor 37.	64
Figura 17- Fotomicrografia da madeira de <i>Tectona grandis</i> de três sítios distintos – a) plano transversal, b) tangencial e c) radial, aumento de 20x e escala de 1mm. I- Alta Floresta, II- Nossa Senhora do Livramento e III- Cáceres.	67
Figura 18 -Fotomicrografia da madeira de <i>Tectona grandis</i> de três sítios distintos – a) plano transversal, b) tangencial e c) radial. Aumento de 4x e escala de 500 µm. I-Alta Floresta, II- Nossa Senhora do Livramento e III- Cáceres.	68

Figura 20 - Curva Espectral da face tangencial e radial de <i>Tectona grandis</i> para os três sítios estudados.	79
Figura 21 - Espectros de absorbância NIR para a teca proveniente do sítio Alta Floresta na região espectral de 12000 a 4000 cm^{-1}	101
Figura 22 - Espectros de absorbância na região espectral de 12000 a 11000 cm^{-1}	102
Figura 23 - Espectro bruto de teca proveniente do sítio de Alta Floresta com janela espectral de 9000-4000 cm^{-1} , divididos por região de ocorrência de grupos compostos.	103
Figura 24 - Espectros de absorbância de teca proveniente do sítio de Alta Floresta pré-tratado por normatização da média (SNV).	104
Figura 25 - Espectros de absorbância de teca proveniente do sítio de Alta Floresta, pré-tratados por normatização da média (SNV) e a 1ª derivada de Savitzky e Golay (1964).....	105
Figura 26 - Calibração e validação cruzada do modelo para o comprimento médio das fibras de teca entre os sítios, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.	109
Figura 27 - Calibração e validação cruzada do modelo para o comprimento médio das fibras de teca para o sítio Alta Floresta, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.....	110
Figura 28 - Calibração e validação cruzada do modelo para o comprimento médio das fibras de teca proveniente do sítio de Nossa Senhora do Livramento, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.	110
Figura 29 - Calibração e validação cruzada do modelo para o comprimento médio das fibras de teca proveniente do sítio Cáceres, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.	111
Figura 30 - Calibração e validação cruzada do modelo para a densidade a 12% de teca entre os sítios, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.....	114
Figura 31 - Calibração e validação cruzada do modelo para a densidade básica de teca proveniente do sítio Alta Floresta, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.....	115
Figura 32 - Calibração e validação cruzada do modelo para a densidade a 12% umidade de teca proveniente do sítio N. S. do Livramento, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.....	115
Figura 33 - Calibração e validação cruzada do modelo para a densidade a 12% umidade de teca proveniente do sítio Cáceres, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.	116
Figura 34 - Calibração e validação cruzada do modelo para o módulo de elasticidade de teca entre os sítios, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.	119

Figura 35 - Calibração e validação cruzada do modelo para módulo de elasticidade em flexão estática para a teca proveniente de Alta Floresta, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.....	119
Figura 36 - Calibração e validação cruzada do modelo para o módulo de elasticidade em flexão estática para a teca proveniente N. S. do Livramento, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.....	120
Figura 37 - Calibração e validação cruzada do modelo para o módulo de elasticidade em flexão estática para a teca proveniente do sítio Cáceres, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.....	120
Figura 38 - Calibração e validação cruzada do modelo para o módulo de elasticidade de teca entre os sítios, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.	122
Figura 39 - Calibração e validação cruzada do modelo para o módulo de ruptura em flexão estática para a teca proveniente do sítio Alta Floresta, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.....	123
Figura 40 - Calibração e validação cruzada do modelo para o módulo de ruptura em flexão estática para a teca proveniente do sítio N. S. do Livramento, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.	123
Figura 41 - Calibração e validação cruzada do modelo para o módulo de ruptura em flexão estática para a teca proveniente do sítio Cáceres obtidas em laboratório, pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.....	124

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Análise química do solo para o sítio de Alta Floresta.....	42
Quadro 2 - Análise química do solo para o sítio Cáceres.....	44
Quadro 3 - Análise química do solo para o sítio N.S. do Livramento.	46

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

a* - Eixo cromático vermelho-verde

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AF – Alta Floresta

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

b - Largura do corpo de prova

b* - Eixo cromático amarelo-azul

C - Cromaticidade

CoA - Coeficiente de anisotropia

CA- Cáceres

CF - Comprimento da fibra

CIE - *Comission International de L'Eclairage*

cm - Centímetro

COPANT - *Comisión Panamericana de Normas Técnicas*

CPs - Componentes Principais

d - Deformação correspondente à carga no limite proporcional (cm)

D12% - Densidade aparente do corpo de prova a 12% de umidade

DB - Densidade Básica

DL - Diâmetro do lume

Dr - Dimensão do corpo de prova na direção radial

Dt - Dimensão do corpo de prova na direção tangencial

EP - Espessura da parede

FT-NIR - Espectroscopia no Infravermelho Próximo com Transformada de Fourier

g - Aceleração da gravidade

g.cm^{-3} - Gramas por centímetro cúbico

h - Altura do corpo de prova

h - Vetores

h^* - Ângulo de tinta

IAWA - *International Association of Wood Anatomist*

IPT - Instituto de pesquisas tecnológicas

ISO - *International Organization for Standardization*

J - Joules

kg - Quilograma

kHz - Quilohertz

kN - Quilonewton

L - Comprimento do vão livre

L^* - Claridade ou luminosidade

LF - Largura total da fibra

L_0 - Distância percorrida pela onda de tensão

LPF - Laboratório de Produtos Florestais

LTM - Laboratório de Tecnologia da Madeira

LV - Número de variáveis latentes

M - Massa seca

D12% - Massa do corpo de prova a 12% de umidade

m^3 - Metro Cúbico

mm - Milímetro

MOE - Módulo de Elasticidade Estático

MOEd - Módulo de Elasticidade Dinâmico

MOEds - Módulo de Elasticidade Dinâmico Obtido por ondas de tensão

MOEdu - Módulo de Elasticidade Dinâmico obtido por ondas ultrassônicas

MOR - Módulo de Ruptura

MPa - Megapascal

NBR - Norma Brasileira

NIR - *Near-infrared spectroscopy* - Espectroscopia no Infravermelho Próximo

Nm - Nanômetros

ns - Não significativo

NS – Nossa Senhora do Livramento

P - Carga no limite proporcional (kg)

PCA - *Principal Component Analysis* - Análise de Componentes Principais

PLS - *Partial Least Squares* - Mínimos Quadrados Parciais

PLS-1 - Método de Regressão dos Mínimos Quadrados Parciais

P_{máx} - Carga máxima aplicada

P_{th} - *loadings*

PRESS - Soma dos Quadrados dos Erros de Previsão

R - Direção Radial

R²_c - Coeficiente de determinação da calibração

R²_{cv} - Coeficiente de determinação do modelo na validação cruzada

RD - Face Radial

RMSEC - Erro padrão de calibração

RMSEP - *Root Mean Square Error of Prediction*

RMSEV - Erro padrão da validação

RPD - Maior relação de desempenho do desvio

R_r - Retratibilidade Radial

R_t - Retratibilidade Tangencial

R_v - Retratibilidade volumétrica

SECV - Erro padrão da validação cruzada

SFB - Serviço Florestal Brasileiro

SNV - *Standard Normal Variate* – Variação Normal Padrão

T - Direção Tangencial

t - Tempo de deslocamento da onda de tensão

TG - Face tangencial

Th - Scores

TU - Teor de umidade

UnB - Universidade de Brasília

UR - Umidade Relativa

Vels - Velocidade de propagação de onda de tensão

Velu - Velocidade da onda ultrassônica

VL - Variáveis Latentes

Vol12% - Volume do corpo de prova

Vsaturado - Volume da amostra em condição saturada

Vseco - Volume da amostra em condição seca

λ - Comprimento de Onda

μm - Micrometro

μs – Microsegundo.

1 INTRODUÇÃO

A *Tectona grandis* é considerada uma madeira tropical nobre, apresentando uma importante participação no setor florestal mato-grossense. A produção está direcionada, principalmente para a exportação, atendendo o mercado internacional, sobretudo a região sudeste da Ásia. A madeira desta espécie atende as exigências dos diversos segmentos industriais como a indústria de móveis, de painéis, a construção civil, a construção naval e mais recentemente a indústria farmacêutica.

A teca também vem apresentando potencial econômico na implantação de sistema de integração lavoura/pecuária/floresta, permitindo aos produtores ganhos produtivos ao conciliar este sistema. Além disso, a conscientização ambiental dos consumidores, principalmente do mercado europeu para reduzir a exploração de florestas nativas, aumentou a pressão para produtos madeireiros com certificação florestal, podendo ampliar a demanda da produção da teca.

Nas últimas décadas as plantações comerciais florestais tiveram seu maior auge a nível mundial. Os plantios no Brasil de *Tectona grandis* representavam 0,9% (IBÁ, 2016), correspondendo a um pouco mais de 80.000 há, sendo que 70 mil destes estão no estado de Mato Grosso. Destaca-se as cidades de Cárceres, Porto Esperidião, São Jose do Quatro Marcos, Tangará da Serra, Alta Floresta e Juara (TAKIZAWA, 2018).

As propriedades da madeira são influenciadas pelas características do sítio, como o clima, o solo, as práticas silviculturais e o manejo dos plantios, entre outros. As combinações destes parâmetros promovem boas condições de crescimento e a redução dos ciclos de cortes da madeira, despertando o interesse de produtores florestais que buscam retorno financeiro e bons investimentos em espécies de rápido crescimento.

As práticas silviculturais e as características do sítio combinadas, além de promover o rápido crescimento também influenciam na qualidade da madeira. Assim, fatores como o espaçamento pode influenciar nos parâmetros relacionados a dimensões de fibras, que por sua vez influenciará a densidade e a resistência da

madeira. Estes parâmetros também sofrem influências da adubação, precipitação, adensamento e desbastes quando da condução do plantio. As práticas relacionadas a adubação além de permitir o incremento em diâmetro e altura das árvores influenciam na quantidade de parênquima e no teor de fibras, determinando a resistências mecânica da madeira.

O solo, a adubação, o espaçamento e a idade, além da precipitação podem influenciar na composição química da madeira. Plantios com menor espaçamento e alto índice pluviométrico, baixo teor de fósforo podem apresentar menores valores para o teor de cinzas em relação a aquelas que se desenvolvem sob maiores espaçamentos, alto teor de fósforo e baixos índice pluviométrico. Estes parâmetros também estão associados ao teor de extrativos, que por sua vez determinam a coloração da madeira, item de apreciação e valorização de uma espécie pelo mercado.

Desta forma, o estudo de características do sítio, como as condições climáticas, o solo e os tratamentos silviculturais onde os plantios estão inseridos, contribuirão para compreender a influência destes fatores na qualidade da madeira. O potencial da madeira de *Tectona grandis* como madeira de qualidade já é sabido. No entanto, a relação de suas propriedades com as características do sítio, certamente trará contribuições novas, instigando as empresas deste segmento a melhorar a qualidade da madeira produzida, visando um mercado cada vez mais competitivo.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL:

O presente estudo tem como objetivo caracterizar a madeira de teca (*Tectona grandis*), provenientes de três sítios distintos do Estado do Mato Grosso, considerando as condições de qualidade do sítio, através de técnicas destrutivas e não destrutivas: análise de imagens (macroscopia, microscopia e mensuração de fibras, vasos e raios), flexão estática (MOR e MOE), colorimetria, técnicas acústica (ondas ultrassônicas e ondas de tensão) e técnica óptica (espectroscopia no infravermelho próximo).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Caracterizar tecnologicamente as madeiras provenientes de três sítios distintos, verificando a influência do sítio, principalmente as condições climáticas, solo, idade e tratamentos silviculturais;
- Determinar as principais dimensões anatômicas da madeira, caracteres gerais macroscópicos, microscópicos e fibras por meio da técnica de análise de imagem;
- Determinar os parâmetros colorimétricos claridade (L^*), coordenadas cromáticas (a^* e b^*), saturação da cor (C) e ângulo de tinta (h^*), utilizando-se o sistema CIELAB, 1976. Estimar as suas correlações com propriedades da madeira, como a densidade aparente, retratibilidades e flexão estática (MOR e MOE);
- Determinar as constantes elásticas da madeira, comparando o módulo de elasticidade estático (MOE) e o módulo de elasticidade dinâmico (MOEd);
- Através da técnica de espectroscopia no infravermelho próximo estimar as propriedades anatômicas (fibras), físicas (densidade aparente) e mecânicas (MOR e MOE) e;
- Determinar as propriedades químicas (teor de lignina solúvel e insolúvel, teor de lignina total, teor de extrativos totais, holocelulose e teor de cinzas).

2.3 HIPÓTESE:

A proveniência da madeira de teca de plantios do Estado de Mato Grosso expressa diferenças em suas propriedades tecnológicas, o conhecimento das diferenças ocasionados pela procedência torna possível fornecer e auxiliar na escolha do local para o estabelecimento de plantios comerciais visando a redução nas diferenças em sua madeira.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 *Tectona grandis*

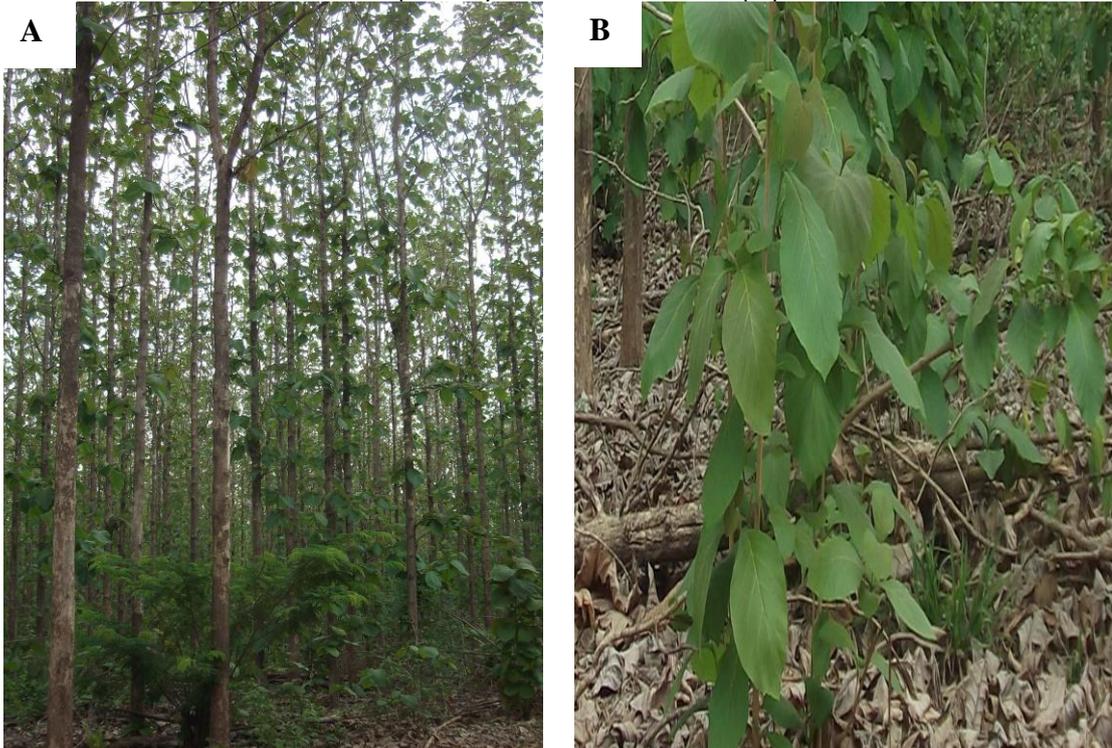
Espécie de madeira tropical mais plantada no mundo, nas regiões da Ásia estima-se que 74% do total das plantações de madeiras tropical são de teca com aproximadamente 5.819,000 hectares, cultivada há mais de 150 anos em mais de 50 países dentro e fora da área de distribuição normal. A teca tem sido reconhecida como uma madeira de alta qualidade, devido a suas excelentes propriedades, tornando-a uma das madeiras mais valiosas do mundo junto a espécies como o cedro e o mogno. Essas propriedades, particularmente para o cerne, incluem a combinação de força com leveza, durabilidade, estabilidade dimensional, facilidade de trabalhar com ferramentas e acabamento, resistência a cupim, fungos, químicos, às condições atmosféricas, à corrosão, além da beleza e estética. A versatilidade dessa madeira a converte eminentemente em uma madeira de uso múltiplo para uma grande variedade de usos finais (FAO, 2009a, 2009b).

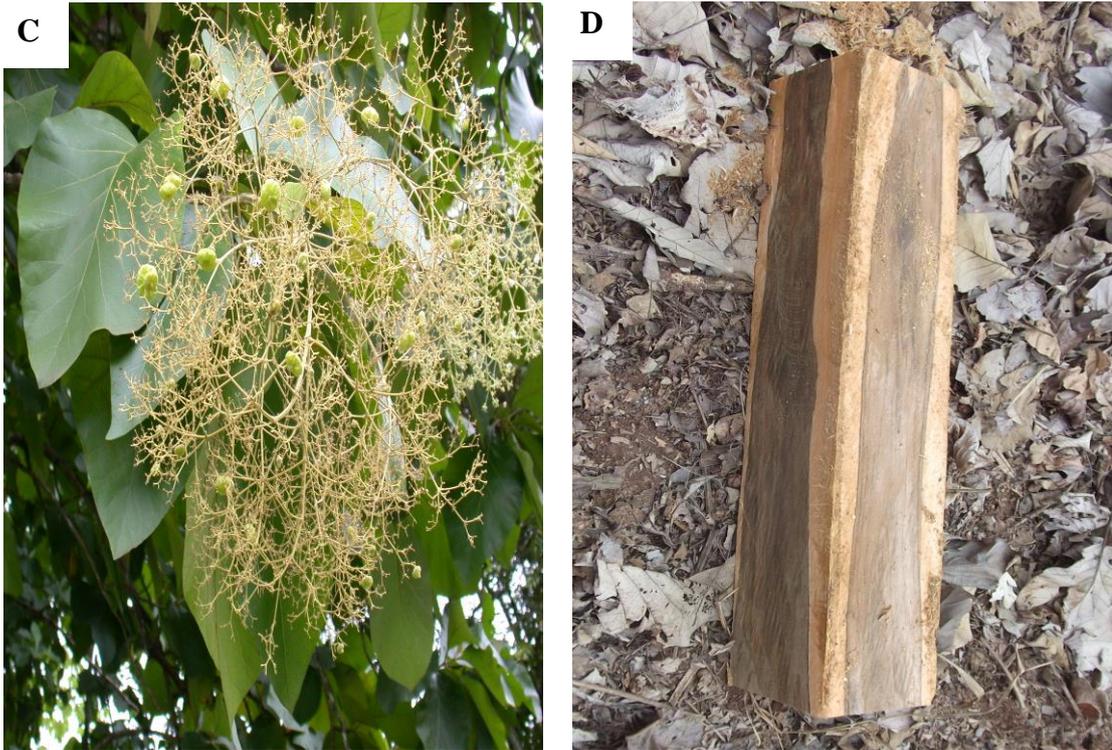
A teca é uma espécie de alta adaptabilidade a diferentes climas, cresce em áreas tropicais de clima de monção com precipitações entre 1300 e 2500 mm.ano⁻¹ e temperaturas entre 2° e 48°C, porém se desenvolve melhor com uma temperatura mínima de 13°C a 17°C e máxima de 39°C a 43°C e temporadas secas de 3 a 5 meses (WEAVER, 1993; PANDEY e BROWN, 2000). A teca tolera condições de solo bem extremas sempre que existir uma drenagem adequada e não tolera o alagamento. Segundo Seth e Yadav (1959) citados por PANDEY e BROWN (2000), as plantações de teca têm sido um fracasso quando se estabelecem em solos de tipo argiloso ou mal drenados.

Tectona grandis L.f., pertence à família botânica Lamiaceae, é uma árvore de grande porte, caducifólia, copa arredondada, com fuste cilíndrico revestido de uma casca grossa, apresenta alargamentos na base da árvore, produzidas por inchaço exagerada das raízes, folhas com 30 a 60 cm de comprimento. O fruto é de tipo drupa, de cor marrom claro com vilosidades finas, tem um endocarpo duro com 4 sementes cada uma com 0,6 cm de comprimento. Flores pequenas em panículas eretas e ramificadas amarelo-esbranquiçadas. A teca é uma espécie de polinização cruzada,

e as abelhas são as principais responsáveis (WEAVER, 1993). Pode alcançar até 45 metros de altura e 100 cm de diâmetro sob boas condições de crescimento. É uma espécie que não tolera sombra em nenhuma fase do seu ciclo vital. Começa a florescer e produzir sementes a partir dos dez anos (PANDEY e BROWN, 2000).

Figura 1 - Plantio de *Tectona grandis* no município de Alta Floresta- MT (A); Folhas e Frutos (B e C) e madeira bruta (D) de teca.





Fontes: Figuras A, B e D (Autor, 2019), Figura C, (Fonte: ITTO, 2019).

A madeira é de boa trabalhabilidade com ferramentas manuais e elétricas, mas contém sílica que tende a diminuir a afiação dos instrumentos. A madeira é fácil de colar, de fácil acabamento e facilita também a utilização de pregos e parafusos (FONSECA, 2004). No início deste século XXI, a teca foi utilizada na Índia para construção de casas, pontes e portos. A estabilidade da teca a faz material ótimo para cobertas de embarcações, móveis finos, pisos, marcenaria, acabamentos interiores, vigas e portas, painéis, esculturas, torneados entre outros usos nobres. Tem sido relatado que Teca é também usada para os mastros e cabides, suportes em minas de carvão, dormentes, ornamentais, placa, pianos, órgãos e harmónios, chaves de violinos e rapé (WEAVER, 1993).

Estudos químicos em teca registraram a presença de uma substância pertencente à classe das antraquinonas, a tectoquinona, à qual são atribuídas propriedades antifúngicas, bactericidas e repelentes a ataques de alguns insetos, sendo por isso responsabilizada pela durabilidade da madeira quando exposta aos rigores do tempo (RANGANATHAN et al., 1949; RUDMAN; COSTA, 1958; SANDERMANN; SIMATUPANG, 1966 citados por MOREIRA et al., 2006).

3.2 Caracterização Anatômica e Colorimetria

3.2.1 Anatomia

Segundo Tomazello Filho (2002), o conhecimento das células e tecidos que compõem o lenho arbóreo é básico para a caracterização da estrutura anatômica das madeiras. As dimensões e disposição dos elementos anatômicos também contribuem para o estudo da madeira, estabelecendo informações relacionadas aos parâmetros físicos e mecânicos.

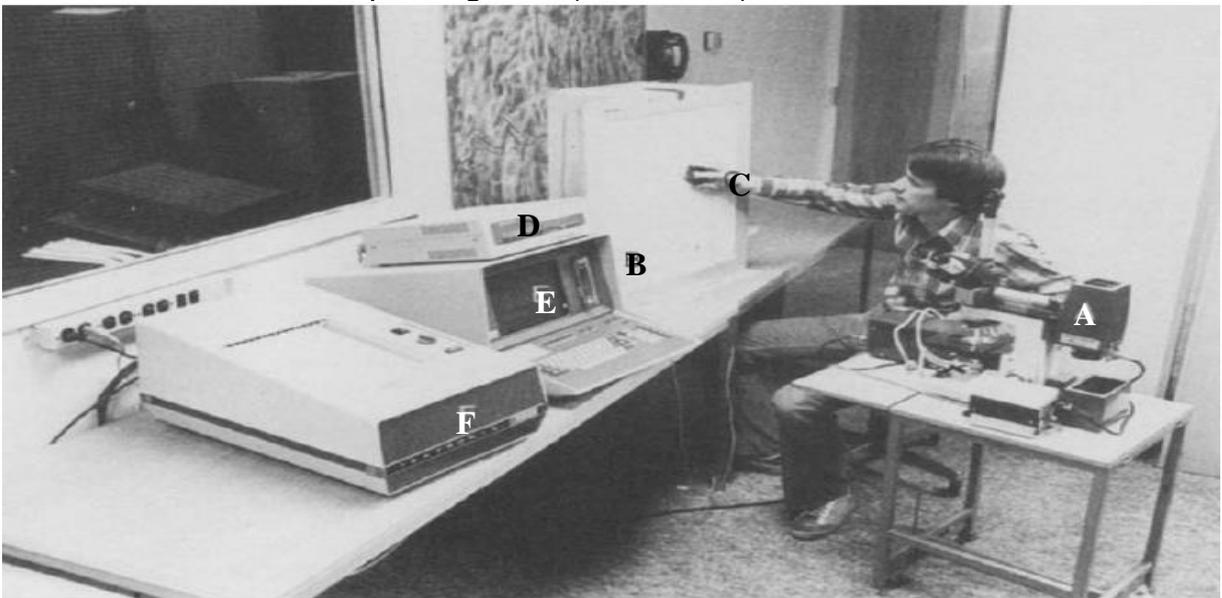
Chagas et al. (2014), avaliando algumas propriedades da madeira oriunda de árvores de teca (*Tectona grandis* L. f.) de plantios comerciais com quatro, seis e doze anos para uma classe diamétrica entre 9 e 13 cm, observaram diferença estatística entre as três idades para os parâmetros anatômicos estudados. Segundo os autores as diferenças estatísticas entre as idades para os parâmetros anatômicos estudados, não mostrou uma explicação lógica, pois presumia-se encontrar propriedades com igualdade estatística entre as três idades, visto que as características e os diâmetros das toras estudadas são muito similares entre si.

Rodriguez-Anda et al. (2017), estudando as variações das características anatômicas na parte interna e externa do cerne de *Tectona grandis* L. f. com diferentes idades e origens, observaram que a madeira de teca tinha 6 a 8 vasos. mm⁻². Madeira de Campeche- México (9 e 15 anos) apresentou o maior diâmetro de vasos no interior e no exterior do duramen; em sua parte interna, possuía a maior largura de raio. Em ambas as partes do cerne, a madeira de 9 anos de idade de Campeche apresentou maior altura de raios; A madeira de 21 anos de Chiapas tinha maior comprimento e diâmetro de fibras; e a madeira de 15 anos de Tabasco produziu a maior espessura de parede das fibras. Concluindo que Idade e origem afetam a estrutura celular da madeira de teca.

3.2.2 Análise de imagem

Na década de 1980, foi desenvolvido o primeiro *software* de medições de fibras da madeira na Universidade de Alberta (Canadá). Uma variedade de métodos era empregada pelos pesquisadores para medir o comprimento da fibra das madeiras. Os métodos geralmente envolviam o uso de sistemas de microscópio a partir dos quais medições eram tomadas com um micrômetro ocular ou de uma imagem projetada. A limitação desses sistemas não surgia da medição física de fibras, mas na compilação de grandes quantidades de números geralmente necessários. O sistema desenvolvido proporcionou acomodar uma variedade de entradas gráficas diferentes, portanto, o sistema desenvolvido para medição de comprimento de fibra, pode ser usado para vários estudos anatômicos de madeira (MICKO et al., 1982).

Figura 2 - Fotografia do sistema informatizado de medição de comprimento de fibra utilizado pela Universidade de Alberta em 1982 (MICKO et al. 1982); A - unidade de projeção (Tektronix 4956), B - painel gráfico; C - cursor; D - controlador do painel gráfico (Tektronix 4).



Fonte: Micko et al. (1982).

Atualmente os programas de análise de imagens encontram-se mais avançados, sendo possível realizar medições e cálculos de proporções de vários elementos xilêmáticos, além de se fazer análises dentro do próprio programa, bem como durante o processo de medição, obter a captura de imagens. É uma ferramenta

que agiliza os estudos em anatomia da madeira e, também, em outras áreas de conhecimento (PAN e KUDO, 2012).

A literatura científica evidencia uma série de estudos no campo da análise de imagens, utilizando-a para identificação e diferenciação das propriedades anatômicas entre as espécies, dentro das mesmas espécies. Através desta metodologia pesquisas vem buscando identificar fatores que podem ocasionar variações nos parâmetros anatômicos, como a idade, espaçamento, clima, posição radial da amostra, como estudos conduzidos por Lima et al. (2011), utilizando a análise de imagens para a avaliação das dimensões anatômicas da madeira de teca em função do espaçamento e da posição radial do tronco; Chagas et al. (2014) avaliando as propriedades da madeira de teca em diferentes idades, aos quatro, seis e 12 anos de idade, oriundas de desbaste, descreveram os caracteres anatômicos e determinaram diferença estatística entre as três idades para os parâmetros anatômicos estudados; Rodrigues-Anda et al. (2017), utilizaram a técnica para descrever as propriedades organolépticas da madeira de teca e determinar as principais características anatômicas no cerne separando-os em interno (próximo a medula) e externo (limite com o alburno), em função da idade e local de crescimento; Corrêa Queiroz (2018), avaliou as características anatômicas de seis procedências de teca buscando observar diferenças existentes entre elas, dividindo os discos em camadas de perfil radial, em três níveis (cerne, intermediária e alburno).

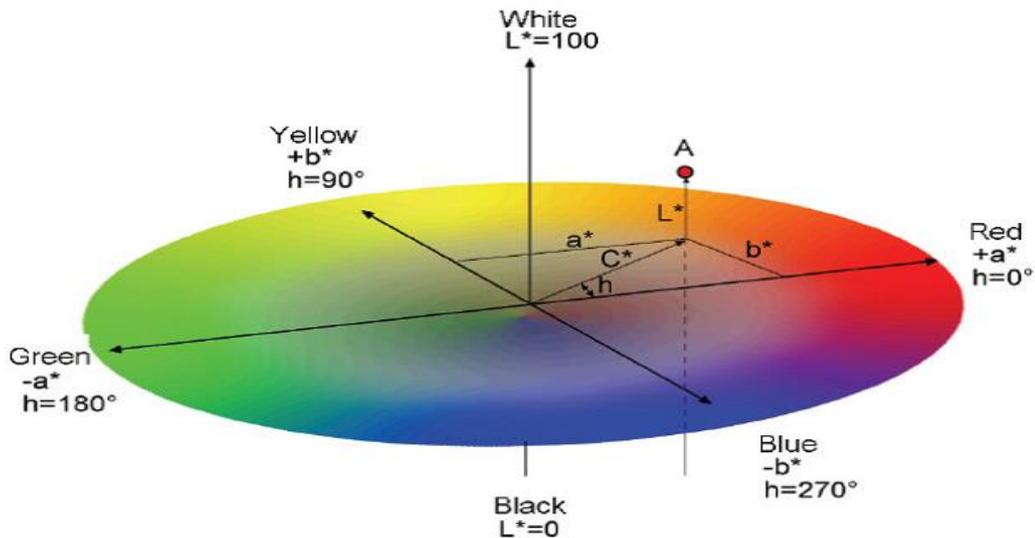
3.2.3 Colorimetria

A cor é uma mistura de três atributos: tonalidade (que depende do comprimento de onda), intensidade luminosa e saturação, todos eles intimamente relacionados com a luz que está incidindo sobre o objeto. Quando se altera a fonte de luz, altera-se também a sua cor (MINOLTA, 1998).

A colorimetria descreve cada elemento da composição de uma cor numericamente por meio de um aparelho apropriado, podendo ser o colorímetro ou o espectrofotômetro. Um dos sistemas mais utilizados para medição de cores é o CIE-L*a*b*, o qual trabalha de acordo com a Norma CIE «Commission International de

L'Éclairage» e é caracterizado por três diferentes parâmetros (L^* , a^* e b^*) em um espaço de cor tridimensional tal como ilustrado na Figura 1 (JOHANSSON, 2005).

Figura 3 - Espaço de cor tridimensional do sistema CIE- $L^*a^*b^*$. A variável L^* representa a luminosidade. As coordenadas a^* e b^* concedem a cor das medições (coordenadas cromáticas) (JOHANSSON, 2005).



Para melhor entendimento do funcionamento do sistema $L^* a^* b^*$, Varela (2002) e Silva et al. (2007) explicam:

a) L^* mede a luminosidade que varia de 100 para o branco nominal, a zero para o preto;

b) a^* mede a cromaticidade e varia do positivo ao negativo. Quanto mais positivo for esse valor mais vermelha é a cor, ao passo que quanto mais negativo, mais verde é a cor do objeto;

c) b^* mede a cromaticidade e varia do positivo ao negativo. Porém para essa variável quanto mais amarela é a amostra mais positivo é o valor e quanto mais azul, mais negativo.

No espaço psicométrico CIELAB as cores são descritas ou por luminosidade (L^*), coordenada a^* (conteúdo do vermelho ao verde) e coordenada b^* (conteúdo do amarelo ao azul) ou pelo uso de coordenadas cilíndricas de luminosidade (L^*),

tonalidade (h^*) e o croma (C), relacionadas diretamente com a tabela “Munsell Soil Color Chart “(1975).

Segundo Camargos e González (2001) e Calderon (2012) a cor é uma das características mais importantes para a identificação e indicação de usos de espécies de madeira, principalmente quando associada aos aspectos de textura e desenho. A cor pode ser alterada pelo teor de umidade, pela temperatura, pelas degradações provocadas pelo ataque de organismos xilófagos ou, ainda, pelas reações fotoquímicas dos componentes químicos presentes em sua estrutura.

Pesquisas de grande relevância na área da colorimetria foram desenvolvidas por Camargos e González (2001), no qual foram estudadas trezentas e cinquenta espécies florestais, agrupadas em uma tabela de cor, sendo constatado que o ângulo de tinta (h^*) de todas as cores das madeiras estudadas se enquadraram de 0° a 90° (1° quadrante do sistema CIELAB de 1976). A maior claridade (L^*) para a madeira foi de 86,44, correspondente à cor branca (para um branco absoluto de 100) e a menor claridade, correspondendo à cor escura, foi de 25,93 (preto absoluto igual a 0). O ângulo de tinta teve variação entre 13,94 (vermelho) e 87,00 (amarelo) e a cromaticidade teve como maior valor 47,03 e o menor valor 2,31.

De acordo com González et al. (2001), visando sempre o seu uso final, nos estudos sobre a caracterização tecnológica de madeiras, a determinação da cor, vem se destacando como um fator fundamental para a caracterização da qualidade da madeira, que influirá diretamente no aspecto e, conseqüentemente na sua comercialização, valorizando desta forma o preço da madeira no mercado.

González (1993), afirma que vários fatores podem influenciar na cor da madeira: a composição química, anatomia, método de derruba, posição da amostra na árvore, espécie, altura e diâmetro da árvore, qualquer fator relativo ao meio ambiente e idade da árvore. Desta forma, a cor da madeira não é estável, tende a alterar-se com a ação externa do intemperismo, seja pela lixiviação ocasionada pela chuva ou ainda pela fotodegradação (AMORIM et al., 2013), as características da cor da madeira dependem dos componentes químicos que interagem com a luz (HON e MINEMURA, 2001).

Para Barros et al. (2014) a utilização da colorimetria quantitativa para conhecimento da cor da madeira revela-se de aplicação simples e prática, podendo ser empregada na pré-classificação da madeira, a partir do desdobro da tora, na qualificação de peças, e na formação de banco de dados. Stangerlin et al. (2013) sugerem que por intermédio do conhecimento da cor da madeira é possível elaborar planos de triagem para madeiras serradas ou laminadas, garantindo a obtenção de produtos de madeira sólida com qualidades homogêneas.

Dependendo do método de secagem utilizado pode ocasionar diferenciação nas cores da madeira, podendo apresentar cores diferentes nas direções tangencial e radial, a cor da madeira sendo característica importante na utilização desta espécie, possibilita certa agregação de valor na indústria madeireira, principalmente para utilização em ambientes fechados (Gonzalez et al. 2014). Métodos como o processo de termorretificação, promovem o escurecimento (L^*), variações nas tonalidades de vermelho (a^*) e amarelo (b^*), em relação à cor original da madeira. A cor vermelha (a^*) aumentou à medida que se elevou a temperatura do tratamento térmico, diferentemente da cor amarela (b^*) que diminuiu com a elevação da temperatura (Santos et al. 2016).

Silva et al. (2017) realizaram a caracterização colorimétrica da madeira do cerne de trinta espécies tropicais, onde foram medidos os parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C e h^*), separando-se as espécies por grupos de similaridade e assim classificando a coloração. A análise de clusters dividiu os materiais em cinco grupos, em que nos primeiros estiveram as madeiras mais escuras e pesadas (ex. *Dialium guianese* e *Caesalpinia echinata*), enquanto nos últimos estiveram as madeiras mais claras e leves (*Ochroma pyramidale*, *Simarouba amara* e *Schizolobium amazonicum*).

A cor da madeira de teca recém-abatida é verde oliva e muda para marrom claro com a exposição à secagem. O alburno é amarelo esbranquiçado e difere marcadamente da cor do cerne. A madeira tem falsos anéis formados por uma porosidade em anel semicircular, possui uma fibra reta, textura uniforme e oleosa ao tato, apresenta um ligeiro aroma depois da secagem. A madeira seca ao ar

rapidamente e de forma satisfatória. Mas também se pode secá-la em secadores artificiais de forma lenta, merecendo cuidados para evitar defeitos (WEAVER, 1993).

Corrêa Queiroz (2018) realizando a caracterização colorimétrica para a teca de seis procedências na região de Cáceres no estado do Mato Grosso, avaliando o cerne e o alburno no perfil radial, seguindo-se o grupo colorimétrico criado por Camargos e Gonzalez (2001), o alburno de todas as procedências apresentaram a coloração cinza-rosado, enquanto o cerne para quatro procedências se enquadraram na cor rosa acinzentado e outras duas apresentaram a cor marrom-claro e marrom-oliva. A variável b^* (amarela) foi determinante na formação e composição de agrupamento de cores da espécie. A variável a^* (vermelha), apesar de ser baixa (9,5), é 1,86 vezes maior no cerne, resultando numa tonalidade intensa de cor oliva.

Garcia e Marinonio (2016) estudando a variação da cor da madeira de *Tectona grandis* com 12 anos de idade, em função da densidade e do teor de extrativos, para dois diferentes espaçamentos, observaram que na seção radial, as madeiras de cerne com maior densidade apresentaram mais pigmento amarelo (b^*), enquanto que, na seção tangencial, elas apresentaram-se mais escuras (menor L^*) e com menos pigmento amarelo. As madeiras de alburno de maior densidade em relação ao alburno de menor densidade, mostraram-se mais escuras (menor L^*) e apresentam mais pigmento vermelho (a^*), tanto na seção radial quanto na tangencial.

Moya e Berrocal (2010), trabalhando com teca de rápido crescimento na Costa Rica, encontraram pelo sistema CIELab, para madeira de cerne de teca, valores para os parâmetros de $L^* = 58,15$, $+a^* = 10,4$ e $+b^* = 25,91$. Thulasidas et al. (2006) reportaram valores médios de $L^* = 56,36$, $a^* = 6,85$ e $b^* = 23,44$, para cerne em três plantios de teca na Índia. Queiroz et al. (2016), encontraram para teca no municípios de Cáceres os parâmetros $L^* = 51,22$, $+a^* = 11,14$, $+b^* = 25,87$, $C = 28,17$ e $h^* = 65,88$, Garcia e Marinonio (2016), no mesmo município, sob diferentes espaçamentos encontraram os seguintes valores para os parâmetros colorimétricos, $L^* = 60,22$, $+a^* = 9,97$, $b^* = 26,36$ e $L^* = 62,22$, $+a^* = 8,95$ e $+b^* = 24,27$. Derkyi et al. (2009), trabalhando com teca em diferentes zonas ecológicas em Gana, observaram os seguintes valores colorimétrico: ($L^* = 53,36$, $+a^* = 12,04$, $+b^* = 24,88$); ($L^* = 57,61$, $+a^* = 11,32$, $+b^* = 23,30$); ($L^* = 55,38$, $+a^* = 10,23$, $+b^* = 21,40$) e ($L^* = 59,12$, $+a^* = 10,29$, $+b^* = 25,16$), para as

zonas ecológicas: floresta semi-decidual úmida, floresta semi-decidual seca, floresta de transição/savana e savana respectivamente.

3.3 Propriedades Químicas da Madeira

Em termos químicos, a madeira é melhor definida como um composto de biopolímero tridimensional composto de uma rede interconectada de celulose, hemiceluloses e lignina com pequenas quantidades de extrativos e inorgânicos (ROWELL et al. 2005). O principal componente químico de uma árvore viva é a água. Com base em sua massa, todas as paredes celulares de madeira consistem principalmente de polímeros à base de açúcar (carboidratos, 65-75%) que são combinados com lignina (18–35%) (ROWELL et al. 2005). No geral, a madeira seca tem uma composição elementar de cerca de 50% de carbono, 6% de hidrogênio, 44% de oxigênio e vestígios de produtos inorgânicos (ROWELL et al. 2005).

A madeira é constituída basicamente por três polímeros, a celulose, a hemicelulose e a lignina, em proporção próxima de 50:25:25, distribuídas na parede celular. A combinação de celulose e hemicelulose, designa-se de holocelulose e usualmente responde por 65-75% do peso seco da madeira (PASTORE, 2004). Além dos componentes principais, a madeira apresenta substâncias poliméricas secundárias, em pequenas quantidades, como amidos e substâncias pécticas, assim como substâncias de baixo peso molecular, comumente chamadas de materiais acidentais. (ROWELL et al., 2005; KLOCK et al., 2005).

Segundo Mena e Nimkar (2016) investigando a variação dos extrativos solúveis, lignina e holocelulose na madeira de diferentes procedências de *T. grandis* L. as propriedades físico-químicas da madeira são parâmetros importantes para a caracterização preliminar como matéria-prima para celulose, para combustível e para outros produtos de usos relacionados.

A durabilidade da madeira de teca é uma característica marcante da espécie. Até o momento são poucos os registros de ataques de pragas que possam comprometer os seus plantios. A resistência natural do cerne da teca deve-se a

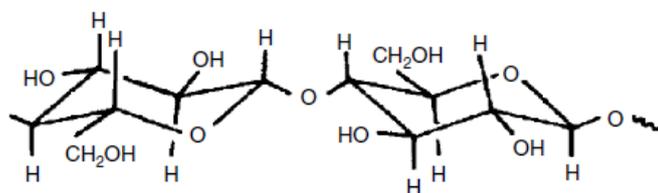
tectoquinona, um preservativo natural contido nas células da madeira (ANGELI, 2003). Segundo Motta et al. (2013), a madeira de teca é caracterizada como imune à ação dos fungos apodrecedores e insetos, podendo ser enterrada, exposta ao tempo ou à água do mar sem sofrer grandes danos.

Leonardo et al. (2015) reiteram que os usos já distintos da madeira de teca, como produção de peças de usos nobres, movelaria, marcenaria, construção civil e naval, o conhecimento da versatilidade, incluindo a distinção dos componentes químicos, geradores de produtos não madeireiros desta e de outras espécies, permite relacionar múltiplas áreas da ciência para o desenvolvimento e aplicação de tecnologias provenientes de fontes renováveis.

3.3.1 Celulose

A celulose é o componente mais importante da parede celular da madeira em termos de massa e efeitos nas características da madeira. Composto de unidades de D-glucopirranose, que são ligadas por ligações β - (1 \rightarrow 4) - glucosídicas. O bloco de construção da celulose é na verdade a celobiose, uma vez que a unidade de repetição em celulose é uma unidade de dois-açúcares (ROWELL et al. 2005). É o componente majoritário, perfazendo aproximadamente a metade das madeiras tanto de coníferas, como de folhosas.

Figura 4 - Estrutura química da celobiose (Rowell et al. 2005).



A celulose apresenta uma estrutura micro cristalina com regiões altamente ordenadas (regiões cristalinas) e regiões desordenadas (regiões não cristalinas). Esta cristalinidade provém do estabelecimento de ligações de hidrogênio entre as cadeias,

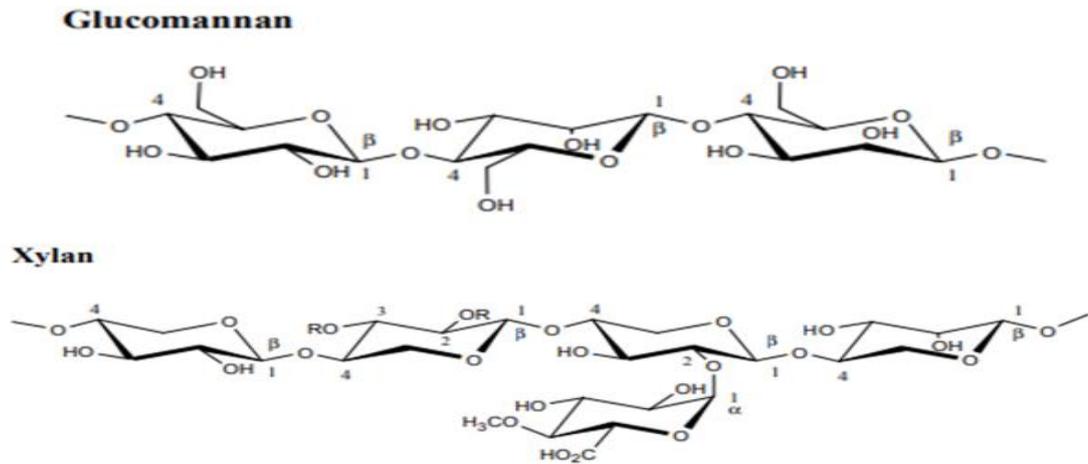
embora ligações hidrogênio também ocorram na fase não cristalina, com baixo nível de organização. As camadas formadas pelas cadeias empacotam-se umas sobre as outras, os quais formam as microfibrilas, por sua vez, se ordenam para formar as sucessivas paredes celulares (PASTORE, 2004; SENAI/SP, 2013).

3.3.2 Hemicelulose

Em geral, a fração hemicelulósica das madeiras consiste em pentoses numa coleção de polímeros polissacarídicos com um grau de polimerização menor que a celulose (DP médio de 100-200) e contendo principalmente os açúcares D-xilopiranoose, D-glucopiranoose, D-galactopiranoose, L-arabinofuranoose, D-manopiranoose, D-glucopiranosilurico e D-galactopiranosilurico com quantidades menores de outros açúcares. As hemiceluloses estão intimamente associadas à celulose e contribuem para os componentes estruturais da árvore (ROWELL et al., 2005).

As hemiceluloses têm esqueletos de cadeia linear (principalmente glucomananos e cadeias xilanas), altamente ramificadas (Figura 5). Os açúcares na estrutura hemicelulósica exibem ligação de hidrogênio tanto dentro da cadeia de hemicelulose como entre outras regiões da hemicelulose e da celulose amorfa. A maioria hemiceluloses são encontradas intercaladas dentro ou sobre os limites das regiões amorfas das cadeias de celulose e em íntima associação com a lignina. A hemicelulose pode ser o material de conexão entre celulose e lignina (WINANDY e ROWELL, 2005).

Figura 5 - Estrutura da hemicelulose (LAINE, 2005).

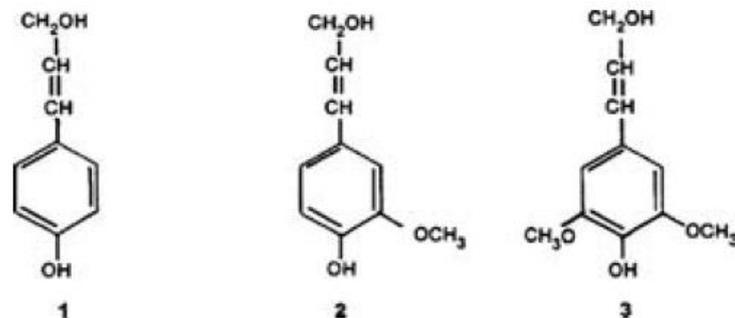


Segundo Winandey e Rowell (2005) o papel das hemiceluloses na resistência da madeira mostrou-se recentemente ser muito mais crítico em relação ao desempenho geral de engenharia da madeira do que se supunha anteriormente, suspeitando-se que o papel principal das hemiceluloses seja o de atuar como um agente de acoplamento altamente específico capaz de se associar tanto com as áreas mais aleatórias (i.e., n cristalinas) de celulose hidrofílica e a lignina hidrofóbica mais amorfa.

3.3.3 Lignina

As moléculas de lignina têm formação completamente diferentes dos polissacarídeos, pois são constituídas por um sistema aromático composto de unidades de fenilpropano, que são consideradas substâncias incrustantes. O polímero tridimensional é composto de ligações C – O – C e C – C. Os precursores da biossíntese da lignina são o álcool cumarílico, álcool coniferílico e álcool sinapílico (KLOCK et al., 2005; ROWELL et al., 2005), Figura 6.

Figura 6 - Estruturas químicas de precursores de lignina: (1) álcool cumarílico, (2) álcool coniferílico e (3) álcool sinapílico (ROWELL et al., 2005).



Do ponto de vista morfológico a lignina é uma substância amorfa localizada na lamela média composta, parede primária, bem como na parede secundária. Durante o desenvolvimento das células, a lignina é incorporada como o último componente na parede, interpenetrando as fibrilas e assim fortalecendo, enrijecendo as paredes celulares (FENGEL e WEGEMER, 1989; KLOCK et al., 2005). Este componente é encontrado na maioria das plantas superiores em maior concentração na lamela média do que nas subcamadas da parede secundária dos traqueídeos, vasos, fibras, etc (ABREU e OERTEL, 1999).

De acordo com Glasser e Kelly (1987), a quantidade de lignina total da madeira depende dos requerimentos físicos e mecânicos da árvore, e pode ser alterada durante o seu desenvolvimento, variando a quantidade dos precursores ou micronutrientes específicos.

Segundo Philipp e D'Almeida (1988) a resistência à força de compressão pode ser explicada devido à estrutura tridimensional das ligninas, gerando 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.

3.3.4 Extrativos

Como o nome indica, extrativos (também conhecidos como produtos naturais) são produtos químicos que ocorrem na madeira que podem ser extraídos usando solventes. Em alguns casos, os extrativos são classificados pelo solvente usado para extraí-los. Por exemplo, solúveis em água ou tolueno-etanol ou solúveis em éter (ROWELL et al., 2005), compreendendo um grande número de componentes (BARREIROS, 2006).

Assim, os extrativos são um grupo de substâncias químicas da parede celular consistindo principalmente de gorduras, ácidos graxos, álcoois graxos, fenóis, terpenos, esteróides, ácidos resínicos, colofônias, ceras e muitos outros compostos orgânicos menores (ROWELL et al, 2005). Em geral, as madeiras de coníferas têm maior composição média de extrativos do que as folhosas (KLOCK et al. 2005). A maioria dos extrativos está localizada no cerne, e alguns são responsáveis pela cor, cheiro e durabilidade da madeira (SANSÍGOLO, 1994; KLOCK et al. 2005; ROWELL et al, 2005).

3.3.5 Cinzas

O conteúdo inorgânico de uma madeira é geralmente referido como o seu teor de cinzas, que é uma medida aproximada dos sais minerais e outras matérias inorgânicas na fibra após a combustão a uma temperatura de $575 \pm 25^{\circ}\text{C}$ (ROWELL et al., 2005). O conteúdo inorgânico pode ser bastante alto em madeiras contendo grandes quantidades de sílica, Ca, Mg e K. Estes constituintes compõem 80% das cinzas na madeira. O conteúdo inorgânico total e a concentração variam amplamente dentro e entre as espécies. O conteúdo inorgânico varia bastante, dependendo das condições ambientais em que a árvore vive (ROWELL et al., 2005).

Determinando as propriedades químicas para teca em diferentes idades, foram observados que aos 13 anos de idade, altos valores de lignina (32,55%) e extrativos (8,93%) na madeira de teca quanto comparados com outras espécies de folhosas, fato que pode estar associado com a durabilidade natural da madeira (BLANCO-FLOREZ, 2012), aos seis, oito e 10 anos de idade, os teores de extrativos totais

aumentam com a idade das árvores, maiores quantidades de extrativos na madeira garantem maior durabilidade ao ataque de xilófagos, porém, interferem no processo de secagem (ARRUDA, 2013), enquanto Chagas et al. (2014) não observaram diferenças na composição química da madeira de teca aos quatro, seis e 12 anos de idade, porém diferenças foram observadas por Corrêa Queiroz (2018) avaliando seis procedências de teca, aos 9 anos de idade, em plantio comercial na região de Cáceres no Mato grosso, verificou diferenças significativas nas médias dos componentes fundamentais, holocelulose, lignina e no componente acidental extrativos. Porém, as médias de cinzas sem extrativos não variaram significativamente em função das procedências. Os valores médios para os componentes químicos da madeira de teca foram de 4,62% para o teor de extrativos, 0,62% para os valores de cinzas, 31,89% para o teor de lignina e 67,49% para o teor de holocelulose.

3.4 Propriedades Físicas e Mecânicas

O desenvolvimento tecnológico no uso da madeira como material estrutural cresceu substancialmente nas últimas décadas, aumentando sua utilização para diversos fins, além do surgimento de novos produtos e subprodutos a base de madeira. A utilização da madeira para atividades que demandam resistência está associada, entre outras características, ao conhecimento de suas propriedades físico-mecânicas (BELTRAME et al., 2010).

Para os ensaios mecânicos são aplicadas simulações para sua real utilização, avaliando a capacidade da madeira em suportar as solicitações mecânicas, considerando a resistência e a rigidez, reportando a proporcionalidade existente entre tensões e respectivas deformações específicas na fase de comportamento elástico-linear (BENJAMIN, 2006). Sua avaliação acontece em duas direções principais: paralela e normal as fibras (BENJAMIN, 2006). As propriedades mecânicas definem o comportamento da madeira quando submetida a esforços de natureza mecânica permitindo compará-la com outras madeiras de propriedades conhecidas e por analogia indicar as provas adicionais necessárias para conhecer sua utilização (STANGERLIN et al., 2008).

3.4.1 Densidade

A densidade básica da madeira tem relação direta com outras propriedades e com a composição celular, referente à quantidade e como estão distribuídos os elementos anatômicos da madeira (ROQUE e TOMAZELLO FILHO, 2009). Existem diversos fatores que influenciam na densidade básica da madeira, como a taxa de crescimento das árvores, os aspectos edafoclimáticos, os tratamentos silviculturais, entre outros. A variação pode ocorrer entre árvores da mesma espécie, influenciando na utilização da madeira (LATORRACA e ALBUQUERQUE, 2000).

Meneses et al. (2015) afirmam que a densidade é uma das propriedades mais relevantes da madeira, sendo considerada como um excelente índice de qualidade. Para fins práticos, a densidade básica pode ser indicadora do uso final de produtos madeireiros. Estas propriedades podem ter seus valores modificados por fatores como a idade e sítio. A densidade básica, geralmente eleva-se com o aumento da idade e os fatores climáticos e edáficos, como a disponibilidade hídrica e química do solo podem afetar a capacidade produtiva e o crescimento das árvores, conseqüentemente, a densidade básica.

A teca possui em média uma densidade básica de $0,55 \text{ g/cm}^3$, porém existem variações dependendo do local e da idade. Por exemplo, na Costa Rica, Moya e Arce (2003) encontraram que o valor da densidade básica varia com a idade e no sentido radial do tronco, com valores que vão desde $0,40 \text{ g/cm}^3$ até $0,60 \text{ g/cm}^3$ para idade de 10 anos. Um estudo desenvolvido na Venezuela com teca de 20 anos de idade determinou valores para a densidade básica entre $0,54 \text{ g/cm}^3$ e $0,67 \text{ g/cm}^3$ (VALERO; REYES; GARAY, 2005). A densidade básica está relacionada diretamente com as propriedades físico-mecânicas da madeira, possibilitando estabelecê-la como um padrão para avaliar características como resistência e estabilidade dimensional. No aspecto mecânico, a madeira de teca é resistente aos esforços de tração e flexão semelhante ao mogno brasileiro (IBAMA, 2015).

Lima et al. (2009) avaliando os efeitos do espaçamento e posição radial de amostragem de tronco da madeira de teca observaram que estes fatores influenciaram significativamente a densidade aparente. Ocorreu um aumento

significativo no sentido medula-casca. O mesmo fenômeno foi observado para a retração volumétrica, porém não significativo.

Segundo Blanco-Flórez et al. (2014) a densidade é considerada uma das propriedades físicas mais importantes da madeira, estando relacionado diretamente com outras propriedades como resistência mecânica e estabilidade dimensional. Os autores, trabalhando com teca de 13 anos de idade, encontraram para a densidade aparente um valor médio de 540 kg.cm^3 .

Corrêa Queiroz (2018) estudando a densidade da madeira de teca aos 9 anos de idade de procedências diferentes, sob o mesmo espaçamento, observou diferenças significativas entre as procedências. O cerne apresentou o maior valor médio absoluto para densidade aparente, $529,74 \text{ kg.m}^{-3}$. Porém, para densidade básica a camada intermediária, sentido radial, medula-casca, é a que apresentou o maior valor médio absoluto $449,40 \text{ kg.m}^{-3}$.

Chagas et al. (2014) estudando a madeira de teca aos quatro, seis e 12 anos de idade não observaram diferenças estatísticas entre a massa específica básica, apresentando os valores de $512,0 \text{ kg.m}^{-3}$, $506,0 \text{ kg.m}^{-3}$ e $518,0 \text{ kg.m}^{-3}$ e aparente a 12% de umidade os valores foram de $527,0 \text{ kg.m}^{-3}$, $514,0 \text{ kg.m}^{-3}$ e $522,0 \text{ kg.m}^{-3}$, respectivamente nas idade de quatro, seis e 12 anos. Segundo os autores, isso ocorreu, provavelmente, devido as amostras terem sido retiradas de toras com diâmetro semelhante e com maior porcentagem de madeira juvenil.

3.4.2 Retratibilidade

O conhecimento da retratibilidade da madeira é de fundamental importância para a utilização correta do processo de secagem e destinação do produto final, com o intuito de minimizar ou até eliminar a ocorrência de defeitos na madeira. Outro parâmetro importante é o Índice de Retração Anisotrópica (coeficiente de anisotropia), a razão entre as retrações tangencial e radial (SCANAVACA JUNIOR e GARCIA, 2004).

A madeira mais adequada para usos relacionados a estabilidade dimensional será aquela com menor coeficiente de anisotropia, pois caracteriza-se por apresentar baixas alterações nas dimensões transversais absolutas (PANSHIN e DE ZEEUM, 1980). A qualidade da madeira em função do coeficiente de anisotropia encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Indicação da qualidade e do uso da madeira, em função do coeficiente de anisotropia.

Coeficiente de anisotropia	Qualidade da madeira	Usos
1,2 a 1,5	Excelente	Móveis finos, esquadrias, barcos, aparelhos musicais, aparelhos de esporte, etc.
1,5 a 2,0	Normal	Estantes, mesas, armários, usos que permitam pequenos empenamentos.
> 2,0	Ruim	Construção civil (observadas as características mecânicas), carvão, lenha etc.

Fonte: Nock, Richter e Burguer (1975)

Oliveira (1998) classifica o coeficiente de anisotropia conforme a variação de seus valores. Madeiras que apresentam valores próximo a 1,3 são consideradas de elevada estabilidade dimensional, enquanto aquelas que apresentam valores superiores a 3,0, madeira de alta instabilidade dimensional. Klitzke (2007) faz uso de outra classificação para o coeficiente de anisotropia (CA) em que: $< 1,5$ – madeira considerada muito estável; $1,6 \leq CA \leq 2,0$ – madeira considerada de média estabilidade; $2,0 \leq CA \leq 2,5$ – madeira de média instabilidade; $> 2,6$ – madeira considerada muito instável.

Arruda (2013) buscando informações técnicas do comportamento da secagem da madeira juvenil de *Tectona grandis*, observou que a densidade variou de 401 a 573 $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3}$, a contração radial, de 2,4% a 5,8%; a contração tangencial, de 4,9% a 5,8% e o coeficiente de anisotropia, de 1,82 a 2,14. Conforme, estes resultados, o autor afirma que a contração radial sofre efeito da idade (desbaste) e da posição radial, o mesmo não ocorrendo para a contração tangencial.

Bonduelle et al. (2015) avaliando a massa específica e a retratibilidade da madeira de teca nos sentidos axial e radial do tronco, constataram que a teca possui massa específica aparente a 12% de $606,0 \text{ kg.m}^{-3}$, massa específica básica de $524,0 \text{ kg.m}^{-3}$ e fator anisotrópico de 2,271, não sendo observadas grandes variações de propriedades tanto no sentido axial quanto no radial. As propriedades físicas demonstram que a madeira possui média estabilidade dimensional.

Dias et al. (2017) visando de determinar a densidade básica, o colapso, a retração, e o coeficiente de anisotropia da madeira de teca e estudar a associação entre as referidas propriedades físicas, com a finalidade de definir sua qualidade, observaram retração volumétrica parcial (3,6%) e total (5,23%) apresentando comportamento estável, justificando o baixo valor de coeficiente de anisotropia (1,99%), indicando estabilidade dimensional satisfatória.

Blanco-Flórez et al. (2014) determinando algumas propriedades físicas e mecânicas de madeiras jovens de *Tectona grandis* L. f. e comparando-as com dados observados em madeira de plantações das espécies em outros lugares ao redor do mundo, demonstraram que, apesar de ser madeira jovem, as características da madeira das plantações de teca no Brasil são semelhantes às madeiras adultas de teca de outros locais de plantio; determinou-se um alto teor de cerne, alta estabilidade dimensional e maior rigidez, comparada com a encontrada na literatura para essa faixa etária, o que a torna adequada para uma variedade de usos.

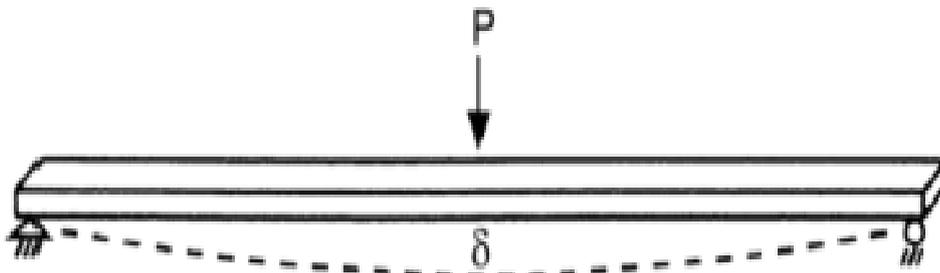
3.5 Métodos Mecânicos - Módulo de Elasticidade e Módulo de Ruptura

O módulo de elasticidade de um material é uma propriedade fundamental de todo material estável. No entanto, a estabilidade do material é depende da força e pressão exercida sob o material. O MOE é a rigidez de um material. Em outras palavras, é com que facilidade ele é dobrado ou esticado. Quando o material alcança uma certa tensão, este começara a deformar. Até indicar o ponto onde o material irá alongar e não se romper (MAPPUJI, 2017) e a partir deste ponto 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), refletindo a capacidade máxima de carga de um corpo de prova na flexão do módulo de elasticidade, (MOR) e é proporcional ao momento máximo suportado pela amostra.

O método mais comum para avaliar o MOE estático é o teste de flexão estática. Resumindo, para mensurar o MOE associado aos métodos de flexão estáticos, é um procedimento relativamente simples que envolve a relação carga-deflexão em um feixe simplesmente suportado. Módulo de elasticidade pode ser calculado diretamente usando equações derivadas da mecânica fundamental dos materiais. Este método é amplamente implementado em alguns equipamentos comercialmente disponíveis. Existem dois testes de flexão comumente usados, isto é, configuração de carregamento de ponto central e configuração de flexão de dois pontos alternativos (ROSS, 2015).

Figura 7 - Teste de flexão com carregamento no ponto central.



Fonte: Mappuji (2017).

Segundo Scarparo (2015) este ensaio consiste em apoiar o corpo de prova em dois pontos distanciados de um comprimento (L) e aplicar lentamente uma força de flexão (F) no centro da distância entre os dois pontos. Durante o ensaio a força (F) é aumentada gradativa e constantemente durante a qual é feita a medição do deslocamento (flexão) em dado momento até a ruptura do material. O módulo de ruptura (MOR) e o módulo da elasticidade (MOE) são dois parâmetros normalmente determinados em teste de flexão estática e são de grande importância na caracterização tecnológica da madeira. Ambos estimam a resistência do material submetido a uma força aplicada perpendicularmente ao eixo longitudinal da peça.

Scaparo (2015) trabalhando com teca com 5 e 12 anos de idade, proveniente da região de Goiás, observou que os ensaios mecânicos apresentaram valores inferiores aos referenciados na literatura. A autora atribui o fato à diferença de idade das madeiras, questões de clima, relevo, solo e de práticas de manejo.

Blanco-Flórez (2012) avaliando as propriedades mecânicas da teca aos 13 anos de idade observou que a madeira de teca jovem apresentou boas propriedades mecânicas, representado principalmente pelo módulo de elasticidade (MOE) em flexão estática, cujo valor foi de 133040 kgf.cm². Segundo a autora apesar da madeira ser jovem, a sua resistência mecânica é superior a determinada em estudos com teca de outras idades, a presença de madeira juvenil parece não influenciar o desempenho mecânico da madeira.

Blanco-Flórez et al. (2014) a *Tectona grandis*, proveniente da região noroeste de estado de Minas Gerais, com 13 anos de idade, as propriedades física e mecânica, assim como Bhat e Priya (2004) para teca proveniente de três locais na Índia, Konni, Nilambur e norte de Kanara, com 65 anos e 21 anos de idade para os dois locais, observaram que as diferença ocorrida entre esses dois sítios, foi devido a uma alta percentagem de parênquima e baixa percentagem de fibras apresentado pelo sítio Kanara.

Isekor et al. (2010), trabalhando com madeira de *Tectona grandis*, com 15, 20 e 25 anos de idade, proveniente de reserva florestal, Edo, Nigéria, observaram os valores médios para o MOE e o MOR aumentaram com a idade, o que foi atribuído ao incremento de anéis de crescimento e à adição de madeira mais madura e a idade cambial.

Crespo et al. (2008), analisando as propriedades físico-mecânicas de teca, proveniente de Quevedo e Balzar, aos 22 e 18 anos de idade, observaram os melhores resultados para o MOE e MOR para a teca da região de Quevedo ocorreram devido as condições ambientais diferentes. Montero et al. (2015), constataram variações para o MOE e MOR para *Tectona grandis* na Costa Rica, relacionadas as condições climáticas e a fertilidade do solo.

Zahabu et al. (2015) observaram para *Tectona grandis*, no plantio florestal de Longuza, Tânzania, sob três espaçamentos não apresentaram diferença significativa entre os espaçamentos, afirmando que isso ocorreu devido os plantios terem a mesma origem. Hounlonon et al. (2017), observaram para a *Tectona grandis*, proveniente de Benin e Tanzânia, com idade entre 20 e 25 anos, valores de MOE de 14.628,0 Mpa e 12.913,0 Mpa, respectivamente.

3.6 Técnicas de Avaliação Não Destrutiva e Destrutivas da Madeira

O ensaio não destrutivo (END) é definido como o método técnico para examinar materiais ou componentes de maneira que não prejudiquem a utilidade futura e a capacidade de manutenção. END pode ser usado para detectar, localizar, medir e avaliar falhas; avaliar integridade, propriedades e composição; e medir características geométricas (ASTM E1316).

Esforços significativos foram dedicados ao desenvolvimento de tecnologias robustas de avaliação não destrutiva, capazes de prever as propriedades intrínsecas da madeira de árvores individuais e avaliar a qualidade da madeira por povoamento e floresta. O uso dessas tecnologias não apenas leva a uma maior lucratividade para a indústria florestal, mas também pode ajudar os silvicultores a tomar decisões sábias de manejo e cultivar madeira de alta qualidade em primeiro lugar (WANG et al., 2008).

As primeiras pesquisas relativas à aplicação de ensaios não destrutivos na determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira foram realizadas na década de 1950, nos Estados Unidos. Ainda que esse país detenha a primazia de conhecimentos nessa área específica, alguns outros como Suíça, Romênia, Alemanha, Japão e Reino Unido, também já se destacam nesse cenário (TARGA et al., 2005; ALMEIDA et al., 2012).

Dentre estes métodos podem ser citados a classificação visual (amplamente utilizado), testes químicos (defeitos biológicos), “*stress wave*”, ultra-som, métodos de deflexão, testes de propriedades elétricas, radiações gamas, penetração de radiação e método de raios-x (MORALES, 2006). Os mais utilizados para a análise em madeira e seus derivados são o “*stress wave*” e o ultra-som (BODIG, 2001).

Metodologias não destrutivas de ensaios têm sido amplamente utilizadas na obtenção do módulo de elasticidade longitudinal em peças de madeira de dimensões estruturais, ressaltando-se o uso do ultrassom e da vibração transversal, enfatizando a simplicidade e eficiência do emprego de tais metodologias, justificadas pela possibilidade de uso da peça depois de ensaiada (ROSS et al., 1998; ERIKSON et al., 2000; OLIVEIRA et al., 2002; MINÁ et al., 2004; WANG et al., 2008; LIANG e FU, 2007; DONG e HAI, 2011; SALES et al., 2011; CHRISTOFORO et al., 2013).

3.6.1 Técnicas de tensão/ acústicas

3.6.1.1 Ondas de tensão

O método acústico baseado em ressonância é uma técnica não destrutivo de avaliação (NDE) para medir peças de madeira longas e delgadas, como troncos, postes, etc (ROSS, 2015). A precisão inerente e a robustez desse método proporcionam uma vantagem significativa sobre a medição ultrassônica (baseada no tempo de deslocamento). Em contraste com a abordagem ultrassônica, o método de ressonância estimula muitas, possivelmente centenas, de reverberações de pulsos acústicos em uma madeira, resultando em uma medição de velocidade repetível muito precisa (MAPPUJI, 2017). Este foi um dos primeiros métodos não-destrutivos investigados para a determinação do módulo de elasticidade da madeira. Apesar de sua concepção simples, e a despeito dos grandes avanços obtidos nessa área com outros métodos, o método revela-se como de grande potencial de aplicação, sobretudo pela precisão do modelo matemático a ele associado e pela possibilidade de sua aplicação em peças de dimensões estruturais (*in-grade testing*) (BALLARIN, TARGA e PALMA, 2002; CANDIAN e SALES, 2009).

Na técnica de vibração longitudinal, a frequência de vibração longitudinal do material também é associada à rigidez na flexão (PITER et al., 2004). Os métodos de ensaios não destrutivos citados estão se tornando cada vez mais relevantes, uma vez que são capazes de oferecer respostas rápidas e correlações lineares elevadas (em média, da ordem de R^2 igual a 0,8), e o custo dos equipamentos necessários aos ensaios vem caindo ao longo dos últimos anos (SEGUNDINHO et al, 2012).

O módulo de elasticidade na flexão pode ser medido diretamente por meio do ensaio de flexão estática de acordo com a norma NBR 6231 (ABNT, 1980) ou estimado por meio de ensaios dinâmicos como a vibração transversal. Essa técnica tem demonstrado boa exatidão na estimativa da rigidez à flexão de peças estruturais de madeira serrada (CARREIRA e DIAS, 2009).

3.6.1.2 Ondas Ultrassônicas

A determinação das propriedades mecânicas da madeira usando a propagação de ondas ultra-sônicas é baseada na relação entre a velocidade do som, o módulo de elasticidade e a densidade (CANDIAN E SALES, 2009; TELES, 2014). A medição da velocidade ultra-sônica e a atenuação é de valor considerável quando se investiga a estrutura de madeira maciça e materiais à base de madeira, para avaliação de suas propriedades mecânicas e no desenvolvimento de sistemas não destrutivos de avaliação (BUCUR e FEENEY, 1992).

Na madeira, alguns fatores que influenciam a propagação de ondas ultra-sônicas são: propriedades anatômicas, físicas, morfológicas (tipos de lenhos e ângulo de grã), presença de defeitos (nós e rachaduras), geometria das amostras, condições do meio (temperatura e umidade relativa) e procedimento utilizado para tomada das medidas (frequência e tipo de transdutor) (CALEGARI, 2006).

A propagação das ondas ultrassônicas, segundo o eixo longitudinal, varia na direção medula-casca (SHIMOYAMA, 2005). A madeira adulta, próxima à casca, apresenta maior percentual de lenho tardio, fibras mais espessas, menor diâmetro de lume e é mais densa, proporcionando maior velocidade das ondas ultrassônicas (SHIMOYAMA, 2005). Bucur (1995) salientou que a velocidade das ondas é maior na madeira próxima a casca, porém a maior ascensão é verificada na madeira próxima à medula. Jang (2000) ao estudar as propriedades de tora por meio de métodos não-destrutivos, observou um aumento na velocidade das ondas ultra-sônicas no sentido medula-casca. Segundo o autor esta variação se deve à maior massa específica da madeira próxima à casca.

Diversos estudos utilizando ensaios ultrassonoros para obter o módulo de elasticidade dinâmico vem sendo realizados para estimar as propriedades mecânicas da madeira setor florestal, para a madeira de *Eucalyptus cloeziana* estabeleceram que o método do ultrassom é uma importante ferramenta para inferência não destrutiva do módulo de elasticidade e de ruptura da madeira, sendo o método ultrassonoro eficiente por avaliar, de forma rápida e eficaz, as diferenças relativas à qualidade da madeira Vivian et al. (2012 a b); para a madeira de maçaranduba Rosa et al. (2014), determinaram que os métodos não destrutivos de vibração transversal e *stress wave* obtiveram boa estimativa do módulo de elasticidade estático; para compostos de LVL produzidos com a madeira de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke) as propriedades físicas e mecânicas apontaram que o uso do ultrassom como uma ferramenta eficaz para a predição para o módulo de elasticidade dinâmico (MELO e DEL MENEZZI, 2016); Ribeiro et al. (2016) afirmam que os métodos de ondas de tensão e ondas ultrassonoras mostram-se eficiente e uma importante ferramenta para a inferência não destrutiva do módulo de elasticidade da madeira e Stangerlin et al. (2017) conclui que o módulo de elasticidade dinâmico obtido por meio dos ensaios de ultrassom foram eficiente na predição dos módulos de elasticidade e de ruptura à compressão paralela.

Iwakiri et al. (2013) estimando o módulo de elasticidade dinâmico nas diferentes posições das árvores de *Tectona grandis* por meio da aplicação de ondas de tensão obtiveram para essa valores de MOEd superiores em relação às madeiras de espécies de *Pinus* referenciados na literatura, possivelmente devido a maior massa específica e menor ocorrência de nós. Os valores do MOEd (dinâmico) obtidos para a madeira de *Tectona grandis* a partir do *stress wave*, foram similares ao da literatura. No entanto, em alguns casos também foram superiores aos valores obtidos na literatura para esta mesma espécie. Foi constatado aumento nos valores médios de MOEd, apresentaram os valores de 13.187 MPa, 14.206 MPa e 15.000 MPa, respectivamente, nos sentidos longitudinal (base, meio e topo), e no sentido radial os valores foram de 13.341 MPa e 14.993 MPa (medula para casca) das árvores.

Silva (2010) avaliando a influência da densidade de plantio nas propriedades físicas e na elasticidade (módulo de elasticidade dinâmico-MOEd), observou que densidade de plantio influenciou significativamente a densidade aparente da madeira

de *Tectona grandis* L.f.; assim como, o MOEd, aumentou com a diminuição da densidade de plantio. Com a densidade do plantio de 834 árv.ha⁻¹, 1000 árv.ha⁻¹ e 1250 árv.ha⁻¹, respectivamente, os valores para densidade aparente foram de 576 kg.m⁻³, 562 kg. m⁻³ e 553 kg. m⁻³, o MOEd foram de 8915,01 MPa, 7737,91 MPa e 6993,05 MPa.

3.7 Espectroscopia no Infravermelho Próximo nom Transformada de Fourier (FT-NIR)

3.7.1 Espectroscopia NIR aplicada à indústria de base florestal

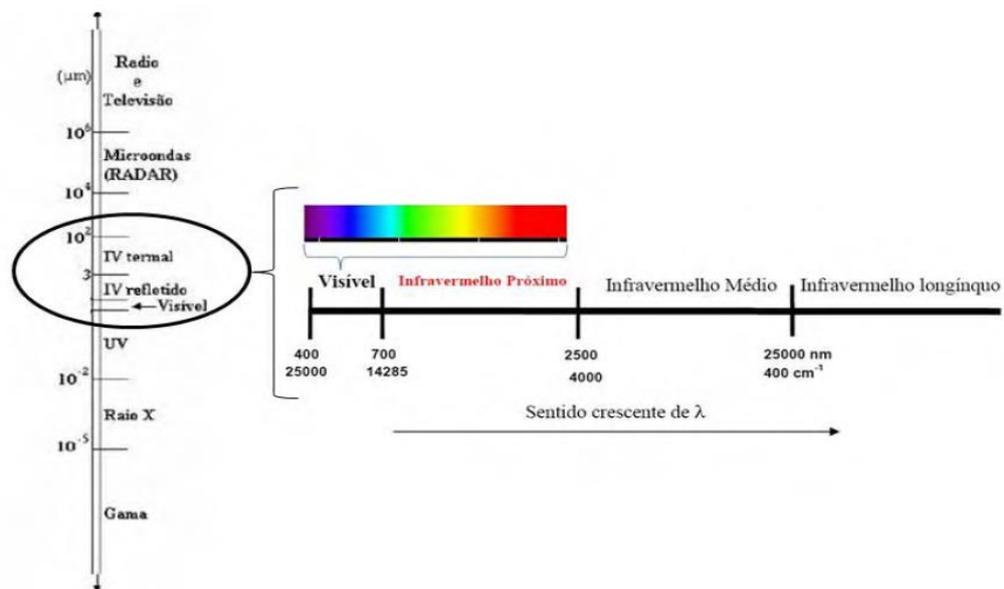
A espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS ou NIR) vem sendo utilizada como método não destrutivo que permite obter informações qualitativas e quantitativas dos constituintes da biomassa através da interação das ondas eletromagnéticas do infravermelho próximo com a amostra. A técnica está presente em praticamente todas as áreas, devido ao nível de desenvolvimento que esta tecnologia atingiu nos últimos anos. A espectroscopia NIR tem se mostrado uma ferramenta rápida e eficiente para substituição dos diversos ensaios que determinam a qualidade da madeira (MUÑIZ et al., 2012).

Conforme Hein et al. (2012) a metodologia está sendo empregada no setor florestal desde 1988, para caracterização tecnológica de madeiras e seus produtos. A literatura científica evidencia uma série de estudos neste campo, como a utilização para determinar as propriedades físico-mecânicas do papel industrial kraft (SAMISTRARO et al. 2009); as propriedades física e mecânicas da madeira de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* (HEIN et al. 2009); propriedades teor de extrativos totais, lignina total e holocelulose da madeira de um híbrido natural de *Eucalyptus urophylla* (ANDRADE et al. 2010); para acompanhar a variação do teor dos compostos químicos ao ataque do fungo *Trametes versicolor* e *Gloeophyllum trabeum* (COSTA et al. 2011); para estimativa do ângulo microfibrilar de celulose na parede secundária (HEIN e LIMA, 2012); para estimar as propriedades física-mecânicas em 20 espécies nativas (RIBEIRO, 2017), demonstrando assim a diversidade de aplicação da espectroscopia NIR para a madeira.

3.7.2 Espectroscopia

Espectroscopia, de uma maneira geral, é o estudo da interação de radiação eletromagnética (ou fótons) com a matéria. A radiação eletromagnética se distribui em diversas regiões de energia que correspondem a diferentes técnicas de espectroscopia. Assim, existe espectroscopia no infravermelho, visível e ultravioleta. Sendo que o olho humano é sensível à apenas uma pequena faixa de frequências, a região da luz visível do espectro eletromagnético (MILAGRES, 2009).

Figura 8 - Espectro da radiação eletromagnética mostrando a região do visível e a região do infravermelho.



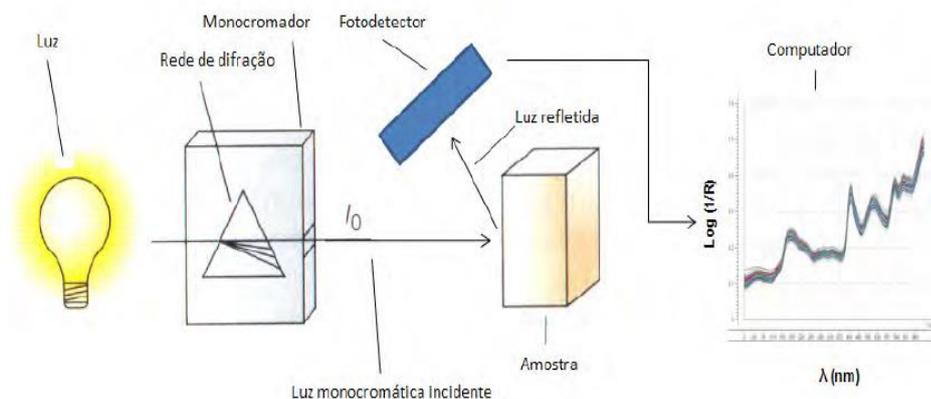
Fonte: Milagres (2009).

Segundo Hein (2008) o princípio de qualquer espectroscopia é a interação de uma radiação eletromagnética e a matéria constituinte da amostra. Um exemplo bastante próximo do cotidiano das pessoas é o forno de microondas caseiro: as microondas contêm baixa energia e, ao interagirem com o material que contém água, são capazes de induzir movimentos rotacionais nas moléculas de água, que resultam em aquecimento térmico. Já os raios X e gama têm muita energia e, por isso, as pessoas não devem ficar expostas a essas radiações.

3.7.3 Espectroscopia na região do infravermelho próximo (NIRS ou NIR)

O “*Near-Infrared Spectroscopy*” (NIRS) ou espectroscopia no infravermelho próximo é a medição da intensidade da absorção/reflexão de luz infravermelha próxima, na faixa de 780 a 2500nm (PASQUINI, 2003; NISGOSKI, 2005; MILAGRES, 2009; MUÑIZ et al. 2012; TSUCHIKAWA e KOBORI, 2015), em relação ao comprimento de onda, incidente na amostra. É tipicamente usada na medição quantitativa de absorção/reflexão um espectrofotômetro, que consiste de uma fonte luminosa, um monocromador, que contém o seletor de comprimentos de onda do tipo de grupos funcionais orgânicos, especialmente O-H, N-H, e C=O, uma rede de difração, um receptáculo para amostras, um fotodetector e uma impressora ou computador. O comprimento de onda selecionado pelo monocromador pode ser alterado por rotação da rede de difração. O gráfico de reflectância ($\log 1/R$) versus comprimento de onda (λ) é denominado espectro (PASQUINI, 2003; NISGOSKI, 2005; MILAGRES, 2009).

Figura 9 - Esquema de espectrofotômetro de reflectância.



Fonte: Milagres (2009).

Quando a radiação no infravermelho próximo é refletida por uma molécula, faz seus átomos vibrarem com maior amplitude, de maneira similar a um oscilador diatômico. Os espectros NIR contêm informações relacionadas com a diferença entre as forças de ligações químicas, espécies químicas presentes, eletronegatividade e a ligação de hidrogênio (CARNEIRO, 2008). Ou, seja, na

madeira, a radiação NIR interage com as ligações de C-H, C-O, ligações CO-H e também com a água, que está presente na madeira (LESTANDER et al., 2008). É possível desta forma a obtenção de informações qualitativas e quantitativas dos constituintes químicos da biomassa em virtude da interação da onda eletromagnética no infravermelho próximo com os constituintes químicos da amostra (PASQUINI, 2003).

Para a área florestal o emprego da técnica do infravermelho próximo permite a caracterização rápida, fácil e precisa, reduzindo os custos e o tempo como análises convencionais em laboratórios. Geralmente, estes ensaios são feitos por amostragem, usando métodos tradicionais que são, na sua maioria, onerosos, laboriosos e destrutivos, impedindo muitas vezes a utilização futura do material. Para as indústrias de base florestal isto dificulta a realização de um controle minucioso da qualidade de seus produtos (MUÑIZ et al. 2012).

3.7.4 Quimiometria

A quimiometria pode ser definida como uma disciplina química que usa matemática e estatística que relaciona as medidas efetuadas num sistema ou processo químico, ao estado do sistema utilizando métodos matemáticos e/ou estatísticos, permitindo obter o máximo de informação química relevante através da análise de dados químicos (ROGGO et al, 2007; JACONI, 2011).

A quimiometria é utilizada para filtrar informação que se correlaciona com uma certa propriedade de uma grande quantidade de dados. Na análise NIR qualitativa e quantitativa, a parte relevante dos dados multivariados dos espectros é extraída sem perder informação importante, livrando-se de informação indesejada (interferências ou ruído) (MAGALHÃES, 2014).

Desta forma a espectroscopia de infravermelho próximo e a quimiometria andam lado a lado, pois os espectros gerados possuem muita informação e são muito complexos na maioria dos casos, tornando a análises destes muito complicada. A aplicação de técnicas matemáticas e estatísticas associada à computação sobre estes

dados (quimiometria), conseguem absorver as informações essenciais contidos nos espectros (SOUZA et al., 2013). E através de técnicas de análises multivariadas de calibração como regressão por PLS (Regressão por Mínimos quadrados Parciais), modelos podem ser construídos para os mais diversos fins, pois estes métodos são essenciais para o NIRS (BALABIN, SAFIEVA e LOMAKINA, 2007).

3.8 ANÁLISE MULTIVARIADA

3.8.1 Pré tratamento espectral

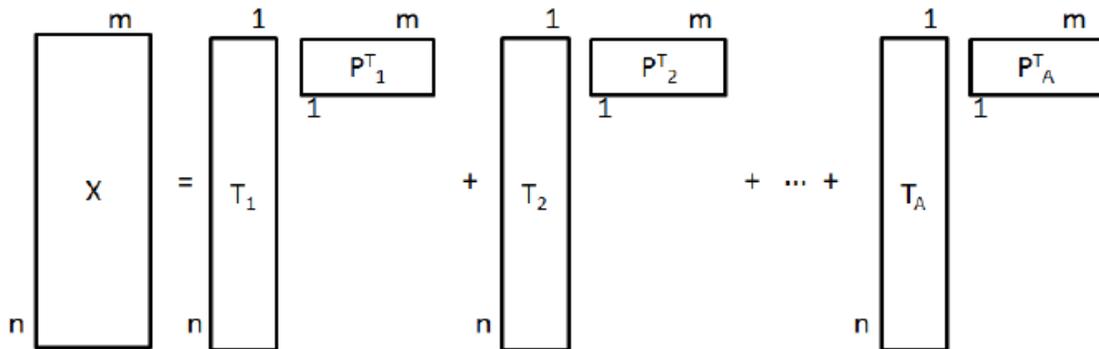
Uma vez obtidos os espectros no NIR das amostras selecionadas, é necessário a aplicação de um pré-tratamento espectral. Os espectros apresentam ruídos que são informações estranhas que afetam o limite de detecção, precisão e exatidão. Desta forma há melhorias significativas nos modelos de calibração, pois eliminam, reduzem ou padronizam o impacto de fatores não desejáveis. Os pré-tratamentos aplicados consistem em normalização (divide cada intensidade do espectro pela média); 1° e 2° derivada de Savistisky-Golay; suavização (*Smoothing*); correção da linha de base (*Baseline*); correção do espalhamento multiplicativo (*Multiplicative Scatter Correction*); escalonamento e filtragem para remoção do ruído; variação de padrão normal (*Standard Normal Variate - SNV*) (SANDAK et al. 2016; RIBEIRO, 2017).

Os principais objetivos da aplicação das técnicas de pré-processamento são eliminar informações não relevantes e tornar a matriz de dados melhor condicionada para a análise, possibilitando a subsequente análise exploratória do conjunto de dados com eficiência (SOUZA e POPPI, 2012).

A análise de componentes principais (PCA – *principal component analysis*), muito utilizada em análises com dados de NIR, é um tipo de análise exploratória de dados que visa extrair o máximo das informações de uma Tabela convertendo-a em gráficos que mostram a relação entre amostras (linhas de uma matriz) e as variáveis (colunas de uma matriz) (BEEBE e KOWALSKI, 1987). O que um PCA faz é descobrir novas variáveis, i.e., os *Principal Components* (PCs), os “componentes principais”, que consigam reunir a maioria da variabilidade dos dados. Ou seja, cada componente

principal é calculado de forma a reter a maior quantidade de variância presente nas variáveis originais. Isto permite-nos descrever a informação com menos variáveis do que as originalmente presentes (DAVIES e FEARN, 2004).

Figura 10 - Representação esquemática da decomposição por PCA.



Fonte: Autor (2019).

Pelo procedimento de PCA a matriz de dados, X , é decomposta utilizando a equação:

$$X = TP^t + E$$

A matriz de espectros original X , formada por m linhas (amostras) n colunas (variáveis), é decomposta em duas matrizes de variações: a matriz de *loadings* (pesos) e a de *scores* (escores). A matriz de *scores* é constituída de m linhas e d colunas, onde d corresponde ao número de componentes principais. A matriz de *loadings* é constituída de d linhas e n colunas. Os espectros originais podem ser considerados como combinações lineares das variações dos espectros (pesos) onde os escores representam a contribuição de cada espectro original (BURNS e CIURCZAK, 2008).

Desta forma a PCA mitiga redundâncias e reduz a dimensionalidade do conjunto de variáveis utilizadas na observação do sistema criando uma nova base, cujas componentes são linearmente independentes e em menor número, a partir das principais componentes apontadas pela PCA dentre o conjunto inicial de dimensões.

Esses novos componentes são ordenados de modo a manter a maior parcela da variância original nos primeiros componentes (ROSSI, 2017).

3.8.2 Métodos de regressão por mínimos quadrados parciais (PLS)

A regressão por mínimos quadrados parciais (PLS – do inglês, *Partial Least Squares*) é considerada o método de regressão mais utilizado para a construção de modelos de calibração multivariada a partir de dados de primeira ordem (VALDERRAMA, 2005). Fornece modelos que relacionam os blocos de variáveis X e Y. Deste modo, as informações das medidas espectrais e das concentrações ou propriedades são utilizadas simultaneamente na fase da calibração. É baseado no método PCA e utiliza as componentes principais para modelar os diferentes analíticos e interferências nos dados de X (MUÑIZ et al. 2012).

As variáveis dependentes, Y (dados analíticos), intervêm diretamente na decomposição, em componentes principais, das variáveis independentes, X (espectros). O desenvolvimento de um modelo PLS envolve usualmente duas fases. Na primeira fase, a de calibração, são estimados os parâmetros do modelo de regressão multivariada a partir das matrizes conhecidas, X e Y. Na segunda fase, a de previsão, o modelo estabelecido é usado num novo conjunto de dados, X' com o objetivo de prever novos valores, Y' (sem recurso aos métodos analíticos de referência) (SANTOS, 2007).

3.8.3 Calibração e validação

A regressão baseada em PLS segue as etapas de calibração (na qual são utilizados os espectros de absorção das amostras do conjunto de calibração para a construção de um modelo matemático que melhor ajuste os dados espectrais aos valores de referência do parâmetro desejado); a validação interna (que avalia o erro de previsão de amostras que pertencem ao conjunto de calibração, também conhecida como validação cruzada); e validação externa (na qual se avalia o poder de previsão do modelo construído utilizando amostras externas ao conjunto ou que não participaram da etapa de calibração. Esse conjunto de amostras é conhecido também como conjunto de validação). A etapa de validação é extremamente importante, pois os resultados dessa etapa indicarão se o modelo construído é adequado ou não para efetuar a determinação do parâmetro desejado. Para avaliar a qualidade do modelo matemático construído, são encontradas as estimativas dos erros de previsão das amostras do conjunto de calibração (validação interna) ou de um conjunto de amostras que não participaram da calibração (validação externa). A esse grupo de amostras externa dá-se o nome de conjunto teste (SCAFFI, 2005; HEIN, 2008; HEIN et al. 2009).

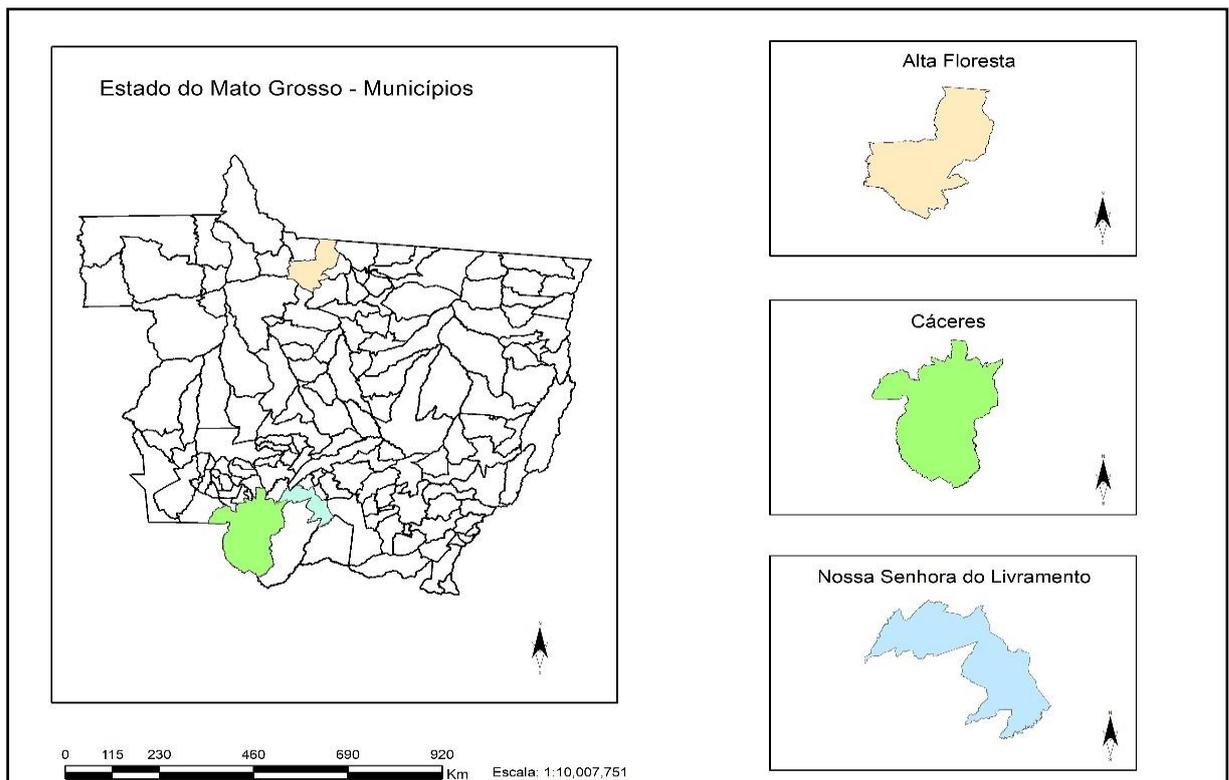
4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Localização das Áreas de Estudo

As amostras de madeira estudadas neste trabalho foram obtidas três árvores de teca (*Tectona grandis* L. f.) provenientes de plantios comerciais, localizadas nos municípios de Alta Floresta, Nossa Senhora do Livramento e Cáceres (Figura 11).

O município de Alta Floresta encontra-se ao norte do estado do Mato Grosso, sob o domínio do Bioma Amazônico, com vegetação predominante de floresta ombrófila aberta e densa, floresta estacional e cerrado. Os municípios de Cáceres e Nossa Senhora do Livramento pertencem a zona fisiográfica do pantanal matogrossense, com vegetação predominante de cerrado e terreno plano.

Figura 11 - Localização das áreas de estudo no Estado do Mato Grosso.



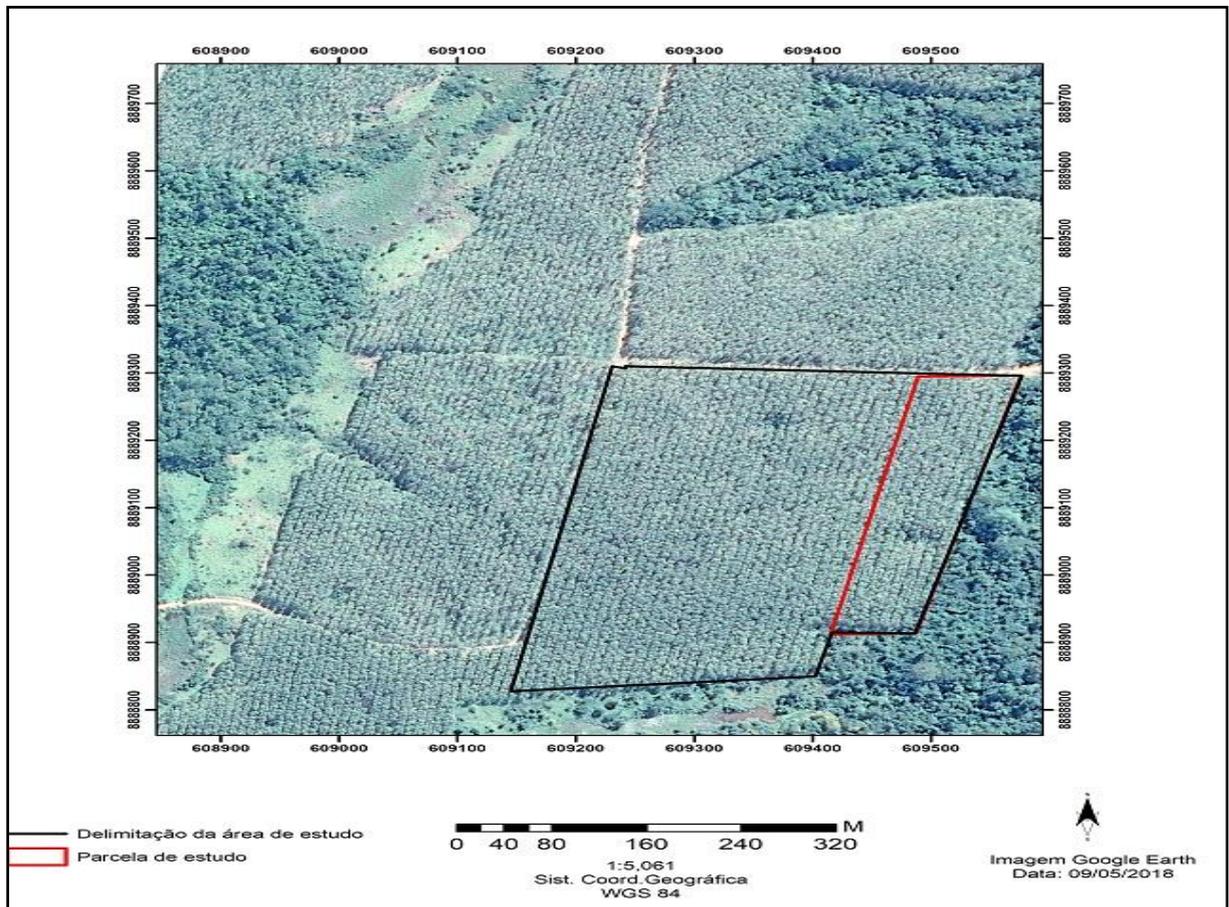
Fonte: Autor (2019)

4.2 Caracterização dos Sítios dos Plantios Amostrados

4.2.1 Caracterização do sítio I – Alta Floresta

No município de Alta Floresta o estudo foi desenvolvido na Fazenda IDC (Figura 12), em um povoamento homogêneo de *Tectona grandis* L.f., com idade de 14 anos, no período em que a madeira para estudo foi coletada. Com área de plantio de 1.204,25 ha, dividida em quatro plantios, subdivididos em 49 talhões. A parcela de estudo apresentou uma área de 147.241,96 m², e um espaçamento de 3,0 x 2,2 m.

Figura 12 - Localização do Povoamento de *Tectona grandis* na Fazenda IDC, em Alta Floresta.



Fonte: Autor (2019).

No município de Alta Floresta o clima é caracterizado por duas estações, sendo seca e chuvosa: a seca ocorrendo entre os meses de maio a setembro e a chuvosa entre os meses de outubro e abril. A temperatura média anual de 24°C a 26°C e média

máxima de 38°C a 40°C (BRASIL, 1980). Com relação aos índices pluviométricos, a região apresenta uma média anual de 2700 mm na confluência dos Rios Juruena e Teles Pires. O solo na região do plantio é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd). A textura varia de franco-arenosa a franco-argilo-arenosa, solos profundos a pouco profundos, moderado a bem drenados. Possui mais de 50% de sua capacidade de troca ocupada pelo hidrogênio e alumínio. As principais restrições são relacionadas à fertilidade, em alguns casos, e susceptibilidade à erosão (EMBRAPA, 2006). A seguir apresenta-se a análise químicas deste solo (Quadro 1).

Quadro 1- Análise química do solo para sítio de Alta Floresta.

Prof.	pH CaCl ₂	Ca+Mg	Al	H+Al	P	K	argila	silte	areia	MO	SB	TpH7,0	t [†] efetiva	V	m
		cmolc.dm ⁻³			mg.dm ⁻³		g.kg ⁻¹				cmolc.dm ⁻³		%		
0-20	4.77	2.66	0.39	3.47	0.99	24.09	467.96	85.24	446.80	9.47	2.72	6.18	3.11	44.14	12.90
0-40	4.85	2.18	0.50	3.80	0.44	27.90	553.20	74.04	372.76	10.50	2.25	6.05	2.75	37.45	18.33

O estabelecimento do plantio teca em Alta Floresta se deu através de sementes. As sementes utilizadas no plantio foram procedentes da empresa Cáceres Florestal. O plantio foi feito a partir de mudas do tipo *stump* produzidas pela própria empresa, implantada no período de chuvas da região. A condução do plantio procedeu-se da seguinte forma: no primeiro ano efetuou-se a limpeza dos talhões, e replantio em casos de mortalidade superior a 20%; do segundo ao quarto ano foi feita a limpeza com uso de roçadeira, e aplicação de herbicida para o combate de gramíneas. Nesse período também foram realizados a desrama e o desbaste das árvores sem aproveitamento comercial. A partir do quinto ano, manteve-se a desrama até que o fuste comercial atingisse uma altura de 8 metros e a roçada a cada dois anos. Os desbastes foram efetuados no 6º ano (efetuou-se o primeiro desbaste com intensidade de 25%) e o segundo no 11º ano, com a mesma intensidade.

4.2.2 Caracterização sítio II – Cáceres

De caráter experimental, o plantio de teca em Cáceres foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), instalado

pela Faculdade de Engenharia Florestal UFMT, na Escola Agrotécnica Federal de Cáceres, atual Instituto Federal de Cáceres, MT. A área experimental consistiu em oito espaçamentos, em quatro fileiras simples: 3 x 2 m, 4 x 2 m, 5 x 2 m e 6 x 2 m e quatro fileiras duplas: 3 x 2 x 2 m, 4 x 2 x 2 m, 5 x 2 x 2 m e 6 x 2 x 2m. Escolhida de forma aleatória, através de sorteio, a área de estudo deste trabalho foi a da parcela de espaçamento 5 x 2 m (Figura 13), com área de 4.923,37 m². Este plantio estava com 16 anos à época da coleta.

Figura 13 - Localização do Povoamento de *Tectona grandis* no Campus Experimental do IFMT- Cáceres.



Fonte: Autor (2019).

O município de Cáceres integra a mesorregião do Centro-Sul mato-grossense e a microrregião do Alto Pantanal, distando 215 km da capital. O clima, segundo classificação de Köppen, é tropical quente e úmido, com inverno seco (Awa), temperatura média anual de 25°C e precipitação média de 1.396 mm.ano⁻¹. Sendo o período de janeiro a março mais úmido e o período entre setembro e outubro é o de maior índice de radiação solar e de mais baixa precipitação (AGUINALDO SILVA et

al., 2008). O solo desta área é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média, solos bem drenados, sendo muito profundos e uniformes em características de cor, textura e estrutura. Apresentam limitações de ordem química em profundidade ao desenvolvimento do sistema radicular. Em condições naturais, os teores de fósforo são baixos, sendo indicada a adubação fosfatada, havendo baixa quantidade de água disponível às plantas. Caracterizando-se como solos de baixa fertilidade, solos com saturação por bases baixa ($V < 50\%$) na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA), baixa a média CTC (EMBRAPA, 2006). O Quadro 2 apresenta as análises químicas do solo para o sítio Cáceres.

Quadro 2 - Análise química do solo para o sítio Cáceres.

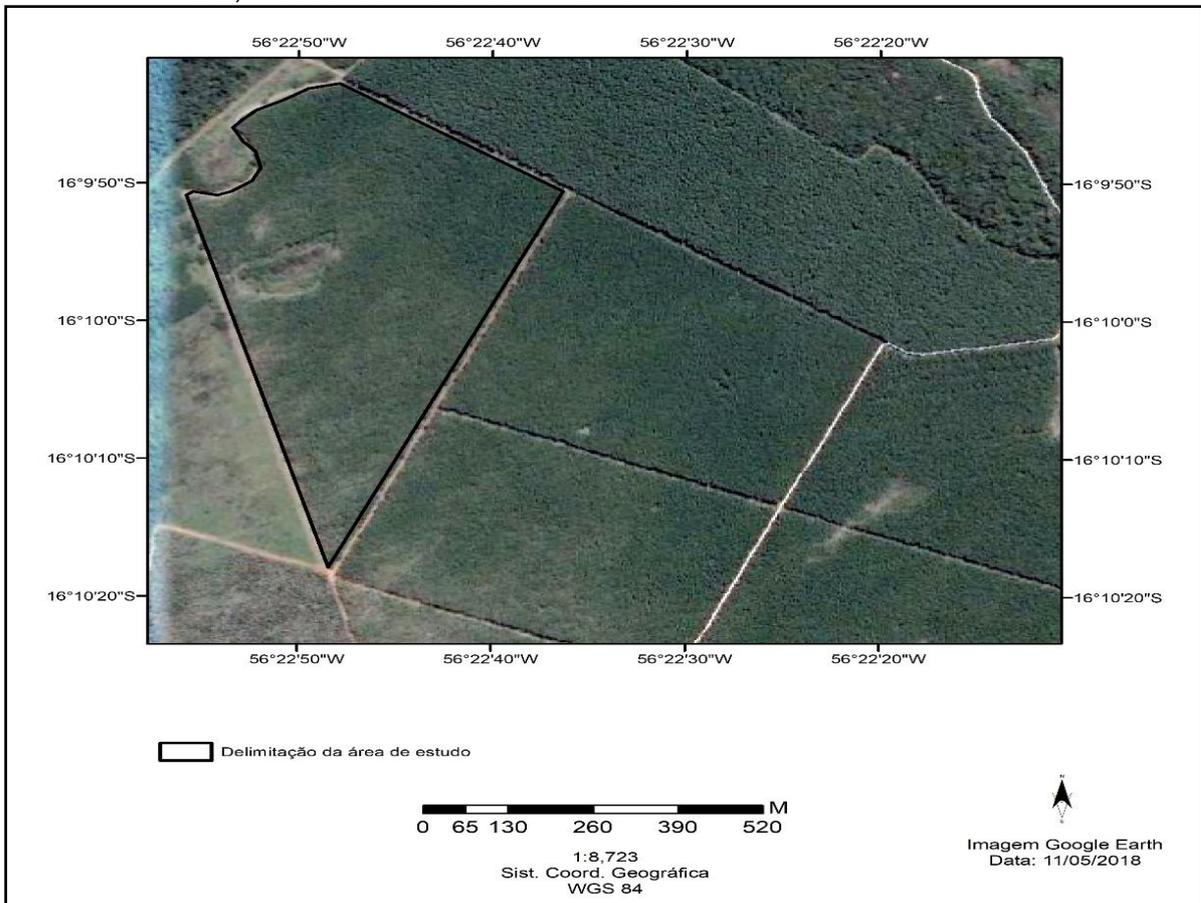
Prof.	pH CaCl ₂	Ca+Mg	Al	H+Al	P	K	argila	silte	areia	MO	SB	TpH7,0	t ^t efetiva	V	m
		cmolc.dm ⁻³			mg.dm ⁻³		g.kg ⁻¹			cmolc.dm ⁻³		%			
0-20	4.72	2.93	0.42	1.78	3.09	49.45	164.26	88.84	746.88	4.11	3.06	4.84	3.48	62.54	13.06
0-40	4.38	2.60	0.34	1.96	1.72	34.23	190.17	59.20	750.62	6.38	2.68	4.65	3.03	57.75	11.69

A área anteriormente era ocupada por pastagem degradada de capim-colonião (*Panicum maximum*), o terreno foi preparado com duas passagens de grade pesada, enleiramento das touceiras do capim, e com passagem de grade leve para nivelamento. As mudas de teca utilizadas foram do tipo toco (“*stump*”), com 20 cm de altura, proveniente de viveiro comercial localizado em Cuiabá, MT. O plantio deu-se de forma manual, no mês de dezembro de 1998, em covas de 20x20x20 cm, fertilizadas com 190 g de superfosfato simples e 10 g de micronutrientes Frites Trace Elements BR-15. Houve capinada manual aos 30 e 90 dias e aos 14, 17 e 22 meses, roçada mecânica para remoção de capim-colonião. Foram aplicados no segundo e nono mês, 95 g.planta⁻¹ da fórmula 20-05-20 (N-P-K), acrescidos de 5 g.planta⁻¹ de FTE BR-15. Foram efetuadas podas e a retirada dos brotos basais das árvores aos 9, 14 e 22 meses de idade, e procedeu-se ao controle de formigas cortadeiras durante esse período (PASSOS et al., 2006). O plantio até 16 anos, idade de avaliação, não recebeu desbastes, apenas desramas na fase inicial, aos 9, 14 e 22 meses.

4.2.3 Caracterização sítio III – Nossa Senhora do Livramento

No município de Nossa Senhora do Livramento as amostras de *Tectona grandis* foram coletadas na Fazenda teca do Brasil Ltda. O plantio foi estabelecido em fins de 1999, povoamento equiâneo de teca conta com 309 há, em espaçamento 3 x 3 m (Figura 14). A parcela do referente estudo apresenta uma área de 311,283.20 m², mapeada e demarcada como talhão 21 pela empresa. Na época da coleta o plantio estava com 14 anos.

Figura 14 - Localização do Povoamento de *Tectona grandis*, Fazenda Teca do Brasil Ltda, Nossa Senhora do Livramento MT.



Fonte: Autor (2019).

Na área de plantio, o solo foi descompactado com subsolador, arado e nivelado. Não houve adubação inicial, porém aos 9 anos foram aplicados de 0,8 a 3,7 t.ha⁻¹ de calcário magnesiano, 60 kg.ha⁻¹ de fosfato e 100 a 150 kg.ha⁻¹ de cloreto de potássio (PELLISSARI, 2012). A partir do segundo ano, ocorreram desramas com retiradas de galhos até 1/3 da altura total, de 1/2 da altura total no terceiro ano e até 2/3 no quarto

ano. A manutenção da desrama, com a remoção dos galhos até 7,0 m de altura nas idades subsequentes. Aplicou-se sistema de desbaste seletivo, executados aos cinco e aos oito anos, removendo-se, respectivamente, em média de 40% e 33%, o número de árvores por hectare.

Nossa Senhora do Livramento encontra-se sob o domínio do Bioma cerrado, o clima da região é do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen, tropical, com estações seca de inverno (ROSA et al., 2015). Apresenta temperatura média anual de 25°C (CALDEIRA; OLIVEIRA, 2008), com médias das mínimas de 20°C e máximas de 32°C, precipitação média de 1.300 mm.ano⁻¹ (CAMPELLO JÚNIOR et al., 1991). O solo é caracterizado como Planossolo Háplico Eutrófico, textura média. Apresenta a característica de ser bem abastecido de bases, o que lhes confere elevado status nutricional, mas com sérias limitações de ordem físicas relacionadas, principalmente ao preparo do solo e à penetração de raízes devido ao adensamento. Em condições de adensamento e em função do contraste textural, estes solos são muito susceptíveis à erosão. Estes solos caracterizam-se por apresentar alta fertilidade (EMBRAPA, 2006). O Quadro 3 apresenta a análise química para o solo na área de coleta da madeira de teca.

Quadro 3 - Análise química do solo para o sítio N.S. do Livramento.

Prof.	pH CaCl ₂	Ca+Mg	Al	H+Al	P	K	argila	silte	areia	MO	SB	TpH7,0	t ⁺ efetiva	V	m
		cmolc.dm ⁻³			mg.dm ⁻³		g.kg ⁻¹			cmolc.dm ⁻³		%			
0-20	5.22	4.09	0.31	2.70	1.47	120.47	271.64	144.44	583.91	5.23	4.40	7.10	4.71	60.87	7.69
0-40	4.80	4.07	0.37	3.30	2.01	107.79	301.33	125.80	606.18	4.93	4.34	7.64	4.71	58.24	7.99

4.3 Amostragem das Árvores e Preparo dos Corpos de Prova

Para cada sítio foram coletadas três árvores ao acaso. As árvores abatidas foram seccionadas a uma altura de 2m. Em campo as toras de teca foram serradas e transformadas em viga de 1,0 m x 0,05 m x 0,16 m (comprimento x espessura x largura) para facilitar o transporte. Para cada sítio buscou-se não amostrar árvores próximas entre si, assim como próximas da bordadura, evitando interferências em seus crescimentos. Estas árvores eram sem torções e livre de danos por fungos ou insetos.

Figura 15 - Abate e retirada das costaneiras nas toras de teca para a confecção das vigas.





Fonte: Autor (2019).

As vigas foram encaminhadas para a cidade de Cuiabá, posteriormente a Brasília para o laboratório de produtos florestais (LPF) do serviço florestal brasileiro (SFB) setor de engenharia e física. As vigas foram entabizadas e armazenadas em galpão com laterais abertas, para processo de secagem, permanecendo no local até atingissem o teor de umidade de 15% para posteriormente serem desdobradas em corpos de prova, orientados nas direções longitudinal, radial e tangencial medindo 50 cm x 2,0 cm x 2,0 cm (comprimento x espessura x largura) totalizando 60 corpos de prova, sendo 20 para cada área de sítio. Esses corpos de prova foram subdivididos em amostras de dimensões 30 cm x 2 cm x 2 cm, utilizadas para os ensaios de colorimetria, ultrassom, ondas de tensão, NIR e flexão estática e em amostras de 10 cm x 2 cm x 2 cm utilizados nos ensaios físicos de densidade (básica e aparente) e retratibilidade (tangencial, radial e volumétrica). Foram também confeccionados corpos de prova de 5 cm x 2 cm x 2 cm para serem utilizados na caracterização macroscópica, microscópica e para as mensurações das fibras da madeira.

Os corpos de prova foram acondicionados em câmara de climatização no setor de engenharia e física – LPF/SFB, com temperatura e umidade controlada ($65 \pm 1\%$

UR, $21\pm 3^{\circ}\text{C}$) para estabilização do teor de umidade (12% de umidade de equilíbrio), conforme a norma COPANT (1972b).

4.4 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DA MADEIRA

4.4.1 Análise de Imagens

4.4.1.1 Macroscopia

A descrição macroscópica foi realizada na área de Anatomia da Madeira do LPF/SFB. Sendo utilizados os corpos de prova de dimensões de 5 cm x 2 cm x 2cm, polidos nas sessões transversais com lixas d'água de granulações 40, 180, 320, 600 e 1200, visando a remoção de toda aspereza, tornando visíveis seus caracteres a olho nu ou com estereoscópio de aumento de 20 x, de acordo com a metodologia descrita pelas normas COPANT (1974), Coradin e Muniz (1992) e IAWA (1989).

Para a caracterização macroscópica as faces radial, tangencial e transversal foram fotografadas utilizando-se o microscópio estereoscópio SZX7 Olympus com imagens captadas por câmera digital Olympus modelo DP25 e analisadas pelo *software Application*-programa DP2-BSW®, com lente ocular 10x2, aumento de vinte vezes e escala de 1 mm.

Observou-se os caracteres gerais cerne/alburno, cor, anéis de crescimento, brilho, cheiro, resistência ao corte, grã, textura e figura. Também foram observados os caracteres macroscópicos: parênquima axial (vasos/poros), visibilidade, tipos, diâmetro, porosidade, frequência, agrupamento, múltiplos radiais, disposição dos vasos, forma da seção transversal, placas de perfuração, obstrução dos vasos, tilos ou depósitos. Analisou-se também o parênquima radial (raios) visibilidade, contraste, largura, altura e frequência.

4.4.1.2 Microscopia

No LPF/SFB foram confeccionadas lâminas permanentes para a descrição microscópica. Dos corpos de prova de dimensões 5 cm x 2 cm x 2 cm, obteve-se corpos de prova nas dimensões de 1 cm x 1 cm x 1 cm, estes foram imersos por 5 dias em álcool 70 v. e 2 ml de glicerina, para amolecimento. Posteriormente, foram realizados cortes histológicos nas direções radial, transversal e tangencial em micrótomo de deslize marca Leica modelo SM 2000R. As espessuras dos cortes ficaram entre 18 a 30 μm .

As seções do lenho foram clarificadas com hipoclorito de sódio (50%) e coradas com safranina alcoólica (50%) 1:1 e azul de astra alcoólica (50%) 1:1, tratados em série alcoólica de 60%, 70%, 80%, 90%, 95% e 100% e acetato I e II. As amostras foram montadas em lâminas de vidro de modo a conter os três planos de corte em cada lâmina com a utilização de resina sintética Entellan®. Após a secagem das lâminas, o excesso de resina foi removido com bisturi e a limpeza final feita com acetato de butila (JOHANSEN, 1940).

Os caracteres microscópicos foram fotografados nas faces radial, tangencial e transversal utilizando o microscópio Olympus BH-2 com imagens captadas por câmera digital Olympus DP25 aumento 40x com escala de 100 μm e analisadas em *software Application* Programa DP2 – BSW® (Olympus) de acordo com a metodologia descrita pela norma COPANT (1974) e IAWA (1989), por Coradin e Muniz (1992).

Foram capturadas as imagens dos vasos e dos raios e mensurados, utilizando-se o microscópio, câmera e software, anteriormente citados. Foram mensurados o comprimento, frequência e altura dos raios de 25 vasos, sendo 25 raios por lâmina, conforme IAWA (1989).

4.4.1.3 Mensuração das fibras

As fibras foram caracterizadas em material dissociado. Das amostras com dimensões de 5 cm x 2 cm x 2 cm (comprimento, largura e espessura), foram removidos fragmentos (palitos) ao longo da seção longitudinal do lenho e dissociados pelo método de Franklin (JOHANSEN, 1940). Os fragmentos do lenho foram transferidos para frascos de vidro com água destilada e com solução macerante (peróxido de hidrogênio 200 vol. e ácido acético glacial 1:1), posteriormente foram levados a estufa (50°C por 78h). Após esta etapa, a solução foi escoada e o material macerado lavado com água destilada até a minimização do odor. Para estudo da morfologia e da avaliação das dimensões, o material dissociado foi corado com safranina alcoólica (50%) 1:1, sendo montadas lâminas semi-permanentes com glicerina e água.

As fibras foram caracterizadas por análise de imagem, utilizando microscópio Olympus Bh-2, com imagens captadas por câmera digital Olympus DP25 com escala de 1mm para o comprimento da fibra e de 20 µm para a largura, diâmetro do lume, analisadas em software Application Programa DP2-BSW® Olympus. Com as imagens capturadas das fibras mensurou-se o comprimento (CF), a largura total da fibra (FL), diâmetro do lume (DL) e a espessura da parede (EP) de 25 fibras por lâmina, de acordo com as normas da IAWA (1989).

A espessura da parede (EP) da fibra foi obtida através da Equação (1):

$$EP = \frac{LF - DL}{2} \quad \text{Eq.1}$$

4.4.2 Colorimetria

A caracterização colorimétrica da madeira foi realizada no laboratório de tecnologia da madeira da Faculdade de Engenharia Florestal – UnB. Na realização deste ensaio foi utilizado um espectrofotômetro *ColorEye® XTH* gretagmacbeth acoplado em um microcomputador com o software *Color iControl*, com iluminante *Pulsed Xenon D65* e ângulo de 10°, em temperatura ambiente.

Utilizou-se 20 corpos de prova de cada sítio de estudo nas dimensões de 30 cm x 2 cm x 2 cm. Sendo realizadas 20 leituras nas faces radial e tangencial dos corpos de prova, totalizando 40 leituras por corpo de prova. Assim, foram realizadas 800 leituras por sítio de estudo, gerando um total de 2400 leituras para os três sítios.

A metodologia utilizada para a definição dos parâmetros colorimétricos foi a do sistema CIELAB 1976, conforme Gonçalves (1993) e a classificação das cores da madeira foi baseada em Camargos & Gonçalves (2001). Foram determinados os parâmetros colorimétricos L* (claridade), coordenadas a* e b*, C (saturação) e h* (ângulo de tinta), e calculados os parâmetros C e h* conforme as Equações 2 e 3:

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

Onde:

C= saturação da cor;

a*= coordenada cromática sobre o eixo verde-vermelho;

b*= coordenada cromática sobre o eixo azul-amarelo.

$$h^* = \text{tang}^{-1} \left(\frac{a^*}{b^*} \right) \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

h*= ângulo de tinta;

a* = coordenada cromática sobre o eixo verde-vermelho;
 b* = coordenada cromática sobre o eixo azul-amarelo.

4.4.3 Análises químicas

A análise química foi realizada no Laboratório de Produtos Florestais (LPF) no setor de química. Para análise química, a preparação da madeira seguiu-se a norma TAPPI 257 cm- 1985, o teor de umidade seguiu a norma TAPPI 264 om-1988 e o teor de extrativos a norma TAPPI 204 om-88. A lignina total foi obtida pelo somatório da lignina solúvel e insolúvel, seguindo as normas LAP 003 e 004. O teor de cinzas na madeira foi mensurado segundo a norma TAPPI 211 om-93.

4.4.3.1 Preparo da madeira e teor de extrativos

Os discos das árvores foram seccionados em quatro partes, que foram passados na plaina para a obtenção de material particulado, a parte restante do disco foram transformados em amostras menores, com dimensões semelhantes a palitos (0,1 cm x 0,1 cm x 0,6 cm, aproximadamente). O material obtido pela plaina e os palitos foram então submetidos a um processo de moagem e peneiramento utilizando um moedor e duas peneiras (40 mesh e 60 mesh), obtendo-se cerca de 100 gramas de serragem para cada tratamento, classificada em 60 mesh (de granulometria maior que 0,25 mm e menor que 0,42 mm).

Para determinar o teor de extrativo seguiu-se a metodologia descrita pela norma TAPPI 204 om-1988, com adaptações. Sendo determinado pela equação 4.

$$TE = \frac{m_2 - m_1}{m_u} * 100 \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

TE= teor de extrativo (etanol:tolueno), %;

m_u= massa da amostra descontada a umidade;

m₁= massa do balão de extração (g);

m_2 = massa do balão de extração + extratos após secagem a 115 °C em estufa por 2 horas (g).

4.4.3.2 Lignina insolúvel em ácido

O teor de lignina insolúvel foi determinado pela equação 5.

$$TLins = \frac{m_2 - m_1}{m_{-u}} * 100 \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

TLins= Teor de lignina insolúvel (%);

m_2 = massa do cadinho filtrante + lignina insolúvel descontada as cinzas livres de extrativo (g);

m_1 = massa do cadinho filtrante (g);

m_{-u} = massa da amostra descontada a umidade (g).

4.4.3.3 Lignina solúvel em ácido

O líquido remanescente da filtração da lignina insolúvel foi analisado pela espectroscopia na região do ultravioleta (UV-VIS), onde pegou-se 1 ml de cada repetição sendo este depositado em balões de 10 ml, completado o restante com água deionizada para diluição. Foi utilizado um espectrofotômetro UV VIS da marca Femto 700 plus. A lignina solúvel foi determinada pela equação 6:

$$TLsol. = \frac{\frac{A}{100} * I * \frac{87}{1000}}{m_{-u}} * 100 \quad \text{Eq. 6}$$

Onde:

TLsol.= Teor de lignina solúvel (%);

A= absorvância, lida em espectrofotômetro;

l = fator de diluição;

m_{-u} = massa da amostra descontada a umidade.

4.4.3.4 Lignina total

O teor de lignina total consiste na soma da fração solúvel e insolúvel, obtida pela equação 7:

$$TLT = TLsol. + TLins. \quad \text{Eq. 7}$$

Onde:

TLT = teor de lignina total (%);

TLsol. = teor de lignina solúvel (%);

TLins. = teor de lignina insolúvel (%).

4.4.3.5 Teor de cinzas e teor de umidade

Foram utilizadas três repetições de cada tratamento. Cadinhos de porcelana previamente calcinados em uma mufla da marca Quimis modelo Q318 M24 a 1000°C por 1 hora foram resfriados em dessecador. Em cada cadinho foram colocados $2 \pm 0,0004$ 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.

O teor de cinzas sem extrativo foi determinado de acordo com a norma TAPPI 211 om-1993. Para o cálculo do teor de cinzas seguiu-se a equação 8:

$$TCZ = \frac{m_1 - m_0}{m} * 100 \quad \text{Eq. 8}$$

Onde:

TCZ= teor de cinzas (%);

m_1 = massa do cadinho + amostra calcinada a 525 °C (g);

m_0 = massa do cadinho (g);

m = massa da amostra a 0% de umidade (g).

4.4.3.6 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 9:

$$TH = 100 - TLT - TCZ \quad \text{Eq. 9}$$

Onde:

TH= teor de holocelulose (%);

TLT= teor de lignina total (%);

TCZ= teor de cinzas (%).

4.4.4 Propriedades físicas da madeira

4.4.4.1 Densidade básica

Os ensaios para obtenção da densidade básica foram conduzidos no laboratório de tecnologia da madeira LTM/FENF/UNB. Para a determinação da densidade básica, seguiu-se a norma COPANT (1972 c), em que os 60 corpos de prova com dimensões de 10 cm x 2 cm x 2 cm, sendo 20 corpos de prova por sítio, estes foram imersos em água para a obtenção do volume saturado pelo método estequiométrico. Para as aferições utilizou-se um paquímetro digital com sensibilidade de 0,01 mm da marca Mitutoyo. Após o período de saturação e medição, as amostras foram acondicionadas em estufa a uma temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até que atingissem massa constante para obtenção da massa seca (0% umidade). Para esta etapa foi utilizado uma balança digital Marconi AS 2000, com precisão de 0,01g. A densidade básica foi determinada conforme a Equação (4):

$$DB = \frac{M_s}{V_s} \quad \text{Eq. 10}$$

Onde:

DB= Densidade Básica (g/cm^3);

Ms= Massa seca (g);

Vs= Volume saturado (cm^3)

4.4.4.2 Retratibilidade

Os ensaios para determinar a retratibilidade da madeira de teca foram realizados no laboratório de tecnologia da madeira LTM/FENF/UNB, nos mesmos corpos de prova utilizados para a obtenção da densidade básica. A determinação da retratibilidade seguiu a norma COPANT (1972d). Foram mensuradas as dimensões longitudinais, radiais e tangenciais dos corpos de prova com paquímetro digital com

sensibilidade de 0,01mm da marca Mitutoyo, nas condições saturada e seco em estufa a uma temperatura $103 \pm 2^\circ\text{C}$ (0% de umidade). Os corpos de prova são os mesmos utilizados para a determinação da densidade.

Nas faces radiais, tangencial e longitudinal foram efetuadas três medições totalizando 9 medições na condição saturada e seca em estufa por corpo de prova, posteriormente sendo realizada a média dos valores.

As equações utilizadas para determinar as retratibilidades radial, tangencial e volumétrica foram 11, 12 e 13, respectivamente. O coeficiente de anisotropia foi determinado pela Equação 14.

$$Rr = \frac{D_{rs} - D_{rse}}{D_{rs}} * 100 \quad \text{Eq.11}$$

Onde:

Rr = Retratabilidade radial (%);

Drs = Dimensão do corpo de prova na direção radial, em condição saturada (mm);

Drse = Dimensão do corpo de prova na direção radial, em condição seca (mm).

$$Rt = \frac{D_{ts} - D_{tse}}{D_{ts}} * 100 \quad \text{Eq. 12}$$

Onde:

Rt= Retratabilidade tangencial (%);

Dts= Dimensão do corpo de prova na direção tangencial, em condição saturada (mm);

Dtse= Dimensão do corpo de prova na direção tangencial, em condição seca (mm);

$$Rv = \frac{V_s - V_{se}}{V_s} * 100 \quad \text{Eq. 13}$$

Onde:

Rv = Retratabilidade volumétrica (%);

Vs = Volume do corpo de prova na condição saturada (cm³);

Vse = Volume do corpo de prova na condição seca (cm³).

$$CoA = \frac{Rt}{Rr} \quad \text{Eq. 14}$$

Onde:

CoA = Coeficiente de anisotropia;

Rt = Retratabilidade tangencial (%);

Rr = Retratabilidade radial (%).

4.4.4.3 Densidade aparente 12% de umidade

A densidade a 12% de umidade foi obtida através do método estequiométrico (Equação 15), efetuando-se medições nas faces radiais, tangenciais e longitudinais dos corpos de prova, estes acondicionados em câmara de climatização no setor de Engenharia e Física – LPF/SFB, com temperatura e umidade controlada (65±1% UR, 21±3°C) para estabilização do teor de umidade (12% de umidade de equilíbrio), conforme a norma COPANT (1972b), obtendo-se o volume e a massa através da balança digital Marconi As 2000 com sensibilidade de 0,01g.

$$D_{12} = \frac{M_{12}}{Vol_{12}} \quad \text{Eq.15}$$

Onde:

$D_{12\%}$ = Densidade a 12 % de umidade;

$M_{12\%}$ = Massa do corpo de prova a 12% de umidade (g);

$Vol_{12\%}$ = Volume do corpo de prova a 12% de umidade (cm³).

4.4.5 Propriedades mecânicas da madeira

4.4.5.1 Flexão estática – módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR)

Os ensaios de flexão estática foram realizados no Laboratório de Tecnologia da Madeira LTM/ FENF/UnB, na máquina de ensaio universal modelo EMIC DL com capacidade de carga de 300 kN. As amostras estavam, em média, com 12% de umidade.

Os ensaios foram realizados conforme a norma COPANT 555 (1972 a), com velocidade de aplicação da carga de 1mm/minuto, com célula de carga de 2.000kgf. Os corpos de prova para este ensaio tinham as dimensões de 30 cm x 2 cm x 2 cm, com 1 cm para cada apoio e 28 cm de vão livre. A visualização e leitura do ensaio foi realizada pelo programa TESC em um microcomputador conectado a EMIC- máquina universal de ensaios. O módulo de ruptura (MOR) foi determinado conforme Equação 16, tendo seus valores posteriormente transformados em MPa.

$$MOR = \frac{3P_{max}L}{2bh^2} \quad \text{Eq. 16}$$

Onde:

MOR = Módulo de ruptura á flexão estática (kgf/cm²);

$P_{máx}$ = Carga máxima na ruptura (kgf);

L = Comprimento do vão livre (cm);
 b e h = Largura e Altura do corpo de prova (cm).

A resistência da madeira a deformação é caracterizada pelo módulo de elasticidade (MOE), sendo esta calculada com uma determinada carga aplicada no centro do vão livre (distância entre apoios) dos corpos de prova.

O módulo de elasticidade (MOE) foi determinado, conforme a Equação 17, tendo seus valores posteriormente transformados em MPa.

$$MOE = \frac{PL^3}{4bdh^3} \quad \text{Eq. 17}$$

Onde:

MOE = Módulo de elasticidade á flexão estática (kgf/cm²);

P = Carga no limite proporcional (kgf);

d = Deformação correspondente a carga no limite proporcional (cm);

L = Comprimento do vão livre (cm);

b e h = Largura e Altura do corpo de prova (cm).

4.4.6 Ensaios acústicos/ tensão

Os ensaios ultrassonoros e de tensão foram realizados em corpos de prova de 30 cm x 2 cm x 2 cm, que posteriormente foram utilizados nos ensaios de flexão estática.

4.4.6.1 Módulo de elasticidade dinâmico (Ondas Ultrassonoras)

O ensaio de ondas ultrassônicas foi realizado no laboratório de tecnologia da madeira TLM/FENF/UNB, com o equipamento USLab da empresa Agricef, com transdutores de onda longitudinal e de seção plana que operam na frequência de 45 kHz, potência de 700 V e resolução de 0,1 µs, determinando as propriedades elástica da madeira. O ultrassom é equipado com dois transdutores, um para emissão das ondas e outro para recepção. Sendo calibrado a cada início dos ensaios, utilizando-

se um corpo de prova de acrílico com um gel condutor neutro. Após a calibração do aparelho, o gel condutor foi utilizado nas faces dos transdutores para que a onda não dissipasse e para facilitar a aderência ao corpo de prova. Foram tomadas três medições do tempo de propagação das ondas sonoras longitudinal para cada amostra e calculada a média dos valores.

O cálculo do módulo de elasticidade dinâmico por ultrassom (MOEdu), foi realizado de acordo com a Equação 18:

$$MOEdu = D_{12} * Velu^2 \quad \text{Eq. 18}$$

Onde:

MOEdu= Módulo de elasticidade dinâmico por ultrassom (MPa);

$D_{12\%}$ = Densidade aparente da madeira a 12% de umidade (kg/m³);

Velu= Velocidade da onda ultrassônica (m/s);

g= aceleração da gravidade (9,804 m/s²).

4.4.6.2 Módulo de elasticidade dinâmico (Ondas de tensão)

Os ensaios com ondas de tensão longitudinal foram realizados na área de Engenharia e Física do LPF/SFB. Para a sua realização foi utilizado o aparelho *Stress Wave Timer* modelo 239A (Metriguard Inc.), que mede o tempo de propagação de onda de tensão ao longo do corpo de prova, por meio de dois transdutores com acelerômetros, sendo um emissor na forma de pêndulo e outro um receptor de forma plana e um relógio registrador da velocidade da onda.

Os corpos de prova foram fixados em braçadeiras de alavanca e uma onda de tensão foi induzida, percorrendo todo o corpo de prova até atingir o outro acelerômetro por meio de um pêndulo. Foram realizadas em cada corpo de prova três leituras do tempo de propagação da onda. A distância utilizada foi o vão de 28 cm de

comprimento, o mesmo indicado pela norma COPANT 555 para o ensaio de flexão estática.

A velocidade e o módulo de elasticidade dinâmico (MOEds) com *stress wave* foram obtidos através das Equações 19 e 20:

$$Vels = \frac{L_o}{t * 10^{-6}} \quad \text{Eq. 19}$$

Onde:

Vels= Velocidade de propagação de onda de tensão (m/s);

L_o= Distância percorrida pela onda de tensão (m);

t= Tempo de deslocamento da onda de tensão (μs).

$$MOEds = D_{12} * Vels^2 * \frac{1}{g} \quad \text{Eq. 20}$$

Onde:

MOEds= Módulo de elasticidade dinâmico do *Stress wave* (MPa);

Vels= Velocidade de propagação de onda de tensão (m/s);

D_{12%}= Densidade aparente a 12% de umidade (kg/m³);

g= aceleração da gravidade (9,804 m/s²).

4.4.7 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO

4.4.7.1 Análise de referência

Para a técnica de espectroscopia no infravermelho próximo são necessários os resultados obtidos através de ensaios convencionais. Para isso foram utilizados os resultados dos ensaios anatômicos (fibras), físicos (densidade aparente) e mecânicos

(MOE e MOR) como valores de referência, para assim serem realizadas as calibrações e validações dos modelos.

4.4.7.2 Aquisição dos espectros

As análises foram realizadas na área de Química– LPF/SFB. Os espectros foram adquiridos pelo espectrofotômetro no infravermelho próximo com transformada de Fourier (FT-NIRS), utilizando o aparelho da marca Bruker, modelo Tensor 37 (Figura 16). Os espectros de reflectância foram obtidos em sala com temperatura fixada em 22°C e desumidificador de ar. As aquisições dos espectros foram realizadas em corpos de prova com dimensões de 30 cm x 2 cm x 2 cm. Estas amostras tiveram acabamento com lixa de papel nº80 para minimizar os defeitos (marcas de corte e brilho) visando aumentar a reflectância difusa. Para a geração dos modelos de calibração foram ensaiados 78 corpos de prova, 26 por sítio de estudo, dos quais, foi realizada uma análise exploratória e pré-processamento dos espectros dos dados no intuito de se obter uma melhor resposta.

Figura 16 - Espectrofotômetro no infravermelho próximo com transformada de Fourier marca: Bruker Optics, modelo tensor 37.



Fonte: Autor (2019).

Os corpos de prova foram mantidos em câmara de climatização para estabilização da umidade em torno de 12% antes da coleta do espectro. A aquisição espectral foi realizada em 20 diferentes pontos na radial (TR) do corpo de prova. O equipamento utiliza a transformada de Fourier e possui uma esfera de integração.

Os espectros foram adquiridos através de uma sonda na gama de 12000 a 4000 cm^{-1} , em modo de reflexão difusa com resolução espectral de 4 cm^{-1} e 32 varreduras por leitura. Cada espectro representa uma média das 32 varreduras na amostra, sendo que, para cada amostra foram realizadas 20 leituras espectrais na face radial. Foram 640 varreduras por corpo de prova totalizando 12.800 por sítio de estudo.

4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A. Para os parâmetros anatômicos, a análise estatística foi realizada pelo programa SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences*), sendo realizado uma análise de variância univariada, tanto para procedência, idade e espaçamento, a comparação de médias pelo teste Tukey, ao nível de 95% de probabilidade, sendo considerado como tratamento a procedência (sítio) da teca.

B. Para a colorimetria foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado, com três tratamentos (sítios) em que foram mensurados os parâmetros colorimétricos nas faces radial e tangencial e com 20 repetições (corpo de prova) por sítio de estudo. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e a comparação de média pelo teste de Tukey, ao nível de 95% de probabilidade utilizando o programa SPSS. Foi verificada a normalidade dos dados pelo teste *Shapiro-Wilk*.

C. Para as características tecnológicas, os valores médios foram comparados aos disponíveis em literatura. Para comparações de médias, foi utilizado o teste de Tukey, ao nível de 95% de probabilidade. Também foi realizada correlação de Pearson para avaliar a correspondência entre as variáveis. O programa SPSS foi novamente utilizado para análise dos dados. Foi verificada a normalidade dos dados pelo teste *Shapiro-Wilk*.

D. Para a espectroscopia no infravermelho próximo foi utilizada como ferramenta para as calibrações e validações dos modelos de regressão (PLS-1), o programa de estatística multivariada *The Unscambler*® (CAMO AS, Norway), versão 9.7:

Parâmetros de Calibração, validação e seleção dos modelos: os modelos foram ajustados para verificar a relação dos valores de comprimento de fibras, densidade aparente 12% umidade (D12%), módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) com os espectros obtidos no infravermelho próximo. As calibrações foram ajustadas pelo método PLS-1 com um máximo de 15 variáveis latentes, para a avaliação individual dos sítios, enquanto para a análise conjunta foram 10 variáveis latentes, sendo que para cada modelo o valor foi sugerido pelo programa estatístico. O método da validação cruzada completa (*full cross-validation*) foi empregado para avaliar os modelos.

As amostragens para análise individual para os sítios foram divididas em seis lotes, sendo que em cada lote foram selecionadas três amostras ao acaso, para a análise conjunta dos sítios foram 15 lotes com quatro amostras ao acaso. Para determinar os parâmetros de calibração e validação foram realizadas análises preliminares. Pré-tratamento foram aplicados para eliminar ruído e melhorar a qualidade do sinal, desta forma aplicou-se o SNV (*Standard Normal Variate Method*) e primeira derivada (SAVITZKY e GOLAY, 1964) nos espectros.

Amostras anômalas (*outliers*) não foram incluídas na calibração do modelo, sendo estas detectadas pelos parâmetros gráficos de resíduos de *student* e valor de *leverage* (HEIN et al. 2009; HEIN, 2008).

Os modelos foram escolhidos seguindo-se os seguintes critérios: Maior coeficiente de determinação do modelo na validação cruzada (R^2_{cv}); Maior relação de desempenho do desvio (RPD); número de variáveis latentes usadas na calibração; Erro padrão da validação cruzada (SECV). (HEIN, 2008; ROSSO, 2010; RIBEIRO, 2017; CORRÊA QUEIROZ, 2018).

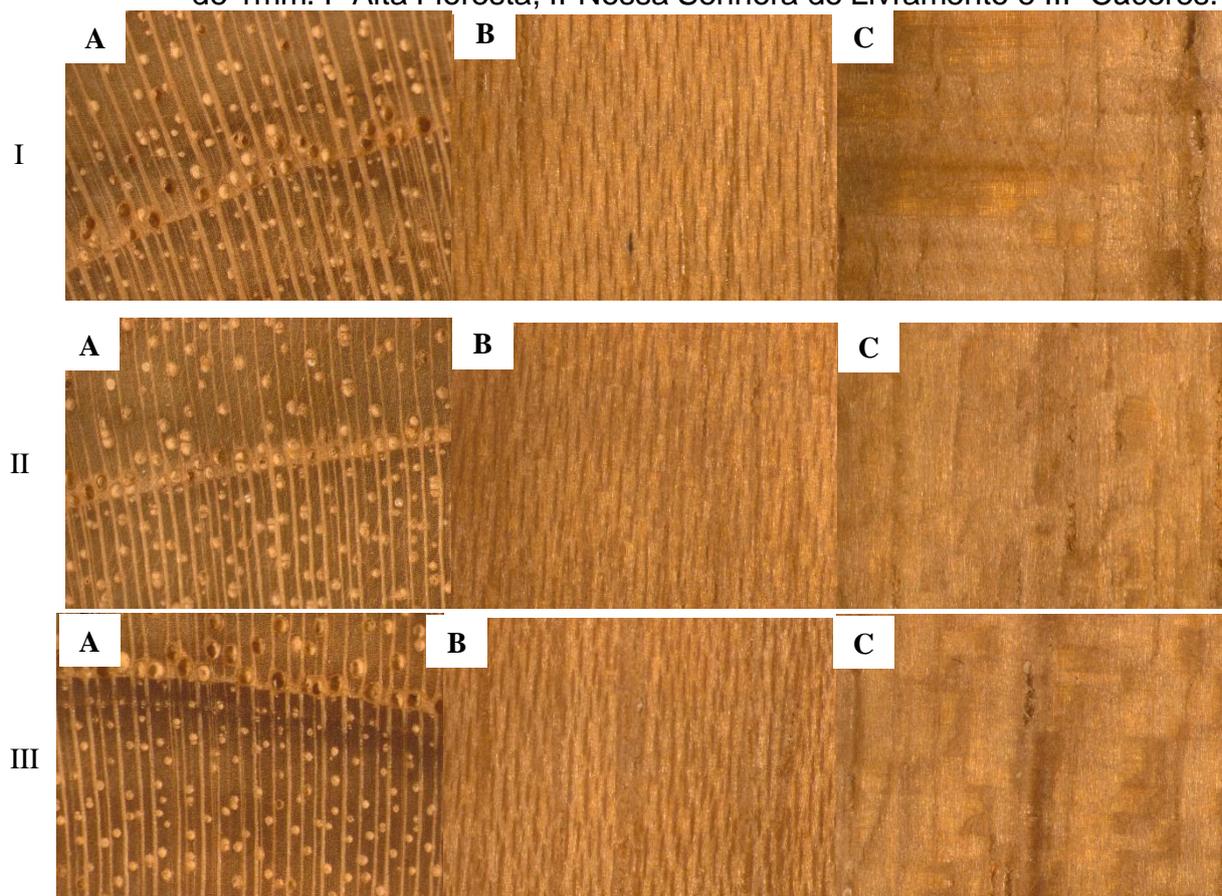
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.5 Análise de Imagem

5.5.1 Descrição macroscópica e microscópica da espécie *Tectona grandis*

Características gerais: A madeira apresenta cerne e albúrneo distintos pela cor (cerne castanho avermelhado e albúrneo amarelado), cheiro perceptível e agradável, gosto amargo, grã direita e textura média. Apresenta figura ou desenho destacado pelo parênquima radial e camadas de crescimento distintas.

Figura 17- Fotomicrografia da madeira de *Tectona grandis* de três sítios distintos – a) plano transversal, b) tangencial e c) radial, aumento de 20x e escala de 1mm. I- Alta Floresta, II-Nossa Senhora do Livramento e III- Cáceres.



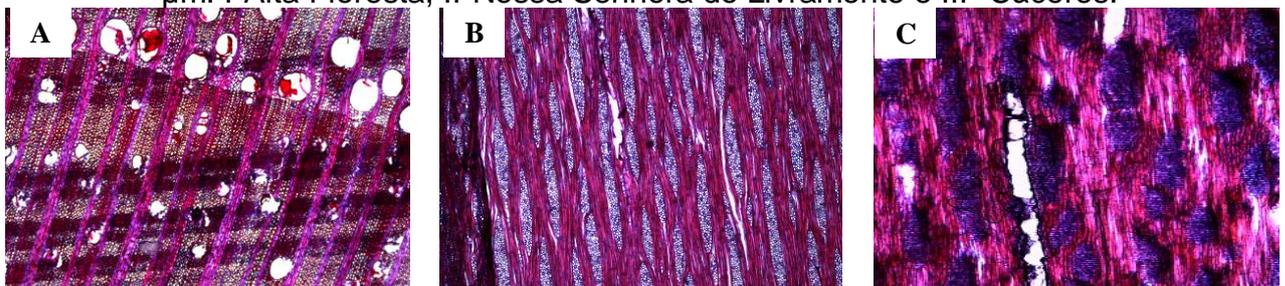
Fonte: Autor (2019).

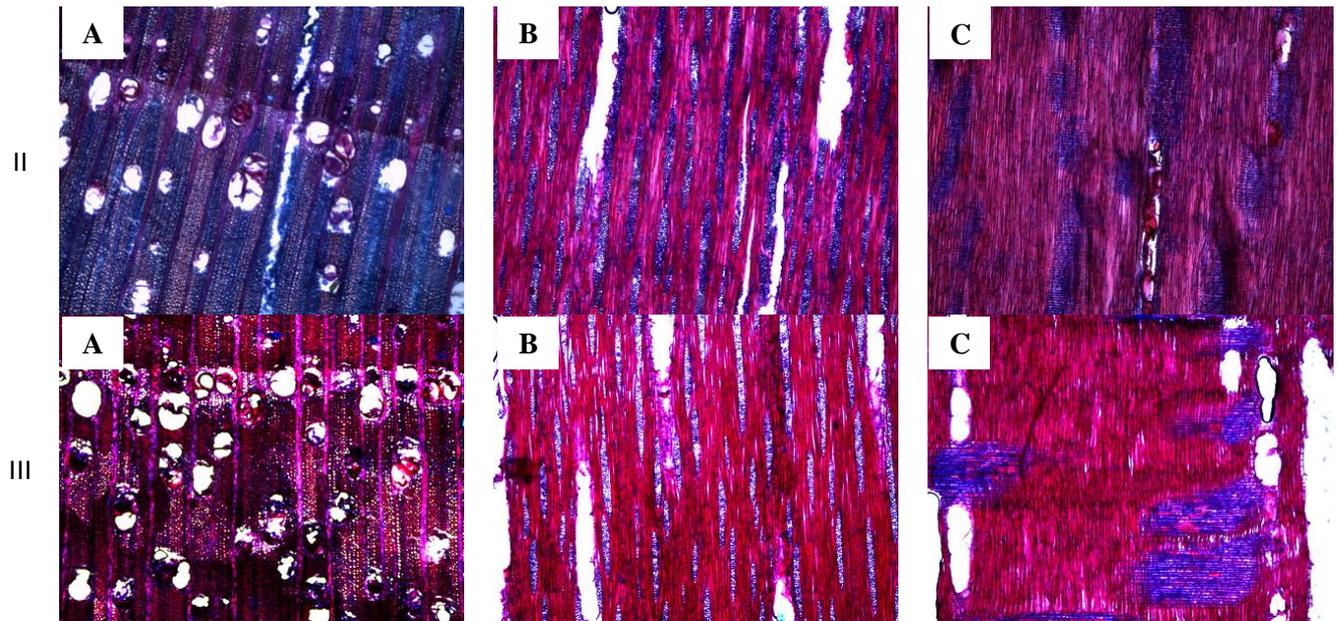
Descrição macroscópica (Fig.17): no plano transversal, os vasos estão presentes e visíveis a olho nu, diâmetro tangencial médio (100- 200 μm), porosidade

em anéis semi-porosos, alguns vasos obstruídos por tilos, com presença de substância branca, agrupamento de vasos solitários, médios e múltiplos, de formato circular a oval e disposto em cadeia radial. Parênquima axial indistinto a olho nu, em faixas marginais e vasicêntrico escasso. Parênquima radial observado sob lente com 20x aumento na superfície transversal e tangencial. Pouco contrastado, finos ($< 100\mu\text{m}$), médio ($>1\text{mm}$) e pouco frequentes (4-12/mm linear). No plano longitudinal tangencial, os raios são visíveis sob lente de 20x, as linhas vasculares são regulares e estratificadas. No plano longitudinal radial, o espelhado dos raios é presente.

Descrição microscópica (Fig.18): limites dos anéis de crescimento distintos, madeira de anel poroso, vasos dispostos radialmente, solitários, largo. **Vasos/poros** com porosidade em anéis semi-porosos, arranjo radial, apresentam vasos solitários, presença de vasos geminados com rara ocorrência de vasos múltiplos de três; diâmetro tangencial de 100- 200 μm , forma arredonda. **Elementos vasculares** 280-300 μm de comprimento, apêndices curtos em uma das extremidades; pontoações intervasculares alternadas com tendência opostas. **Fibras** libriiformes, com pontoações simples, curtas com 0,95 – 1,11 mm de comprimento, septadas distribuída uniformemente; de diâmetro total de 26,16 – 32,22 μm ; diâmetro do lume 14,96 -17,38 μm ; espessura da parede 5,01-7,42 μm , espessas e delgadas. **Parênquima** axial paratraqueal escasso. **Raios** multisseriados, estratificados, células dos raios homocelulares procumbentes, com largura na seção tangencial de 61,16 - 77, 21 μm ; número de raios por milímetro variando de 4-5 raios, altura variando de 5-7 mm.

Figura 18 -Fotomicrografia da madeira de *Tectona grandis* de três sítios distintos – a) plano transversal, b) tangencial e c) radial. Aumento de 4x e escala de 500 μm . I-Alta Floresta, II-Nossa Senhora do Livramento e III- Cáceres.





Fonte: Autor (2019).

Observando-se a Tabela 2, verifica-se diferenças estatísticas da madeira de teca provenientes dos diferentes sítios para dimensões das fibras (comprimento, largura, diâmetros e espessura) e para os raios (altura, largura e frequência). Os resultados demonstram que podem ter ocorrido influência do sítio, quanto ao espaçamento e idade para as dimensões de fibras. Segundo estudos apresentados por Kokutse, Adjonou e Kokou (2009) e Rodriguez-Anda et al. (2017) o incremento no comprimento das fibras ocorre com o aumento da idade. Bhat e Priya (2004) e Thulasidas e Bhat (2012) apontam que a maturidade de teca é alcançada entre 15 e 25 anos dependendo da localidade; após essa idade, o comprimento da fibra não varia significativamente, o resultado obtido no presente estudo para o comprimento da fibra foi concordante com o reportado por Bhat e Priya (2004) e Thulasidas e Bhat (2012), correspondendo ao resultado obtido para o comprimento da fibra procedente do sítio de Cáceres, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Valores médios do comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede de fibras, comprimento dos vasos, diâmetro dos vasos, altura, largura e frequência dos raios da madeira de *Tectona grandis*, dos três sítios estudados.

Sítio	CF (μm)	LF (μm)	DL (μm)	EP (μm)	CV (μm)	DV (μm)	AR. (mm)	LR (μm)	FR (mm^{-1})
Alta Floresta (14 anos 3 x 2,2 m)	1110a	32,22a	17,38a	7,42a	300,0a	173,16a	950a	77,21a	5,84a
N. S. Livramento (14 anos, 3 x 3 m)	950b	28,04b	14,96b	6,54b	290a	180,33a	630 b	61,16b	5,12b
Cáceres (16 anos, 5 x 2m)	1090a	26,16b	16,13ab	5,01c	280a	180,72a	620 b	66,75b	4,88b
CV (%)	14,58	14,55	20,41	17,85	19,82	16,74	36,71	12,74	17,38

CF: Comprimento de Fibras; LF: Largura da Fibra; DL: Diâmetro do Lume; EP: Espessura da Parede da Fibra; CV: Comprimento de vaso; DV: Diâmetro de vasos; FR; Frequência de raios; AR: Altura dos Raios; LR: Largura dos Raios. Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si estatisticamente ao nível de 5% de significância pelo teste Tukey.

Segundo Tienne et al. (2009) e Lima et al. (2011) em espaçamentos maiores, as fibras tendem a ser mais longas, diferindo do presente estudo, quando se observa o comprimento de fibras do sítio Alta Floresta (Tabela 2). O menor espaçamento (sítio de Alta Floresta - AF) apresentou maior comprimento de fibra. Já o espaçamento de Cáceres (CA), o maior entre os sítios estudados, não apresentou diferenças estatísticas com o sítio de menor espaçamento. Isto é, o comprimento de fibras do sítio AF (1110 μm) e CA (1090 μm) foi estatisticamente superior ao encontrado no sítio de Nossa Senhora do Livramento - NS (950 μm), conforme a Tabela 2.

Os valores encontrados para o comprimento de fibra na Tabela 2 estão em conformidade com os apresentados por Chagas et al. (2014), para a madeira de teca aos quatro, seis e 12 anos idade, por Rodriguez-Anda et al. (2017) estudando caracteres anatômicos de teca proveniente de quatro sítios no México, por Kokutse, Adjonou e Kokou (2009) avaliando a relação entre indicadores ecológicos e características da madeira de teca na plantação de Tchorage (Togo), por Bhat e Priya (2004) investigando a influência da variação de proveniência nas propriedades de madeira da tecnologia da região de Ghat ocidental na Índia e por Thulasidas e Bhat (2012) avaliando as propriedades mecânicas e características da estrutura de madeira

de teca de 35 anos de idade em casa de locais úmidos e secos de Kerala, Índia, em comparação com a plantação de teca.

Ainda observando-se a Tabela 2, verifica-se que a largura de fibra também mostra diferenças significativas entre os sítios. O sítio de AF apresentou valores mais elevados para este parâmetro, em relação aos outros dois sítios (NS e CA). A largura da fibra no presente trabalho apresenta os menores valores em relação aos encontrados por Scarparo (2015), Chagas et al (2014) e Govaere, Carpio e Cruz (2003). Enquanto Husen e Pal (2006) que a largura das fibras de teca aumentava variando de 0 a 20 μm , conforme a idade. Observa-se que os resultados obtidos neste trabalho demonstram que a idade não se apresenta como um fator determinante para o incremento da largura da fibra, bem como o espaçamento, características confirmadas por Silva et al. (2007) com fibras de *Eucalyptus* em que não há correlação da largura da fibra com a idade.

Os resultados observados para o diâmetro do lume (Tabela 2) demonstram uma variabilidade conforme a idade, indo de 14,96 μm a 17,38 μm . Em trabalho conduzido por Chagas et al. (2014) o diâmetro do lume de teca apresentou esta variabilidade conforme a idade, aos quatro anos, aos seis e aos 12 anos, e conforme o autor não há uma explicação lógica para este comportamento. Esta variabilidade conforme Gonçalves et al. (2007) pode ser ocasionada por favorecimento edafoclimático decorrente da época. Scarparo (2015) encontrou um valor médio de 16,4 μm para esta espécie. Para este estudo, o maior diâmetro de lume foi para o sítio de menor espaçamento, não seguindo uma lógica clara da influência da idade e mesmo do espaçamento.

Ainda considerando a Tabela 2, a espessura da parede de fibras (EP), apresentou diferenças significativas entre todas as idades. A espessura da parede de fibras do sítio de Alta Floresta se mostrou mais elevada que os demais sítios. Observa-se haver uma redução da espessura da parede conforme o aumento da idade, podendo também estar relacionado ao sítio e ao espaçamento. Conforme Rodriguez-Anda et al. (2017) a diminuição da espessura conforme a idade está provavelmente relacionada com o processo de maturação do câmbio. De uma forma geral, os valores de EP encontrados neste estudo são mais elevados dos que os mencionados na

literatura, apresentando valores superiores ao encontrados por Chagas et al. (2014) para a teca aos quatro, aos seis e aos 12 anos de idade, por Scarparo (2015) para teca aos 8 anos por Rodriguez-Anda et al. (2017) em diferentes sítios aos nove anos, aos 15 anos e aos 21 anos idade. Os sítios de procedências podem ser os responsáveis por estas variações.

Os valores de comprimento e o diâmetro de vasos não mostraram diferenças significativas, com os sítios de procedências. Segundo Bhat, Pryia e Rugmini (2001), analisando a madeira de teca provenientes de três localidade na Índia o diâmetro dos vasos aumenta até a idade de 20 anos, após este período, existe um ligeiro decréscimo, os valores apresentados no presente estudo pelo diâmetro dos vasos demonstram que a estabilização no incremento dos vasos pode vir a ocorrer muito mais cedo para os sítios em estudo. Isto pode ser devido a diferentes causas, entre eles, Anish et al (2015) propõem que o tamanho dos vasos pode ser atribuído à variação da proporção de madeira juvenil e adulta, e à variação devido ao estresse de crescimento como resultado de práticas silviculturais; também afirmam que a relação entre a idade de floresta e o diâmetro dos vasos é significativo. Os valores encontrados neste trabalho para o diâmetro dos vasos enquadram-se nas faixas de valores encontrados para a teca por Bhat, Pryia e Rugmini (2001) dos 5 aos 15 anos de idade, para os valores encontrados por Rodriguez-Anda et al. (2017) em diferentes sítios na região do México aos nove, aos 15 anos e aos 21 anos e por Chagas et al. (2014) para as idades de quatro, seis e 12 anos, respectivamente, os valores do presente trabalho mostram-se maiores.

Os valores da altura, largura e frequência dos raios (Tabela 2) demonstram que a idade não é determinante, uma vez que estas características encontradas para a teca aos 14 anos de idade pertencente ao sítio de Alta Floresta são consideravelmente maiores que as alturas dos raios encontrados para a teca aos 16 anos do sítio de Cáceres, que por sua vez são semelhantes ao de 14 anos do sítio de Nossa Senhora do Livramento. Estes resultados são contrários aos apresentados por Rodriguez-Anda et al. (2017) em que a altura dos raios demonstra ser maior com a idade. De acordo com os autores, o sítio é o principal responsável para esta variação. Segundo Moya et al. (2009) a altura, largura e frequência dos raios apresentam incremento nos primeiros anos de crescimento, posteriormente se mantém relativamente constante.

Essa variação segundo Larson (1994) para as características dos raios são influenciadas pelos fatores ambientais que alteram a taxa de crescimento cambial, que sob estresse ambiental reduzem a produção das auxinas responsável pelas divisões das células do câmbio, este também decresce com o aumento da idade. Observa-se que os valores, destes parâmetros para este estudo estão nas faixas mencionadas pela literatura. Observa-se ainda que para o sítio de Alta Floresta (espaçamentos menores), estes valores são maiores em relação aos outros dois sítios.

Segundo Gomes (2000) os coeficientes de variação são considerados médios, quando estão na faixa 10 a 20%; altos, quando está entre 20 e 30%; e muito altos, quando superiores a 30%. Desta forma, os coeficientes de variação para os elementos anatômicos, CF, LF, EP, CF, DV, LR e FR, variaram entre 12,74% a 19,82%, indicando que para estas variáveis o material avaliado possui heterogeneidade mediana, excetuando para o diâmetro do lume (DL) o qual apresentou o coeficiente de variação de 20,41%, considerando desta forma com alta variabilidade, e a altura dos raios (AR) que apresentou valor elevado de 36,71% indicativo de grande heterogeneidade para o lenho relativo a esta propriedade.

5.5.2 Análise colorimétrica

Os parâmetros colorimétricos para a madeira de teca proveniente dos três sítios distintos são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores médios dos parâmetros colorimétricos e classificação da cor de *Tectona grandis* proveniente de sítios distintos.

Sítio	Parâmetros Colorimétricos					Classificação da cor
	L*	a*	b*	C	h*	
Alta Floresta	57,02	10,83	26,30	28,47	67,68	Marrom-Oliva
N.S. Livramento	61,27	9,84	27,67	29,40	70,44	Marrom-Oliva
Cáceres	56,20	10,68	27,42	29,46	69,14	Marrom-Oliva

L* - Claridade; a* e b* - Coordenadas cromáticas; C – Saturação e h* - Ângulo de tinta

A claridade (L*) da madeira de teca variou de 56,20 a 61,27, com coordenadas cromáticas, (+a*) de 9,84 a 10,83 e (+b*) de 26,30 a 27,67. Observa-se que a coordenada b* (amarelo), exerce influência na determinação da cor desta espécie, independente do sítio. Observa-se também que a coordenada a* (vermelha) tem importante participação na formação final da cor desta madeira, sendo a principal responsável da cor amarronzada. Os valores da saturação da cor (C) e ângulo de tinta (h*) confirmam a importância das duas coordenadas na formação da cor para a madeira de teca. Entretanto, a variável h* (ângulo de tinta) exerce influência marcante, posicionando a cor da madeira próximo ao eixo amarelo no sistema CIELab.

Segundo a classificação de cor proposta por Camargos e Gonzalez (2001) a madeira de teca é de cor marrom-oliva, mostrando a influência de ambas as coordenadas, com presença marcante da coordenada b* (+). Segundo Lopes et al. (2014) valores de a*(+) estando acima de oito, justificam o fato da tonalidade vermelha (+ a*) se sobressair e caracterizar a cor marrom, mesmo com valores superiores a 25 mostrado pela coordenada b* (+).

Verificando-se os resultados encontrados na literatura para teca em diferentes locais (THULASIDAS et al. 2006; DERKYI et al., 2009; MOYA e BERRICAL, 2010;

QUEIROZ et al, 2016; GARCIA e MARINONIO, 2016), nota-se que a teca proveniente dos sítios do Mato Grosso tende a apresentar valores mais elevados para o parâmetro amarelo ($+b^*$), exercendo maior influência na caracterização da cor. No entanto, os valores da claridade (L^*) estão de acordo com os da literatura mencionadas.

Segundo Gierlinger et al. (2004), o parâmetro vermelho ($+a^*$) e a claridade (L^*) estão correlacionados com o conteúdo dos extrativos, principalmente com os componentes fenólicos, que mostram resistência ao apodrecimento. Enquanto o amarelo ($+b^*$) está relacionado principalmente á fotoquímica dos principais componentes da madeira, especialmente a lignina, sendo este afetado pelas características climáticas e propriedades do solo. Resultado este demonstrado pelo presente trabalho, de forma que a teca de AF e CA apresentaram os maiores valores para o teor de extrativo resultando em alto valor para o parâmetro vermelho (a^+) e menor valor para a claridade (L^*), enquanto N.S com o maior teor de lignina apresentou maior valor para o parâmetro amarelo (b^*).

Thulasidas et al. (2006) observaram para árvores de teca de localidades úmidas e seca em Kerala (Índia) variabilidade apenas para a coordenada amarela (b^*), sem diferenças em relação ao vermelho ($+a^*$) e a claridade (L^*). Estes autores estão de acordo com Gierlinger et al. (2004) para a coordenada $b^*(+)$, que provavelmente é a mais afetada pelo tipo de solo ou fertilidade e pelas condições climáticas. Isto ainda, se faz necessário a confirmação em futuros estudos.

Moya e Calvo-Alvarado (2012), observando as variações dos parâmetros colorimétricos da teca na Costa Rica, sob diferentes características climáticas e edáficas, verificou que o parâmetro b^* (+) apresenta correlação com estas variáveis, porém, esclarece que os resultados são de cunho observacional, recomendando que deva-se conduzir um estudo experimental que confirme quais variáveis ambientais realmente expliquem a cor da madeira. Esse estudo deve fornecer dados definitivos para gestão do solo e critérios de seleção de locais para plantações. Assim, este trabalho mostra contribuição neste sentido, verificando que o sítio não apresentou influência na cor final da madeira de teca.

Os valores médios e o coeficiente de variação para os parâmetros colorimétricos para as faces radial e tangencial da teca em seus respectivos sítios são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores médios dos parâmetros colorimétricos para as faces Tangencial e Radial para a *Tectona grandis*, dos diferentes sítios de estudo.

Parâmetros Colorimétricos					
Sítio	Face Tangencial				
	L*	a*	b*	C	h*
Alta Floresta AF	57,54 bA	10,54 aA	25,71 bA	27,82 bB	67,68 cA
Livramento NS	61,23 aA	9,58 bA	27,33 aA	29,00 aA	70,67 aA
Cáceres CA	56,53 bA	10,57 aA	27,45 aA	29,44 aA	68,88 bA
CV (%)	10,61	13,28	7,49	7,19	3,73
Sítio	Face Radial				
	L*	a*	b*	C	h*
Alta Floresta AF	56,51 bA	11,12 aA	26,89 bA	29,12 aA	67,48 cA
Livramento NS	61,31 aA	10,11 bA	28,01 aA	29,80 aA	70,23 aA
Cáceres CA	56,07 bA	10,81 abA	27,40 abA	29,48 aA	68,42 abA
CV (%)	8,96	11,25	6,60	6,36	3,14

Médias seguidas pela mesma letra minúscula, na mesma coluna, **comparação de médias entre os sítios**, não diferem entre si estatisticamente ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula, na mesma coluna, **comparação de médias para mesmo sítio** e entre faces, não diferem entre si estatisticamente ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

Observando-se a Tabela 4, as análises estatísticas indicam diferenças significativas para parâmetros colorimétricos estudados. Para as duas faces tangencial e radial, a madeira de teca pertencente aos sítios de NS e AF, apresentaram uma menor intensidade de L*, caracterizando-a como madeira de cor mais escura. Para estes sítios, a coordenada a* tem valores maiores e a coordenada b*, valores menores. O ângulo de tinta (h*) também é menor, afastando do eixo amarelo e indo em direção ao eixo vermelho do sistema CIELab. Estes parâmetros colorimétricos explicam a cor mais escura das faces tangencial e radial dos dois sítios (NS e AF). Já para o sítio NS, a madeira de teca de ambas as faces é mais clara, apresentando maior luminosidade (maior valor de L*), menor a*, maior b* e h*, aproximando a sua cor do eixo b* do sistema CIELab.

Segundo Garcia e Marinonio (2016), o espaçamento afeta a cor da madeira de teca, sendo que maiores espaçamentos, a madeira apresenta maior pigmentação de vermelho. Esta afirmação condiz com os resultados deste trabalho, uma vez que sob o maior espaçamento entre os plantios, de 5 m x 2,0 m (sítio de Alta Floresta) apresentou a maior variável cromática a^* (+), apesar de nem sempre significativo estatisticamente.

Os valores para os parâmetros colorimétricos encontrado neste trabalho são bem próximo ao encontrado por Garcia e Marinonio (2016) que avaliando variação da cor da madeira de teca, sob diferentes espaçamentos e considerando as faces tangencial e radial, encontraram os valores dos parâmetros colorimétricos: espaçamento 6m x 2m, faces tangencial e radial ($L^*=61,27$, $+a^*=9,52$, $+b^*=25,94$); ($L^*=59,17$, $+a^*=10,42$, $+b^*=26,78$), respectivamente; espaçamento 5m x 2m, faces tangencial e radial ($L^*=65,78$, $+a^*=8,65$, $+b^*=27,03$; $L^*=59,47$, $+a^*=9,25$, $+b^*=21,51$), respectivamente. As faces tangencial e radial com maiores espaçamentos tendem a apresentar mais pigmento vermelho ($+a^*$). Resultado semelhante ao encontrado por Lopes et al. (2014) trabalhando com alteração de cor por tratamento térmico com teca sob os espaçamentos de 4 x 2m , 5 x 2m e 6 x 2 m, respectivamente, antes do processo de alteração de cor, observaram os seguintes valores ($L^*=60,85$, $+a^*=8,65$, $+b^*=26,61$), ($L^*=60,25$, $+a^*=9,19$, $+b^*=24,12$) ; ($L^*=58,63$, $+a^*=10,39$, $+b^*=23,80$), a pigmentação vermelha (a^* , positivo), aumenta com o espaçamento.

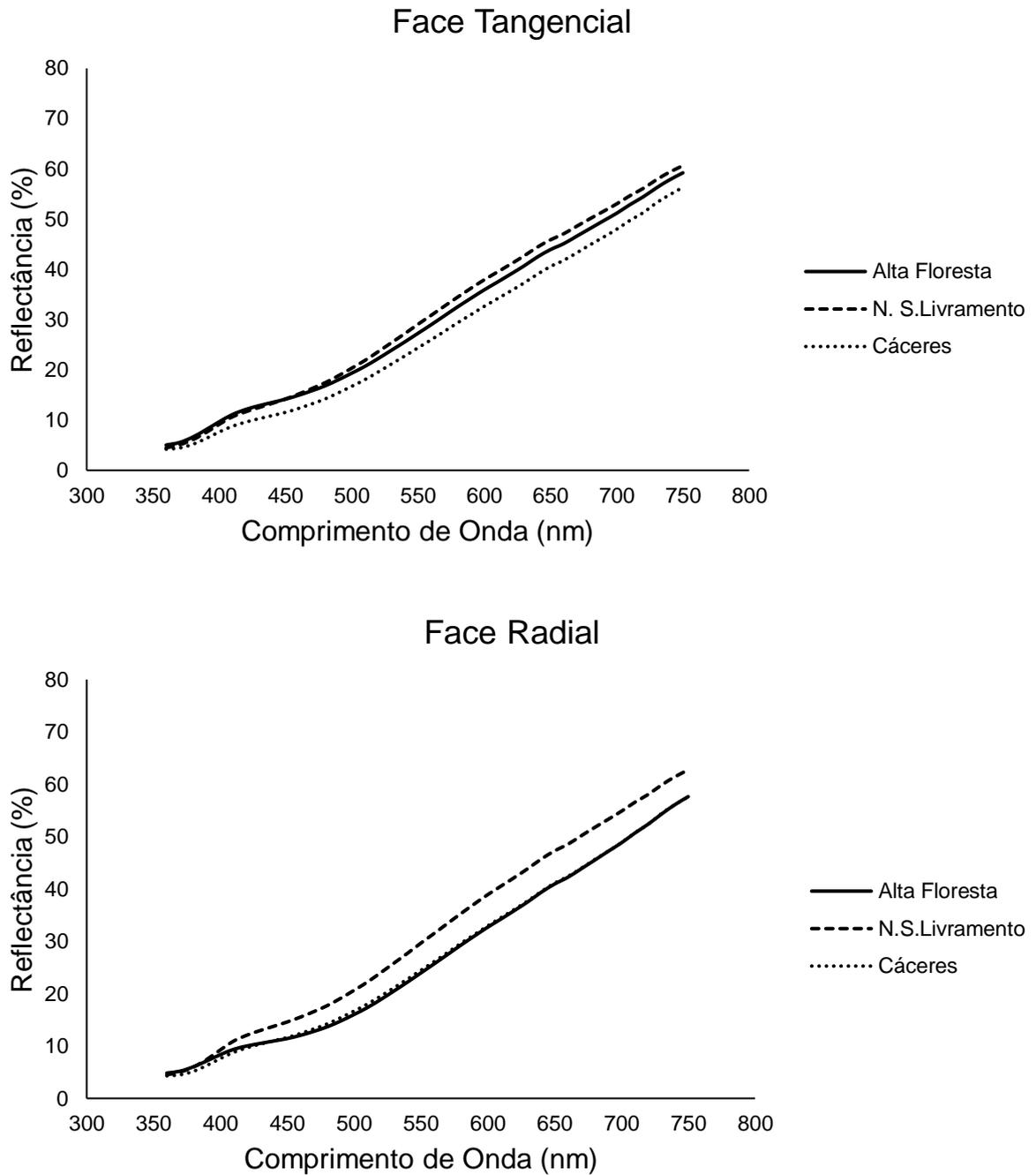
Analisando-se ainda a Tabela 4, as faces tangencial e radial, dentro de cada sítio, observaram-se, que os parâmetros colorimétricos não mostraram diferenças estatísticas, exceto para a variável C no sítio de Alta Floresta. Isso, de uma certa forma é positivo, pois a similaridade de coloração entre as faces não afetaria a escolha da face para desdobro da madeira. Isto é, a madeira de teca desses sítios poderia ser desdobrada, tanto na face radial como na tangencial e a cor das peças de madeira seria bem uniforme. A diferença apresentada pela variável C (saturação), pode ser atribuída aos ajustes de valores, na fórmula de cálculo e na aplicação dos programas estatísticos, uma vez que para o cálculo de C, utiliza-se as variáveis a^* e b^* e estas não mostraram diferenças estatísticas entre as faces.

Resultados semelhantes foram obtidos por Silva et al. (2015) para oito espécies da amazônicas e Ribeiro (2017) trabalhando com 20 espécies tropicais do estado do Mato Grosso, em que oito das espécies estudadas, não apresentaram diferenças entre as faces tangencial e radial para os parâmetros colorimétricos, enquanto Barros et al. (2014) já observaram diferenças para o parâmetro a^* entre as faces radial e tangencial e Ribeiro (2012) para as quatro espécies em estudo não encontrou diferença apenas para o parâmetro L^* de *O. costulata*, a variabilidade de respostas pode estar relacionada aos elementos anatômicos e as propriedades químicas da madeira.

Considerando a classificação de Gomes (2000) para o coeficiente de variação (CV): baixos, quando inferiores a 10%; médios, quando está entre 10 a 20%; altos, quando está entre 20% e 30%; e muito altos, quando superiores a 30%, os CVs apresentado pelos parâmetros colorimétricos para ambas as faces estão entre 3,14% a 13,29%, isto é de baixos a médios.

As assinaturas espectrais ou curvas de reflectância determinadas de acordo com os comprimentos de onda para a teca, em seus respectivos sítios de estudo, tanto para a face radial quanto para a face tangencial, podem ser observados na Figura 19.

Figura 19 - Curva Espectral da face tangencial e radial de *Tectona grandis* para os três sítios estudados.



Como esperado por apresentar os maiores valores para o parâmetro L^* , a face tangencial e radial da teca originada do plantio de Nossa Senhora do livramento, madeira mais clara, refletiu mais os comprimentos de onda em relação a teca de Alta Floresta e Cáceres. Enquanto que a reflectância para face radial de Alta Floresta e

Cáceres estão sobrepostas, demonstrando similaridade no padrão de suas cores entre suas faces radial.

Resultado este semelhante ao observado por Ribeiro (2017) para a assinatura espectral de 20 espécies nativas amazônicas, em 15 espécies essas curvas não apresentaram diferenças estando estas bem próximas ou sobrepostas. Em quatro espécies *M. itauba* (Itaúba), *H. petraeum* (Angelim pedra), *A. leiocarpa* (Grapeira), *C. oblongifolia* (Tauari) apresentaram diferenças estatísticas entre as faces, sendo que as maiores reflectâncias ocorreram na face radial, resultado semelhante ao encontrado no presente trabalho. Enquanto Ribeiro (2009), trabalhando com *Pinus carebae* e *Eucalytus grandis*, observando as curvas de reflectâncias destas, verificou que o pinus tende a apresentar maior reflectância na face tangencial, enquanto para o eucalipto a maior reflectância ocorre em sua face radial, assemelhando-se aos resultados obtidos para a teca. Segundo a autora esse fator ocorre devido o parâmetro a^* (pigmento vermelho) ser mais elevado, sendo responsável pela tonalidade mais escura na madeira.

5.6 Propriedades Químicas de *Tectona grandis*

A Tabela 5 mostra os valores médios das análises químicas da madeira de teca e comparações estatísticas entre os sítios estudados.

Tabela 5 - Valores médios das análises química da madeira de *Tectona grandis*, proveniente de três sítios distintos.

Sítio	TE (%)	TLins. (%)	TLsol. (%)	TLT (%)	TCZ (%)	TH (%)
AF	8,25 b	31,05 a	1,26 a	32,29 a	0,43 b	67,25 b
NS	6,97 c	31,59 a	1,11 a	32,69 a	0,72 a	66,57 b
CA	9,94 a	29,82 b	1,13 a	30,96 b	0,84 a	69,03 a
CV (%)	17,75	2,96	7,23	2,90	33,75	1,87

Em que: AF Alta Floresta; NS Nossa Senhora do Livramento; CA Cáceres. TE = teor de extrativos; TLins. = teor de lignina insolúvel; TLSol. = teor de lignina solúvel; TLT = teor de lignina total; TCZ = teor de cinzas; TH = teor de holocelulose. Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si estatisticamente ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

Verifica-se na Tabela 5 que houve diferenças significativas para as análises químicas da madeira de teca, entre os sítios, exceto para o teor de lignina solúvel (TLsol.%). Também o TLins e o TLT dos sítios de AF e NS não apresentaram diferenças estatísticas. O sítio de CA foi o que apresentou o maior teor de extrativos (TE), seguido pelo sítio de AF e NS. Dentre os sítios, AF apresentou o menor teor de cinzas. Este sítio é o que apresenta o menor dos espaçamentos e também é o sítio em que o solo apresenta o menor teor de fósforo (entre 0,44 a 0,99 mg.dm⁻³). Pode-se inferir que esses fatores podem ter influenciado esta propriedade. Os menores valores de TLT e maiores valores de TH foram apresentados pelo sítio de CA. Este sítio é o de maior idade e maiores espaçamentos. Segundo Zobel e Van Buijtenen, (1989), estas características (idade e espaçamento), estão relacionadas com os teores de lignina e holocelulose da madeira. O elevado teor de extrativos apresentado por AF em relação a NS, apesar de possuírem a mesma idade, pode ser explicado quando leva-se em consideração a textura do solo para o sítio, neste caso, argilosa. Rigatto et al. (2004) que avaliando os atributos do solo na qualidade da madeira de *Pinus taeda*, observaram que madeiras provenientes de sítios com texturas mais argilosas apresentaram maiores teores de extrativos e lignina e, conseqüentemente, menores teores de holocelulose. As variáveis lignina e holocelulose encontradas neste trabalho não seguem o mesmo padrão encontrado.

Com as diferenças existente entre os solos, supõe-se que fatores inerentes a característica do solo como os nutrientes, umidade do solo e a textura do solo podem ter afetado o crescimento das árvores nos sítios estudados e, por conseguinte, a formação dos constituintes químicos. Árvores que possuem crescimento mais lento, ou seja, que se desenvolvem em sítios pouco produtivos, tendem a apresentar baixo teor de lignina na composição da madeira (BIERNMANN apud GONÇALEZ et al., 2009).

Moulin et al. (2015) verificaram para eucalipto que o teor de holocelulose foi superior em clone com espaçamentos mais amplos e de idade mais elevada. Maiores valores de teor de extrativos ocorreram nos clones não irrigados e com idade de seis meses. Os menores valores de teor de lignina foram obtidos nos maiores

espaçamentos, enquanto Windeisen et al. (2003) observaram para a teca de dois locais com a idade de 30 anos, sob precipitação leve e forte no Panamá, haver pouca influência da precipitação em relação ao teor de extrativo e lignina no estudo. Os resultados encontrados neste trabalho também seguem esta tendência.

Os valores encontrados neste trabalho para o teor de extrativo, lignina e holocelulose estão em conformidade com valores mencionados por Meena e Nimkar (2016) trabalhando com teca nas regiões de Maharashtra, Tamil Nadu, Andhra Pradesh, Kerela e Orissa e por Blanco-Flórez (2012) para a teca de 13 anos de idade proveniente de Vazante- MG e Corrêa Queiroz (2018) para seis procedências para a teca aos 9 anos de idade, proveniente de plantio homogêneo no município de Cáceres MT. Os resultados obtidos pelos autores acima mencionados demonstram a variabilidade apresentada por estas propriedades ocorre não somente em função da idade, podendo o sítio também exercer influência sob elas. Arruda (2013) observou para teca de desbaste proveniente de plantio comercial do município de Cáceres-MT, com idades de seis, oito e 10 anos de idade, que o teor de extrativos tende a aumentar com a idade, o que também pode ser observado neste trabalho.

Chagas et al. (2014) trabalhando com teca nas idades de quatro, seis e 12 anos de idade, no município de Santo Antônio do Lerverger-MT, sob dois tipos de solo, Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho Amarelo, não observaram diferenças significativa nos valores médios para o teor de extrativos e para o teor de holocelulose. Conclui-se que a idade não influenciou as propriedades químicas estudadas. Estes resultados são diferentes aos encontrados neste trabalho, onde a maior idade do plantio apresentou maiores valores de holocelulose e menores valores de lignina.

Percebe-se que os constituintes químicos da madeira de teca podem ter sido influenciados pelo sítio (principalmente os fatores ambientais e solo) e também pela idade e espaçamento. No entanto, não existe um padrão de comportamento para esta variação. Tem que ser considerado, caso a caso.

5.7 Propriedades Físicas (Densidade Básica e Retratabilidade)

A Tabela 6 apresenta os valores médios e comparações estatísticas da densidade básica e das retratabilidades para madeira de teca dos três sítios estudados.

Tabela 6 - Valores médios para a densidade básica e retratabilidades da madeira de *Tectona grandis* nos diferentes sítios de estudo.

Sítio	Densidade Básica (g/cm ³)	Retratabilidades (%)			Anisotropia Razão (T/R)
		Radial	Tangencial	Volumétrica	
AF	0,49 b (0,64) (0,43) (0,03)	2,33 b (4,10) (1,09) (0,67)	4,47 a (6,06) (2,62) (0,66)	7,07 a (9,86) (5,31) (0,90)	2,01 a (3,23) (0,91) (1,02)
NS	0,51 ab (0,60) (0,44) (0,03)	2,06 b (2,92) (1,47) (0,39)	3,94 b (6,06) (3,14) (0,64)	6,19 b (7,20) (5,31) (0,54)	1,97 a (2,74) (1,10) (0,45)
CA'	0,54 a (0,64) (0,46) (0,04)	3,09 a (4,10) (2,02) (0,55)	3,92 b (8,40) (2,62) (0,53)	7,14 a (8,40) (5,58) (0,76)	1,31 b (2,29) (0,91) (0,33)
CV (%)	7,62	20,85	16,16	11,80	24,86

Médias seguidas de mesma letra na mesma coluna não diferem entre si estatisticamente ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey. Os valores entre parênteses são, respectivamente máximos, mínimo e desvios padrão.

A densidade básica da madeira de teca nos sítios de Alta Floresta (AF) e de N.S. do Livramento (NS) não apresentam diferenças significativas. O sítio de Cáceres (CA), com idade e espaçamento superior aos outros dois sítios, foi o que apresentou maior densidade básica, porém estatisticamente não diferenciou de N.S. Livramento. O sítio de AF com menor espaçamento e maior índice de pluviométrico foi o que apresentou a menor densidade, apesar de não ter diferença estatística para o sítio de NS. Acrescenta-se que os tratamentos silviculturais (principalmente a idade de realização dos desbastes) aplicados em cada sítio, também podem ter influenciado a densidade. O desbaste mais tardio, feito no sítio AF, resultou em madeira com densidade menor.

Moya et al. (2009) na Costa Rica, em duas regiões distintas quanto as características climáticas, observaram para *Tectona grandis* que a densidade básica aumenta com a idade e sofre influência em menor proporção pelo tipo de clima e o local onde desenvolve a plantação. A densidade observada no presente trabalho estão na faixa mencionada por Arruda (2013) para a *Tectona grandis* proveniente do estado do Mato Grosso, com idades de seis, oito e 10 anos, por Blanco-Florez et al. (2014) para a teca plantadas no estado de Minas Gerais, com 13 anos de idade e por Chagas et al. (2014) para a teca plantada no estado do Mato Grosso com as idades de quatro, seis e 12 anos, os valores observados para a densidade básica pelos autores citados mostra tendência de aumento conforme a idade.

Observando-se ainda a Tabela 6, as retratibilidades radial, tangencial e volumétrica da madeira de teca têm influências dos sítios, apesar de nem sempre significativas. O sítio de CA mostrou tendência de maiores retratibilidades, principalmente para a radial e volumétrica. No entanto, a retratibilidade tangencial da madeira deste sítio foi menor do que dos outros dois. Isso resultou em um coeficiente de anisotropia mais estável, contribuindo para amenizar a retratibilidade radial mais elevada da madeira deste sítio.

Kollmann e Cotê (1968) afirmam que, quanto mais alta a densidade da madeira, maior a sua contração ou expansão. Segundo Panshin e De Zeeuw (1970) este efeito pode ser influenciado pela presença de extrativos na madeira, características esta apresentada pela teca dos sítios Cáceres e Alta Floresta, pois ambos apresentam os valores mais elevados para o teor de extrativo.

Os valores da retratibilidade radial, tangencial e volumétrica apresentados neste trabalho estão próximo aos encontrados por diversos autores para a *Tectona grandis* como os observados por Castro e Raigosa (2000) para a teca em plantios na Costa Rica com 17 anos de idade, por Arruda (2013) no estado Mato Grosso com três idades de desbastes aos 6 anos, aos 8 anos de idade e aos 10 anos de idade, por Pinto (2007) para teca em de duas localidades, Jangada e Cáceres, ambos em MT, com 5, 10 e 30 anos de idade, por Solarzano, Moya e Murillo (2012) em dois locais na Costa Rica, por Blanco-Flórez et al. (2014) para a teca de 13 anos, no estado de Minas Gerais, por Bonduelle et al. (2015) para teca no município de Brasnorte-MT e por Dias

et al. (2017) para madeira de teca proveniente de Minas Gerais. De acordo com os valores observados pelos autores citados pode-se observar que a procedência da madeira pode ter influência nas retratibilidades desta espécie. Os sítios deste estudo também mostram influências nessa propriedade. No entanto, os valores das retratibilidades nem sempre são significativos estatisticamente.

Os resultados observados para o coeficiente de anisotropia para os sítios estudados variaram entre 1,31 - 2,01. O sítio de Cáceres apresentou o menor valor 1,31. Estes valores de coeficiente de anisotropia classificam a madeira de teca como de excelente estabilidade (sítio de Cáceres) e de estabilidade normal para os outros dois sítios, apresentando potencialidade para diversos usos.

Os valores para o coeficiente de anisotropia encontrado para a teca no presente trabalho estão na faixa dos valores encontrado por Pinto (2007) nas idades de 5, 10 e 30 anos, por Blanco-Flórez et al. (2014) para a teca aos 13 anos de idade, por Dias et al. (2017) para a teca de 13 anos, em plantios em Minas Gerais e por Córdoba e Sáenz (2004) para a madeira de teca aos 18 a 20 anos, e abaixo dos valores para a teca de 23 a 25 anos. Pode-se observar conforme as pesquisas, as diferenças podem ocorrer e estar relacionadas ao tipo de clone, a espécie ou alguma variável dentro de cada estudo, seja por localização de plantio, formas de manejo, tipo de amostragem, ou outros fatores.

5.7.1 Correlação entre a densidade básica (DB), retratibilidade radial (Rd), tangencial (Tg), volumétrica (Rv) e coeficiente de anisotropia (CoA) para *Tectona grandis*

A Tabela 7 apresenta as correlações obtidas para as propriedades densidade básica, retratibilidade radial, tangencial e volumétrica e para o coeficiente de anisotropia para a madeira de teca proveniente dos três sítios distintos.

Tabela 7 - Correlação entre a Densidade Básica (DB). Retratibilidades (Rr, Rt, Rv) e Coeficiente de Anisotropia (CoA) para a madeira de *Tectona grandis* proveniente de sítios distintos.

Sítios		DB	Rr	Rt	Rv	CoA
Alta Floresta (AF)	DB	1				
	Rr	-0,096 ^{ns}	1			
	Rt	-0,484*	0,478*	1		
	Rv	-0,370 ^{ns}	0,841**	0,863**	1	
	CoA	-0,119 ^{ns}	-0,744**	0,116 ^{ns}	-0,429 ^{ns}	1
N. S. Livramento (NS)	DB	1				
	Rr	-0,076 ^{ns}	1			
	Rt	0,408 ^{ns}	-0,246 ^{ns}	1		
	Rv	0,399 ^{ns}	0,500*	0,487*	1	
	CoA	0,242 ^{ns}	-0,834**	0,695**	-0,179 ^{ns}	1
Cáceres (CA)	DB	1				
	Rr	-0,357 ^{ns}	1			
	Rt	-0,154 ^{ns}	-0,284 ^{ns}	1		
	Rv	-0,370 ^{ns}	-0,186	-0,492*	1	
	CoA	-0,951*	-0,336	-0,198	0,018 ^{ns}	1

** e *: significativo a 1 e 5%, respectivamente, pelo teste t; ns: não significativo.

A maioria das propriedades estudadas não apresentou correlações significativas com a densidade (Tabela 7). Uma importante correlação foi mostrada entre a densidade básica e o coeficiente de anisotropia para o sítio CA. Quanto maior a densidade, menor é a estabilidade da madeira. Madeiras mais densas, tendem a apresentar um maior volume de células de paredes mais espessas, absorvendo mais água livre por unidade de volume e, conseqüentemente, irá expandir ou contrair mais, do que aquelas de menor densidade. O maior teor de extrativo apresentado pela madeira deste sítio (CA) também colabora para menor estabilidade da madeira. Diferentemente do presente estudo Melo et al. (2013) correlacionaram as propriedades físicas e mecânicas de 30 espécies nativas do Rio Grande do Sul, verificaram que a densidade básica e as retratibilidades apresentaram as menores correlações, porém, apesar de fracas foram significativas. Ribeiro (2017), trabalhando com 20 espécies nativas, observou que a maioria das espécies, não apresentaram correlações entre a densidade e as retratibilidades.

Resultados semelhantes foram observados por Trianoski et al. (2013) para *Pinus* sp. que os coeficientes de correlação obtidos a partir das variáveis massa específica e anisotropia de contração não apresentaram correlações significativas, estando este resultado, possivelmente, associado aos fatores produção de resina e presença de extrativos. Enquanto Calderon (2012), analisando a correlação entre a densidade básica e as retratibilidades de *A. macrocarpon*, *S. globulifera*, *O. costulata* e *B. Paraense*, observou que a densidade apresentou moderada influência nas retratibilidades radial/tangencial para a espécie *A. macrocarpon*. Enquanto para *S. globulifera* exerceu forte influência na retratibilidade volumétrica. A retratibilidade tangencial exerceu forte influência na retratibilidade volumétrica das espécies *S. globulifera* e *O. costulata*. Neste trabalho, estas correlações praticamente não existiram, exceto para a madeira de teca proveniente do sítio AF, onde a densidade correlacionou fracamente com a retratibilidade tangencial. As correlações entre as retratibilidades (radial, tangencial e volumétrica) e também com o Coeficiente de Anisotropia (CoA) foram mais marcantes para os sítios de NS e principalmente para AF. Para este último, as correlações entre Rv e (RR, Rt) são mais fortes. Para o sítio NS, as correlações mais fortes foram entre os CoA e (Rr, Rt)

5.8 Propriedades Mecânicas (Módulo de Elasticidade (MOE) e Módulo de Ruptura (MOR) e Módulo de Elasticidade Dinâmico (ondas de tensão e ultrassoras).

A Tabela 8 apresenta os resultados das propriedades mecânicas determinados pelo método convencional e com o uso das técnicas de ultrassonora e ondas de tensão. Esta Tabela também contempla a densidade determinada a 12% de umidade para a madeira de teca dos sítios estudados.

Tabela 8 - Valores médios para a densidade (12%), módulo de elasticidade estático (MOE), módulo de ruptura, (MOR), Módulo de elasticidade dinâmico por ondas de tensão (MOEds) e Módulo de elasticidade dinâmico por Ultrassom (MOEdu). Velocidade de propagação de onda por ondas de tensão (Vels) e a velocidade de propagação de onda ultrassonoras (Velu) para a *Tectona grandis* proveniente de sítios distintos.

Sítio	D 12% (kg/m ³)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOEds (MPa)	Vel _s (m/s)	MOEdu (MPa)	Vel _u (m/s)
Alta Floresta AF	577,79 b	10755,61 b	98,86 b	10501,29 b	4253,33 a	16486,93 b	5330,3 a
N.S Livramento NS	596,73 b	10772,97 b	101,61 b	10473,49 b	4224,91 a	16293,57 b	5217,6 a
Cáceres CA	655,30 a	12091,13 a	109,69 a	12135,68 a	4297,54 a	18181,54 a	5257,5 a
CV%	6,79	13,23	11,02	15,05	7,39	14,63	6,83

Médias seguidas de mesma letra na mesma coluna não diferem entre si estatisticamente ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

A Tabela 8 mostra que há diferenças significativas entre a madeira de teca do sítio de Cáceres em relação aos dos outros dois (Alta Floresta e N.S. do Livramento) para as propriedades estudadas. Os valores médios da densidade a 12%, do MOE, do MOR, do MOEds e do MOEdu foram maiores para o sítio de Cáceres. Lembrando que este sítio tem o maior espaçamento e a maior idade. O desbaste seletivo e a adubação com superfosfato simples e micronutrientes praticado neste sítio também pode ter influenciado positivamente nas propriedades da madeira deste povoamento. Este sítio também tem menor precipitação (média anual de 1396mm) que o sítio de Alta Floresta (média anual 2700mm). Para as velocidades de propagação de

ultrassonora e ondas de tensão, a madeira de teca não mostrou diferenças significativas entre os sítios.

Os resultados encontrados nesta pesquisa (Tabela 8) são semelhantes ao encontrados por Moya et al. (2009) e Thulasidas e Bhat (2012). Segundo estes autores, a teca oriunda de uma região seca e menor precipitação tende apresentar maior densidade e resistências mais elevadas da madeira.

Os valores da D12%, estão próximo aos valores encontrados por Chagas et al. (2014), trabalhando com teca aos quatro, seis e sete anos de idade, por Scaparo (2015) para teca proveniente de dois locais no estado do Goiás, aos 13 anos de idade, por Iwakiri et al. (2013), para teca proveniente do município de Brasnorte (MT), aos 18 anos de idade, por Thulasidas e Bhat (2012), aferindo as propriedades mecânicas para a teca em dois locais, seco e úmido, na região de Kerala na Índia, por Moreno e Roque (2006), avaliando as propriedades físicas e mecânicas para teca proveniente de um plantio de oito anos de idade, na região de Cochabamba-Bolívia. A partir dos resultados obtidos no presente trabalho e conforme a literatura citada observamos que a densidade da madeira depende não apenas da taxa de crescimento da árvore (idade), mas também de outros fatores, como o local da plantação (solo), localização geográfica (planície ou montanha) e clima (vento e precipitação anual). Isto é, a influência do sítio tem que ser considerada na avaliação da densidade da madeira de teca.

Em relação aos resultados obtidos para o ensaio de flexão estática, módulo de elasticidade estático (MOE) e módulo de ruptura (MOR), verificou-se entre os sítios estudados, conforme anteriormente mencionado, valores mais elevados para a madeira de teca proveniente do sítio de Cáceres. Entre os sítios de Alta Floresta e N.S Livramento, estas propriedades apresentaram valores semelhantes, não diferindo estatisticamente.

Os módulos de elasticidade e os módulos de ruptura nesse trabalho mostra-se superior aos obtidos por Scaparo (2015) para a madeira de *Tectona grandis* proveniente de dois locais do estado Goiás, com cinco e 12 anos de idade, por FPL (2010) para a teca de origem do sudeste asiática, em estado verde, porém esta

quando avaliado ao teor de umidade a 12%, a mesma madeira apresenta o MOE próximo ao observado no presente trabalho. Demonstrando que além da idade o teor de umidade presente na madeira influencia para o aumento para os módulos de elasticidade e ruptura.

Observando os valores obtidos por Blanco-Flórez et al. (2014) para a *Tectona grandis*, proveniente da região noroeste de estado de Minas Gerais, com 13 anos de idade, por Bhat e Priya (2004) para teca proveniente de três locais na Índia, Konni, Nilambur e norte de Kanara, com 65 anos e 21 anos de idade para os dois locais, e nas mesmas idades de 21 anos, Nilambur, os resultados no presente trabalho mostrasse inferior aos obtidos pelos autores acima citados, porém superior ao encontrado para a teca aos 21 anos proveniente da região de Kanara. Segundo os autores, a diferença ocorrida entre esses dois sítios, foi devido a uma alta percentagem de parênquima e baixa percentagem de fibras apresentado pelo sítio Kanara. No presente trabalho, os elementos anatômicos não mostram uma tendência que pudessem influenciar nestas propriedades.

Os valores observados por Isekor et al. (2010) para a madeira de *Tectona grandis*, com 15, 20 e 25 anos de idade, proveniente de reserva florestal, Edo, Nigéria, para o MOE e MOR mostra aumento com a idade, o que foi atribuído ao incremento de anéis de crescimento e à adição de madeira mais madura e a idade cambial, os valores obtidos no presente trabalho apresenta a mesma tendência de aumento conforme a idade. O mesmo resultado obtido por Crespo et al. (2008), analisando as propriedades físico-mecânicas de teca, proveniente de Quevedo e Balzar, aos 22 e 18 anos de idade. Porém os autores salientam que Quevedo apresenta os melhores resultados para estas propriedades devido as condições ambientais diferentes. Enquanto Montero et al. (2015), constataram para *Tectona grandis* na Costa Rica, sob duas condições climáticas, tropical chuvoso e tropical úmido, sítios de alta e baixa fertilidade, observaram variações quanto MOE e MOR em relação ao tipo de clima e fertilidade, apesar de nem sempre significativas as diferenças para estes parâmetros no presente estudo observamos que os sítios sob a menor precipitação apresentaram os maiores valores para o MOE e MOR.

Os valores para o MOE e MOR no presente trabalho mostra-se superior aos encontrados por Zahabu et al. (2015) *Tectona grandis* aos 14 anos de idade, de plantio florestal de Longuza, Tanzania, sob três espaçamentos 2x2m, 3x3m, 4x4m, os valores encontrados para o MOE e MOR por este autor não apresentou diferenças entre os espaçamentos, afirmando que isso ocorreu devido os plantios terem a mesma origem, resultado semelhante ao apresentado para a teca do sítio Alta Floresta e N.S. do Livramento. Enquanto os valores encontrados por Hounlonon et al. (2017) para a *Tectona grandis*, proveniente de Benin e Tanzânia, com idade entre 20 e 25 anos, apresentam valor superior ao do presente trabalho.

Os valores médios dos módulos de elasticidade dinâmico MOEds e MOEdu, foram superiores significativamente entre os sítios de Cárceres (CA) e os outros dois (Alta Floresta (AF) e N.S Livramento (NS)). Entre os sítios de AF e NS, não houve diferenças estatísticas para essas propriedades. Observa-se uma tendência, apesar de nem sempre significativa, de quanto maior a densidade, maior os valores obtidos para o MOEds e MOEdu. Isso pode ser explicado em função da maior quantidade de massa presentes na madeira, dos sítios de maiores densidades, permitindo uma melhor propagação das ondas.

Entre os módulos de elasticidades ultrassom (MOEdu) e *stress wave* (MOEds), o *stress wave* apresentou valores mais próximos do módulo de elasticidade estático. Os valores obtidos neste trabalho para o MOEds mostram-se inferior a madeira de teca estudada por Iwakiri et al. (2013) aos 18 anos de idade. Este autor determinou o MOEds em diferentes posições ao longo do fuste, obtendo valores médios, a teca apresenta incremento no sentido longitudinal da árvore. O sítio, a idade e o espaçamento podem ter influenciado no menor valor desta propriedade do presente trabalho. Enquanto Carreira et al. (2012), observaram para 12 vigas de teca, oriundas de plantios de Alta Floresta - MT, que com o aumento da densidade também ocorreu um aumento no MOEds. O valor médio encontrado pelos autores para o MOEds é menor que ao encontrado neste trabalho, devendo-se levar em consideração que esta diferença pode estar associada a densidade e ao espaçamento, uma vez que os autores encontraram um valor médio para a densidade de 556 kg.m³ e o espaçamento era de 2,5 x 2,5m.

Silva (2010), trabalhando com teca proveniente de Cáceres-MT, aos 12 anos de idade e considerando o número de árvores por hectare do povoamento (834 árv/ha, 1000 árv/ha, 1250 árv/ha) observaram que quanto maior a densidade do plantio, menor espaçamento, menor o valor do MOEds. Estes resultados são semelhantes ao encontrado no presente trabalho. Isso mostra também a importância e a influência do planejamento silvicultural nos plantios para esta espécie.

Guimarães et al. (2012) observaram que a madeira de *Tectona grandis* apesar de apresentar a menor densidade em relação a espécie *C. catenaeformis*, apresentou valores maiores da velocidade de propagação da onda, justificando-se a importância da estrutura anatômica da madeira na propagação das ondas. Sendo que para este caso, como o comprimento das fibras favoreceu a velocidade de propagação da onda, numa relação diretamente proporcional. Isso também ocorreu no presente trabalho, quando a fibra de teca proveniente de Alta Floresta e Cáceres apresenta um maior comprimento em relação a N.S. do Livramento.

Trabalhos desenvolvidos por Orellana (2015), Paula et al. (2016), Ribeiro et al. (2016) e Ribeiro (2017) estudando o uso de técnicas não destrutiva para a caracterização das propriedades tecnológicas de madeiras demonstram em seus respectivos trabalhos que o módulo de elasticidade dinâmico obtido através do método *stress wave* se mostra mais próximo ao módulo de elasticidade estático que o obtido por ultrassom, ressaltando desta forma ser a técnica mais rápida e eficaz para esta finalidade. Resultados semelhantes foram encontrados no presente trabalho.

5.8.1 Correlação entre a densidade, MOE e MOR e MOEds, para os sítios estudados.

A Tabela 9 apresenta os valores médios de correlação para o ensaio de ondas de tensão, considerando a velocidade de propagação da onda (Vels), o módulo de elasticidade dinâmico (MOEds) determinado por *stress wave* e o ensaio de flexão estática (módulo de elasticidade estático (MOE) e módulo de ruptura (MOR)), além da densidade a 12% de umidade (D 12%) para as a teca proveniente dos três sítios distintos.

Tabela 9 - Correlação de Pearson entre densidade, flexão estática e stress wave para *Tectona grandis* proveniente dos sítios distintos.

Sítio		D12% (kg.m ³)	Vels (m/s)	MOEds (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
Alta Floresta AF	D _{12%}	1				
	Vels	- 0,155 ^{ns}	1			
	MOEds	0,298 ^{ns}	0,899 ^{**}	1		
	MOE	0,198 ^{ns}	0,476 [*]	0,554 [*]	1	
	MOR	0,333 ^{ns}	0,412 ^{ns}	0,557 [*]	0,567 [*]	1
N.S. do Livramento NS	D _{12%}	1				
	Vels	0,334 ^{ns}	1			
	MOEds	0,698 ^{**}	0,907 ^{**}	1		
	MOE	- 0,206 ^{ns}	0,098 ^{ns}	- 0,026 ^{ns}	1	
	MOR	- 0,201 ^{ns}	- 0,137 ^{ns}	- 0,198 ^{ns}	0,776 ^{**}	1
Cáceres CA	D _{12%}	1				
	Vels	0,122 ^{ns}	1			
	MOEds	- 0,310 ^{ns}	0,904 ^{**}	1		
	MOE	- 0,086 ^{ns}	0,833 ^{**}	0,295 ^{ns}	1	
	MOR	0,583 [*]	- 0,018 ^{ns}	0,245 ^{ns}	0,475 [*]	1

** e *. significativo a 1 e 5%, respectivamente, pelo teste t; ns: não significativo.

Analisando os resultados obtidos na Tabela 9, a correlação de Pearson entre os parâmetros utilizados nos ensaios de ondas de tensão (*stress wave*), observa-se um alto valor na correlação entre a velocidade de propagação das ondas (Vels) e o módulo de elasticidade dinâmico (MOEds), para os três sítios estudados, pois estas são diretamente proporcionais. Para o sítio Alta Floresta e Cáceres as velocidades de propagação das ondas (Vels) apresentaram, respectivamente, fraca e forte correlação com o módulo de elasticidade estático (MOE). Resultado semelhante ao encontrado

por Calderon (2012) em que houve forte correlação positiva entre a velocidade com MOEds, e entre o MOEds com o MOE, para todas as espécies em estudo.

Já a densidade a 12% mostrou correlação com o MOEds do sítio de NS e com o MOR do sítio de CA. Apesar da densidade entre os sítios serem diferentes entre si em termos absolutos, a velocidade de propagação das ondas não apresentou diferenças significativas. Calderon (2012) também não observou relação direta entre a velocidade das ondas de tensão com a densidade da madeira. Segundo Bucur (2006), a regra geral para a madeira é que a velocidade aumenta com o aumento da densidade. Verifica-se que outros fatores estão envolvidos com a densidade da madeira, como a presença de extrativos, as características anatômicas, entre outros. Por outro lado, estes fatores dependem do sítio de desenvolvimento da espécie.

Somente o sítio Alta floresta apresentou correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico (MOEds), o módulo de elasticidade estático (MOE) e o módulo de ruptura (MOR), demonstrando que a técnica dinâmica pode responder bem como estimativa para ambas propriedades, dependendo das características do sítio. Resultados semelhantes foram observados por Medeiro Neto et al. (2016), para Louro preto ($r=0,48$), Paraju ($r=0,66$) e Pau Brasil ($r=0,77$), em que, as melhores correlações ocorreram entre os módulos de elasticidade dinâmicos e estáticos. Ribeiro (2017), Rosa et al. (2014) e Teles et al. (2011) encontram resultados semelhantes em seus estudos com diferentes espécies de madeira.

A inexistência de correlação para as demais propriedades pode ter ocorrido devido à baixa variabilidade no material de estudo ou ao pequeno número de amostras. O mesmo sendo observado por Del Menezzi et al. (2010), segundo os autores quando a variabilidade é pequena, como dentro de uma mesma espécie, os modelos para estimativa das propriedades de flexão apresentaram baixa previsibilidade. Para Del Menezzi et al. (2010), deve-se usar uma maior quantidade de amostras e que estas sejam originadas de árvores diferentes, para que assim a amostragem fique mais representativa, podendo esta fato ser aplicado para as correlações em estudo no presente trabalho.

5.8.2 Correlação entre a densidade, MOR e MOE e MOEdu para os sítios estudados.

Na Tabela 10 apresenta os valores médios de correlação para o ensaio de ultrassom (Velu), o módulo de elasticidade dinâmico (MOEdu) e o de flexão estática (módulo de elasticidade estático (MOE) e módulo de ruptura (MOR)), para a madeira de teca proveniente dos três sítios estudados.

Tabela 10 - Correlação de Person entre a densidade, flexão estática e ultrassom para *Tectona grandis* proveniente de sítios distintos.

Sítio		D _{12%} (kg.m ³)	Velu (m/s)	MOEdu (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
Alta Floresta	D _{12%}	1				
	Velu	- 0,184 ^{ns}	1			
	MOEdu	- 0,270 ^{ns}	0,893 ^{**}	1		
	MOE	0,198 ^{ns}	0,454 [*]	0,526 ^{**}	1	
	MOR	0,333 ^{ns}	0,360 ^{ns}	0,518 [*]	0,657 [*]	1
N.S do Livramento	D _{12%}	1				
	Velu	0,476 [*]	1			
	MOEdu	0,842 ^{**}	0,873 ^{**}	1		
	MOE	- 0,206 ^{ns}	0,045 ^{ns}	- 0,093 ^{ns}	1	
	MOR	- 0,200 ^{ns}	- 0,142 ^{ns}	- 0,202 ^{ns}	0,776 ^{**}	1
Cáceres	D _{12%}	1				
	Velu	- 0,206 ^{ns}	1			
	MOEdu	0,216 ^{ns}	0,909 ^{**}	1		
	MOE	- 0,086 ^{ns}	0,336 ^{ns}	0,303 ^{ns}	1	
	MOR	0,583 [*]	0,032 ^{ns}	0,280 ^{ns}	0,475 [*]	1

** e *. significativo a 1 e 5%, respectivamente, pelo teste t; ns: não significativo.

Analisando-se a Tabela 10, para os três sítios em estudo, a melhor correlação ocorreu entre o módulo de elasticidade dinâmico e a velocidade obtida por ultrassom (Velu). Em geral, os resultados de outros autores apontam que métodos não destrutivos baseados na propagação de ondas são adequados para a medição do módulo de elasticidade dinâmico e têm uma boa relação com o ensaio de flexão estática. A força da correlação depende da espécie e do método usado (KARLINASARI et al. 2008, RAVENSHORST et al. 2008, TELES et al. 2011).

Pode-se observar que para o sítio AF não houve relação entre a densidade e as variáveis Velu, MOEdu, MOE e MOR. Enquanto para o sítio NS a densidade apresentou relação significativa com a Velu e MOEdu. Já para o sítio CA esta relação ocorreu apenas com MOR. Segundo Del Menezzi et al. (2010) a baixa correlação pode estar relacionada ao número de amostras e a baixa variabilidade entre as mesmas. Os autores também consideram o método de propagação de ondas de tensão mais preciso quando se tem variação mais acentuada das propriedades.

Resultado semelhante ao encontrado por Calderon (2012) para a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (Velu) e o módulo de elasticidade dinâmico (MOEdu), em que estes apresentaram forte correlação para as espécies *A. macrocarpon* e *S. globulifera*. Porém, o mesmo comportamento não ocorreu para as outras duas espécies. Para *O. costulata* e *B. paraense* esta correlação foi menor em relação às outras duas. Em relação à densidade com o módulo de elasticidade dinâmico, todas as espécies apresentaram correlação positiva, diferentemente do resultado obtido no presente trabalho, em que apesar de ser a mesma espécie em estudo apenas a teca proveniente de N.S. do Livramento apresentou forte relação com MOEdu. O Módulo de elasticidade dinâmico em relação ao módulo de elasticidade estático apresentou correlação positiva para as espécies *O. costulata* e *B. paraense*, espécies de maiores densidades. A correlação entre o MOR e o MOEdu apresentou correlação significativa para as espécies *S. globulifera*, *O. costulata* e *B. paraense*, o mesmo ocorrendo para a madeira de teca proveniente do sítio Alta Floresta.

Resultados obtidos por Ribeiro (2017) ao correlacionar a velocidade de propagação de ondas (Velu) com o módulo de elasticidade estático (MOE) e o módulo de ruptura (MOR), não encontrou relação significativa, para as espécies *Erismia uncinatum*, *Apuleia leiocarpa*, *Cedrelinga cateniformis*, *Tetragastris altíssima* e *Couratari oblongifolia*, assemelhando-se aos resultados obtidos para a teca proveniente do sítio N.S. do Livramento e Cáceres, para Alta Floresta a semelhança ocorre apenas para o MOR. A correlação significativa para Velu entre o MOEdu, o MOE e o MOR ocorreram para as espécies *Handroanthus serratifolia*, *Pouteria egregia* e *Manilkara huberi*.

Observa-se que o método de ultrassom também é uma opção viável para se determinar as constantes elásticas da madeira. Entretanto, sua melhor ou pior correlação com outras propriedades irá depender da espécie em estudo. Por sua vez, o sítio irá influenciar nas características da madeira, podendo a mesma espécie apresentar comportamentos diferentes quando correlacionar suas propriedades determinadas por este método.

5.8.3 Correlação entre as propriedades físicas, mecânicas e químicas com os parâmetros colorimétricos.

As propriedades físicas e mecânicas correlacionadas com os parâmetros colorimétricos podem ser observados na Tabela 11. Os resultados demonstram que a maioria das propriedades estudadas não apresentaram correlações significativas entre si.

Tabela 11 - Correlação de Pearson entre os parâmetros colorimétricos (L*, a*, b*, C, h*) e propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Tectona grandis* proveniente de sítios distintos.

Sítio	Prop.	L*	a*	b*	C	h*
Alta Floresta	D _{12%}	-0,232 ^{ns}	0,736*	0,218 ^{ns}	0,405 ^{ns}	-0,685*
	MOE	-0,234 ^{ns}	-0,124 ^{ns}	-0,074 ^{ns}	-0,102 ^{ns}	0,129 ^{ns}
	MOR	0,037 ^{ns}	0,503*	0,204 ^{ns}	0,322 ^{ns}	-0,428 ^{ns}
	Rr (%)	0,422 ^{ns}	-0,386 ^{ns}	-0,015 ^{ns}	-0,129 ^{ns}	0,436 ^{ns}
	Rt (%)	0,245 ^{ns}	-0,651*	-0,309 ^{ns}	-0,455*	0,592*
	Rv (%)	0,386 ^{ns}	-0,628*	-0,204 ^{ns}	-0,360 ^{ns}	0,616*
	CA	-0,240 ^{ns}	0,094 ^{ns}	-0,228 ^{ns}	-0,161 ^{ns}	-0,220 ^{ns}
N.S. do Livramento	D _{12%}	-0,014 ^{ns}	0,116 ^{ns}	0,530*	0,483*	0,046 ^{ns}
	MOE	-0,057 ^{ns}	0,254 ^{ns}	0,139 ^{ns}	0,194 ^{ns}	-0,201 ^s
	MOR	-0,077 ^{ns}	0,035 ^{ns}	-0,418 ^{ns}	-0,340 ^{ns}	-0,185 ^{ns}
	Rr (%)	0,185 ^{ns}	-0,183 ^{ns}	-0,301 ^{ns}	-0,311 ^{ns}	0,085 ^{ns}
	Rt (%)	0,069 ^{ns}	0,024 ^{ns}	-0,035 ^{ns}	-0,022 ^{ns}	-0,024 ^{ns}
	Rv (%)	0,293 ^{ns}	0,293 ^{ns}	-0,208 ^{ns}	-0,357 ^{ns}	-0,363 ^{ns}
	CA	-0,156 ^{ns}	0,193 ^{ns}	0,216 ^{ns}	0,241 ^{ns}	-0,122 ^{ns}

Continua

Sítio	Prop.	L*	a*	b*	C	h*
Cáceres	D _{12%}	-0,590*	0,609*	-0,319 ^{ns}	-0,202 ^{ns}	-0,681*
	MOE	0,293 ^{ns}	-0,480*	-0,453*	-0,529*	0,103 ^{ns}
	MOR	-0,166 ^{ns}	0,128 ^{ns}	-0,223 ^{ns}	-0,198 ^{ns}	-0,239 ^{ns}
	Rr (%)	0,082 ^{ns}	-0,301 ^{ns}	-0,286 ^{ns}	-0,336 ^{ns}	0,058 ^{ns}
	Rt (%)	0,004 ^{ns}	0,014 ^{ns}	0,083 ^{ns}	0,082 ^{ns}	0,048 ^{ns}
	Rv (%)	0,080 ^{ns}	-0,231 ^{ns}	-0,141 ^{ns}	-0,182 ^{ns}	0,096 ^{ns}
	CA	-0,030 ^{ns}	0,203 ^{ns}	0,243 ^{ns}	0,274 ^{ns}	0,000 ^{ns}

* 5% de significância, respectivamente, pelo teste t; ns: não significativo.

As correlações entre a*, C e h* e as propriedades densidade a 12%, MOR e a retratibilidade tangencial e volumétrica mostram-se promissoras para o Sítio Alta Floresta. Observou-se correlação positiva para o parâmetro a* com a densidade e o módulo de ruptura (MOR). Já com as retratibilidades tangencial e volumétrica a correlação foi negativa, indicando que quanto maior a* (pigmentação vermelha) maior a densidade. Observa-se que quanto maior o valor de a*, menor o valor para a retratibilidade tangencial e volumétrica. A saturação (C) teve o mesmo comportamento. Para N.S. Livramento a correlação ocorreu apenas para a densidade a 12% com o parâmetro b* e a saturação (C). Para Cáceres a correlação foi entre a densidade a 12% e L*, a* e h* indicando que a claridade (L*) irá diminuir com a diminuição da densidade e com aumento da pigmentação vermelha (a*).

Garcia e Marinonio (2016) observaram para a madeira de teca correlação negativa entre densidade e o parâmetro L* no alburno e no cerne, havendo correlação positiva para o parâmetro a* no alburno e b* para o cerne. Desta forma a madeira de alburno com menor densidade, apresenta-se mais clara e a de cerne de maior densidade, mais escura.

Ribeiro et al. (2013) observou para *Pinus caribae* e *Eucalyptus grandis* a existência de alta e promissora correlação entre os parâmetros colorimétricos com a densidade, módulo de ruptura e coeficiente de anisotropia. Enquanto que para o módulo de elasticidade e retratibilidade volumétrica não há correlação.

Garcia et al. (2014) observaram correlação negativa entre a densidade e o parâmetro L* para quatro espécies, *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus pellita*, *Eucalyptus*

paniculata e *Eucalyptus grandis* em ambas as faces (radial e tangencial), segundo os autores em razão da correlação (Dens. x L*) ser negativa para ambas as faces, isso indica que madeira mais densas são também as mais escuras. Entretanto, isso não se aplica à espécie de *Corymbia citriodora*, cuja madeira é densa, de cor clara e com pouca coloração avermelhada. O resultado obtido para a Dens. x L* para o sítio Cáceres estão de acordo com os a afirmação da autora para os gêneros *Eucalyptus*.

Sinkovic et al. (2014) observando os parâmetros colorimétricos de *Acer pseudoplatanus* o aumento da densidade reduz o valor do parâmetro L*, tornando a madeira mais escura. Enquanto as coordenadas do parâmetro a*(+) e b* (+) tende a aumentar, assim como a saturação da cor. Porém os autores não encontraram correlação entre a densidade com os parâmetros colorimétricos indicando a necessidade de se repetir o método com maiores números amostras da espécie e com diferentes espécies. Resultados parecidos foram encontrados neste trabalho.

A correlação dos parâmetros colorimétricos com as propriedades físicas e mecânicas estudadas neste trabalho, não apresentaram de uma forma geral, correlações interessantes. Um aumento no número de amostras, assim como a separação das amostras por região dentro de cada árvore poderia uniformizar melhor o lote amostrado dentro de cada sítio, possivelmente aumentando às chances de obtenções de correlações com as propriedades tecnológicas.

A Tabela 12 apresenta as correlações entre os parâmetros colorimétricos e as propriedades químicas da madeira de teca para os três sítios estudados.

Tabela 12 - Correlação de Pearson entre os parâmetros colorimétricos (L*, a*, b*, C, h*) e as propriedades químicas da madeira de *Tectona grandis* proveniente de sítios distintos.

Sítio	Prop.	L*	a*	b*	C	h*
Alta Floresta (AF)	TE (%)	0,162 ^{ns}	0,377 ^{ns}	0,388 ^{ns}	0,438 ^{ns}	-0,186 ^{ns}
	Tlins. (%)	-0,114 ^{ns}	0,033 ^{ns}	0,152 ^{ns}	0,135 ^{ns}	0,069 ^{ns}
	TLSol. (%)	-0,169 ^{ns}	0,057 ^{ns}	-0,096 ^{ns}	-0,065 ^{ns}	-0,116 ^{ns}
	TLT (%)	-0,076 ^{ns}	0,063 ^{ns}	0,150 ^{ns}	0,141 ^{ns}	0,040 ^{ns}
	TH (%)	-0,095 ^{ns}	-0,033 ^{ns}	-0,137 ^{ns}	0,438 ^{ns}	-0,186 ^{ns}

Continua

N.S. do Livramento (NS)	TE (%)	-0,162 ^{ns}	0,007 ^{ns}	0,041 ^{ns}	0,051 ^{ns}	-0,004 ^{ns}
	Tlins. (%)	0,351 ^{ns}	-0,328 ^{ns}	-0,241 ^{ns}	-0,300 ^{ns}	0,274 ^{ns}
	TLSol. (%)	0,414 ^{ns}	-0,417 ^{ns}	-0,220 ^{ns}	-0,315 ^{ns}	0,357 ^{ns}
	TLT (%)	0,421 ^{ns}	-0,399 ^{ns}	-0,278 ^{ns}	-0,353 ^{ns}	0,334 ^{ns}
	TH (%)	0,100 ^{ns}	-0,075 ^{ns}	-0,079 ^{ns}	-0,097 ^{ns}	0,055 ^{ns}
Cáceres (CA)	TE (%)	-0,249 ^{ns}	0,168 ^{ns}	-0,170 ^{ns}	-0,137 ^{ns}	-0,250 ^{ns}
	Tlins. (%)	0,114 ^{ns}	-0,143 ^{ns}	-0,080 ^{ns}	-0,108 ^{ns}	0,081 ^{ns}
	TLSol. (%)	0,102 ^{ns}	-0,199 ^{ns}	-0,205 ^{ns}	-0,240 ^{ns}	0,039 ^{ns}
	TLT (%)	0,115 ^{ns}	-0,145 ^{ns}	-0,084 ^{ns}	-0,112 ^{ns}	0,080 ^{ns}
	TH (%)	-0,037 ^{ns}	-0,107 ^{ns}	-0,390 ^{ns}	-0,407 ^{ns}	-0,155 ^{ns}

* 5% de significância, respectivamente, pelo teste t; ns: não significativo.

Diferentemente do esperado as propriedades químicas não apresentaram correlações significativas entre si com os parâmetros colorimétricos da madeira de teca para os sítios estudados. Segundo Gonzalez (1993), a inexistências de correlações entre os parâmetros químicos e colorimétricos, possivelmente, pode ser explicado devido ao insuficiente número de repetições utilizadas nos estudos químicos da madeira (duplicatas ou triplicatas), dificultando as análises estatísticas.

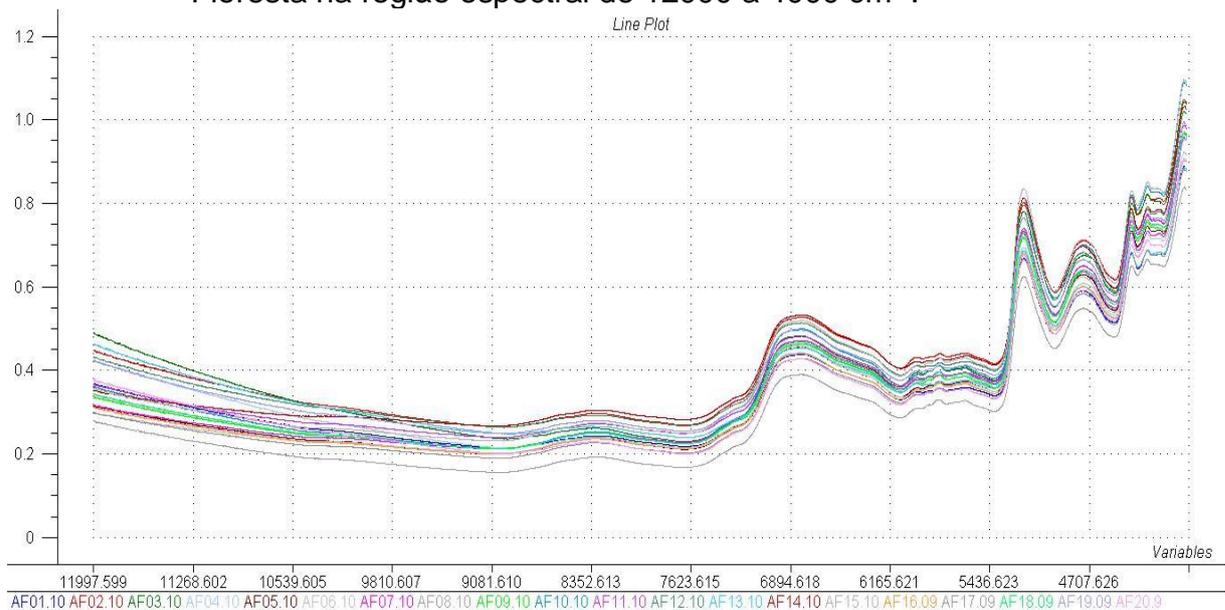
Por outro lado, Mori et al. (2004), trabalhando com alguns clones *Eucalyptus*, encontrou correlação entre a lignina solúvel e o ângulo de tinta (h^*). Já, a lignina insolúvel e o teor de lignina total não mostraram correlações com os parâmetros colorimétricos. Paula (2016) avaliando a relação entre as propriedades químicas e os parâmetros colorimétricos das madeiras de angelim e sapucaia, observou que para a madeira de angelim a claridade, a coordenada b^* , a cromaticidade (C) e o ângulo de tinta (h^*) apresentaram correlações positivas com o teor de holoceluloses e correlações negativas com o teor total de lignina. Segundo a autora, quanto mais lignina e menos holocelulose, menos amarela e mais escura é a madeira.

5.9 Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIRS) para Madeira de teca dos Sítios Estudados - Face Radial

5.9.1 Espectros na madeira (estudos preliminares dos espectros)

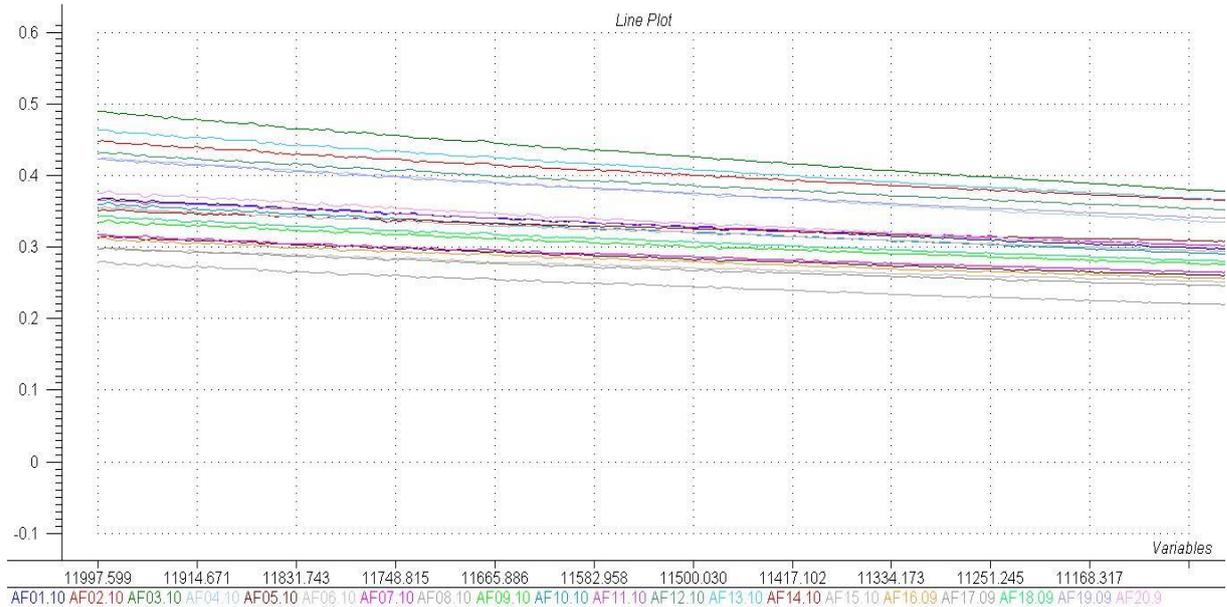
Os espectros NIR foram obtidos diretamente nos corpos de prova (blocos de madeira) em modo de absorvância na face radial, para todos os sítios em estudo. Os espectros adquiridos para a *Tectona grandis* proveniente do sítio de Alta Floresta podem ser observados nas Figuras 20 e 21, na região espectral de 12000 a 4000 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} .

Figura 20 - Espectros de absorvância NIR para a teca proveniente do sítio Alta Floresta na região espectral de 12000 a 4000 cm^{-1} .



Fonte: Autor (2019).

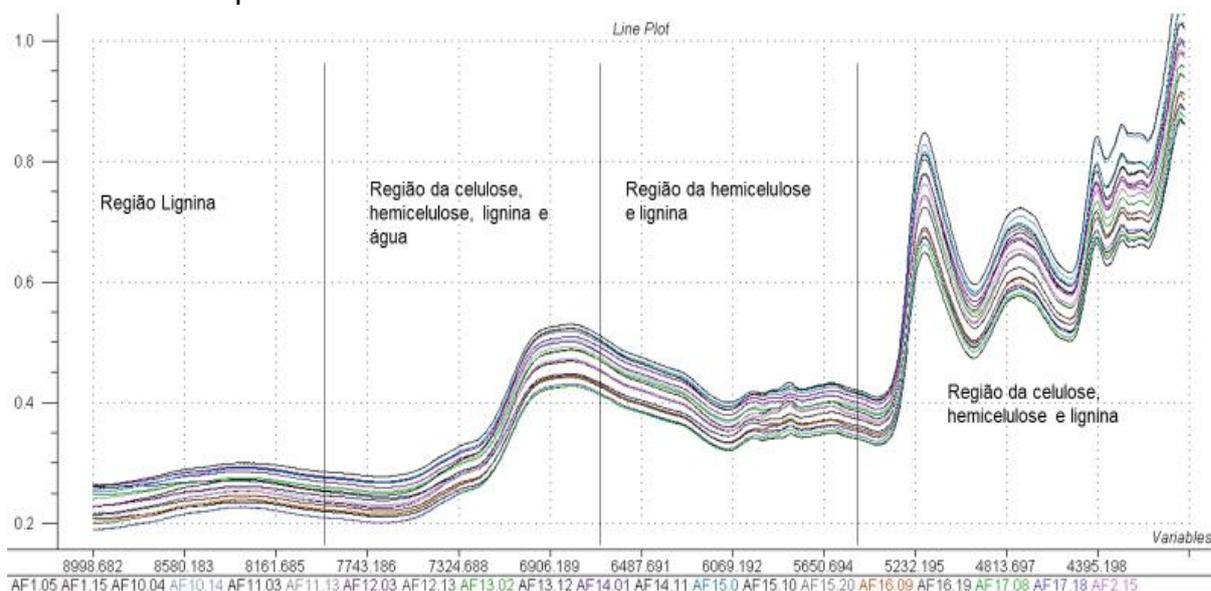
Figura 21 - Espectros de absorbância na região espectral de 12000 a 11000 cm^{-1} .



Fonte: Autor (2019).

A região espectral entre 12000-9000 cm^{-1} , por apresentar ruído e não ser informativa foi removida no presente trabalho para todos os sítios em estudo. Segundo Hein (2008) esta faixa tende a apresentar bastante ruído, correspondendo esta gama de comprimento de onda à região da terceira harmônica. A absorção nesta faixa é de baixa intensidade, resultando em má qualidade das informações adquiridas. Assim a janela espectral ficou compreendida entre 9000-4000 cm^{-1} , onde encontram-se os picos de absorbância de interesse (Figura 22).

Figura 22 - Espectro bruto de teca proveniente do sítio de Alta Floresta com janela espectral de 9000-4000 cm^{-1} , divididos por região de ocorrência de grupos compostos.

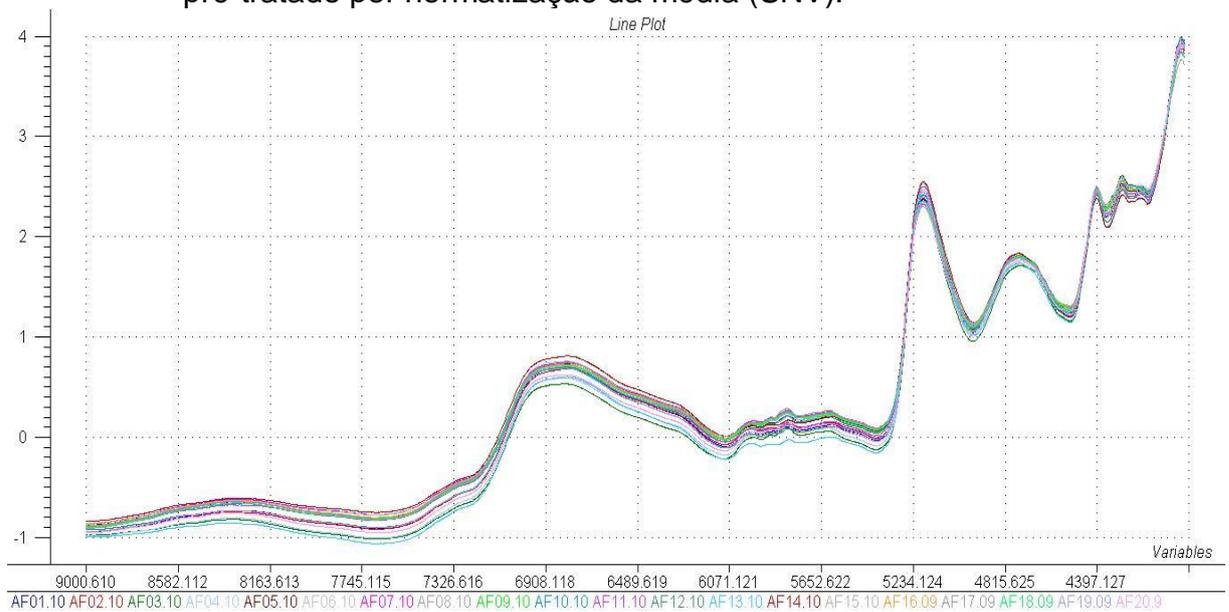


Fonte: Autor (2019). (Com base em ROSSO, 2010; SANDAK et al. 2016).

A Figura 22 apresenta os espectros divididos em regiões de ocorrência de grupos de compostos, em que cada banda de absorvância nos espectros refere-se a sobreposições de vibrações dos componentes químicos e os grupos funcionais. A faixa compreendida entre 9090,91 a 7692,30 cm^{-1} , refere-se a região do terceiro harmônico composta por CO-CH e do ArCH (presente na lignina) e pelos grupos funcionais -CH, CH₂ (celulose, hemicelulose e ligninas) e CH₃ (grupo CH₃ - lignina), referindo-se a região da segunda harmônica. Na faixa espectral de 7692,31 a 6250 cm^{-1} coincide ao grupo OH (celulose, hemicelulose lignina e água), referindo-se à primeira harmônica. A faixa de 6250 a 5263,16 cm^{-1} , compreende a primeira região de combinação de harmônicos, hidrocarbonetos (CH, CH₂ e CH₃) e ArCH, a região de primeira harmônica RCO₂H e RCO₂-R' e H₂O e a segunda harmônico do C=O (hemicelulose e lignina). A região de 5263,158 a 4545,45 cm^{-1} , refere-se à primeira combinação de OH e banda de combinação de ROH e combinação de CH, -CO, com presença de lignina, celulose, hemicelulose e água. A região 4545,45 a 4000 cm^{-1} compreende a banda de combinação de CH+CH, CH+C-C, C-C, CH, CH₂, CH₃ e H₂O, com presença de celulose e hemicelulose (ROSSO, 2010; SANDAK et al. 2016).

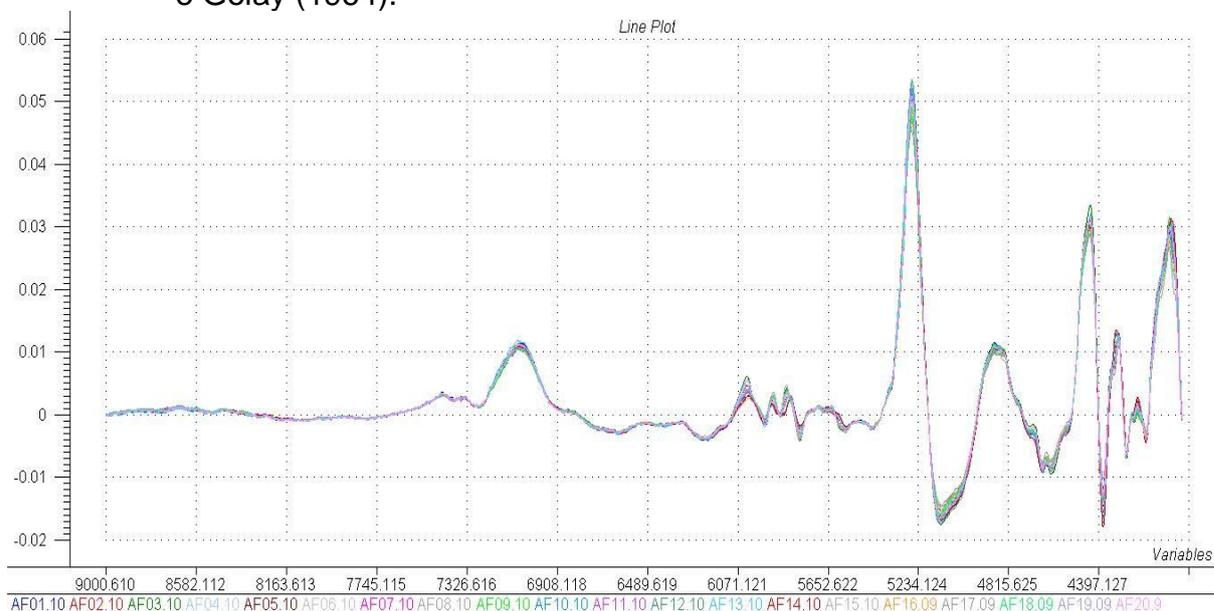
Os espectros após os pré-tratamentos da teca pertencente ao sítio Alta Floresta podem ser observados nas Figuras 23 e 24, apresentados apenas como modelo do processo, demonstrando os resultados após o pré-tratamento dos dados com normalização da média, SNV (*Standard Normal Variate Method*) e 1° derivada de Savitzky e Golay (1964).

Figura 23 - Espectros de absorvância de teca proveniente do sítio de Alta Floresta pré-tratado por normalização da média (SNV).



Fonte: Autor (2019).

Figura 24 - Espectros de absorvância de teca proveniente do sítio de Alta Floresta, pré-tratados por normatização da média (SNV) e a 1ª derivada de Savitzky e Golay (1964).



Fonte: Autor (2019).

5.9.2 Análise de componentes principais

Conforme a Tabela 13 a análise de componentes principais (PCA) foi executada para avaliar a relação entre as propriedades físicas (Dens. 12%), mecânicas (MOE e MOR) e anatômica (fibras). A análise foi realizada avaliando o conjunto de dados obtidos para os sítios e separando-os entre si, de forma a evitar ao máximo que as características inerentes as condições de crescimento da espécie, bem como tratamentos silviculturais empregados e a idade influenciassem nos resultados. De acordo com a Tabela 13, pode ser observado a variabilidade dos dados analisados para o conjunto de informações entre os sítios e para cada sítio, Alta Floresta, N.S. do Livramento e Cáceres, através das análises de componente principal. Para os espectros obtidos a partir dos corpos de prova, três componentes principais explicam 100% da variabilidade dos dados analisados. Entre os sítios 69% da variabilidade é explicada pela componente principal 1 (CP1), 27% pela componente principal 2 (CP2) e 4% pela componente principal 3 (CP3) de acordo com a Tabela 13. Considerando a análise individual de cada sítio, no caso de Alta Floresta, a

componente principal 1 (CP1) explica 92% da variabilidade dos dados e a componente principal (CP2) explica 7% e 1% pela componente principal 3 (PC3). Para a teca de Nossa Senhora do Livramento, 89% da variabilidade é explicado pela componente principal 1 (CP1), 8% pela componente principal 2 (PC 2) e 3% pela componente principal 3 (CP 3). Para o sítio de Cáceres, a componente principal 1 (CP1) explica 92% da variabilidade, 7% pela componente principal (CP2) e 1% pela componente principal 3 (CP 3) (Tabela 13).

Tabela 13 - Porcentagem de variância (var) e porcentagem de variância acumulada (vac) para a análise de PCA da teca proveniente de três sítios distintos.

pc scores	Entre os sítios		Alta Floresta		N.S. do Livramento		Cáceres	
	var	vac	var	vac	var	vac	var	vac
PC1	69%	69%	92%	92%	89%	89%	92%	92%
PC2	27%	96%	7%	99%	8%	97%	7%	99%
PC3	4%	100%	1%	100%	3%	100%	1%	100%

Observa-se que na análise conjunta dos sítios, há uma redução da variabilidade explicada pela componente principal 1 (CP1), podendo este fator estar relacionado as características do sítio, idade e pelos tratamentos silviculturais empregados no desenvolvimento dos plantios.

Ribeiro (2017) estudando 18 espécies nativas verificou que a componente principal 1 (CP1) explicava 94% da variabilidade dos dados e a componente principal 2 (CP2) 5%. As duas componentes principais (PC1 e PC2) responderam por 99% da variabilidade dos dados analisados. Rosso (2010) para os espectros obtidos a partir da madeira bruta de *Eucalyptus*, verificou que 2 componentes principais explicaram quase 100% da variabilidade dos dados, dos quais 99% são explicados pela componente principal 1 (PC1) e 1% pela componente principal 2 (PC2). Hein (2008) em espectros obtidos a partir da madeira bruta, verificaram que cinco componentes principais explicaram 100% da variabilidade dos dados analisados. Destes, 55% são explicados pela componente principal 1 (PC1), 36% pela componente principal 2 (PC2) e 6% pela componente principal 3 (PC3).

5.9.3 Calibração e validação para o comprimento de fibra

Entre os sítios o coeficiente de determinação de calibração (R^2c) e validação (R^2cv) foram de 0,72 e 0,49, respectivamente (Tabela 14).

Tabela 14 - Calibrações e validações para a estimativa do comprimento de fibra da madeira de *Tectona grandis* proveniente de sítios distintos, predito por NIR.

Sítio	Média (mm)	DP	outliers	RMSEC (mm)	R^2c	RMSECV (mm)	R^2cv	LV	RPD
Entre sítios	1,01	0,160	7	0,078	0,72	0,106	0,49	4	1,51
Alta Floresta	1,03	0,141	3	0,057	0,84	0,094	0,62	4	1,56
N.S.do Livramento	1,09	0,207	3	0,092	0,78	0,124	0,70	3	1,66
Cáceres	0,95	0,066	3	0,015	0,90	0,031	0,62	3	2,12

DP- desvio padrão; *Outlier* - número de amostras descartadas em porcentagem (%); R^2c - coeficiente de determinação da calibração; RMSEC - erro padrão da calibração; R^2cv - coeficiente de determinação da validação; RMSECV - erro padrão da validação; LV - número de variáveis latentes; RPD - relação de desempenho do desvio,

Para a análise individual entre os sítios (Tabela 14), o modelo ajustado para a teca de Alta Floresta apresentou um coeficiente de determinação de 0,84 (R^2c), para o lote de calibração de 0,62 (R^2cv) e para a validação cruzada e relação de desempenho do RPD de 1,56. Para N.S. do Livramento o coeficiente de determinação e de calibração apresentados foram, respectivamente, de 0,78 (R^2c) e 0,70 (R^2cv). A relação de desempenho (RPD) foi de 1,66. Cáceres apresentou 0,90 (R^2c) para o coeficiente de determinação e para o de validação de 0,62 (R^2cv). Entre os sítios, este foi o que apresentou o maior valor para a relação de desempenho de 2,12 (RPD). Os valores apresentados pela relação de desempenho (RPD) > 1,5 demonstram-se satisfatórios para leitura de predições preliminares, recebendo destaque os sítios de Alta Floresta e Cáceres. Estes também apresentam baixo RMSEC (0,057 mm e 0,015 mm) e RMSECV (0,094 mm e 0,031 mm), respectivamente.

As correlações baseadas no conjunto de dados, ou seja, entre os sítios no presente trabalho foram menores do que as dos sítios individuais, semelhante ao resultado obtido por Sykes et al. (2005), ao avaliarem o comprimento das fibras no lenho tardio e primaveril de *Pinus taeda*, proveniente de dois sítios do Sul da Carolina, os melhores resultados obtidos para as calibrações e validações ocorreram quando os sítios foram analisados individualmente. Segundo os autores os resultados sugerem que fatores ambientais, podem afetar o comprimento da fibra, ficando evidente quando os dados de ambos os sítios foram usados para criar equações de calibração, semelhante ao resultado obtido para a calibração e validação entre os sítios.

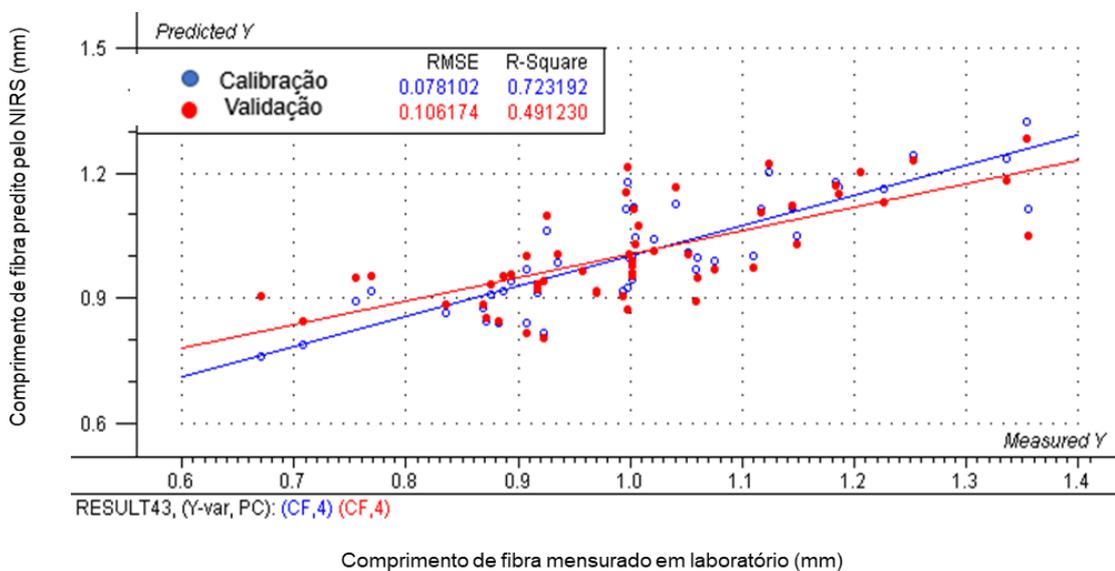
Viana (2008) avaliando seis clones de *Eucalyptus*, encontrou para o comprimento da fibra, na regional Cocais e Guanhães, respectivamente, os valores para o coeficientes de correlação na validação cruzada, R^2_{cv} de 0,88 e 0,67 e erro padrão de 0,039 e 0,046 mm, a relação de desempenho de 2,2 e 1,4. A regional Rio Doce, apresentou os valores de 0,84 (R^2_{cv}) e 0,035 mm (RMSECV) com relação de desempenho de 2,5. Com o RPD variando de 2,2 a 2,5, estes dados são superiores aos encontrados neste trabalho. Com o $RPD > 1,5$ a técnica utilizada foi considerada satisfatória para prever o comprimento de fibra de teca para os sítios estudados.

Ribeiro (2017) avaliando 20 espécies nativas, com o mesmo tipo de tratamento matemático do presente trabalho, obteve para o comprimento de fibra pela técnica NIR (face tangencial) a calibração com R^2 0,76 e a predição com R^2 0,74, com a retirada de 4 outliers e a relação de desempenho de 2,03 (RPD) com 8 variáveis latentes (LV). O resultado do presente trabalho demonstra que a face radial também pode ser empregada para o uso da predição do comprimento da fibra, pois apresentou resultados semelhantes.

Os dados do presente trabalho mostram poucas diferenças dos apresentados por Nabivi et al. (2018), em que desenvolvendo modelos de calibração pra *Pinus taeda*, utilizando o NIR com espectros coletados na face radial, os modelos de PLS preditivos para comprimento da fibra (traqueídeo) foram fortes quando verificados com o conjunto de validação, $R_p^2 = 0,87$, erro padrão de previsão (SEP) = 0,23 mm e relação de desempenho para desvio (RPD) = 2,8.

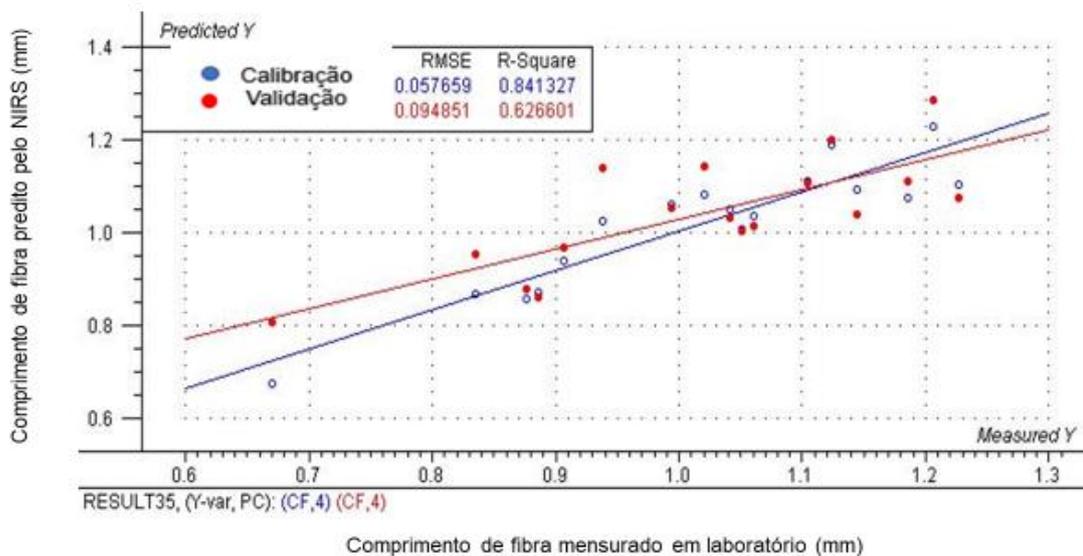
As Figuras 25, 26, 27 e 28 apresentam os valores reais (mensurados em laboratório) e os valores preditos por NIR da calibração do modelo para a variável CF (comprimento de fibra). Os valores mensurados em laboratório e preditos pelo NIR, são analisados em conjunto e individual para os sítios em estudo.

Figura 25 - Calibração e validação cruzada do modelo para o comprimento médio das fibras de teca entre os sítios, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.



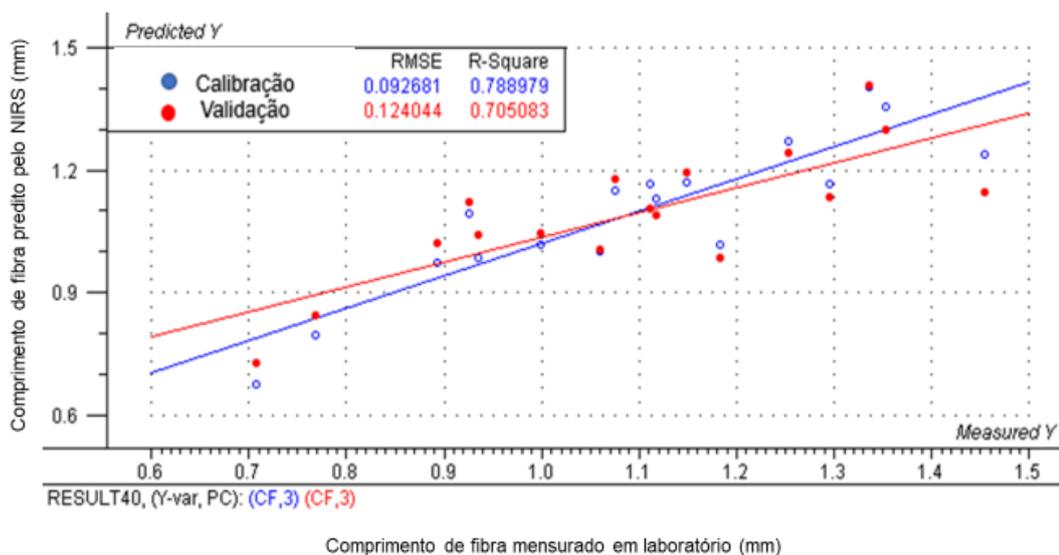
Fonte: Autor (2019).

Figura 26 - Calibração e validação cruzada do modelo para o comprimento médio das fibras de teca para o sítio Alta Floresta, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.



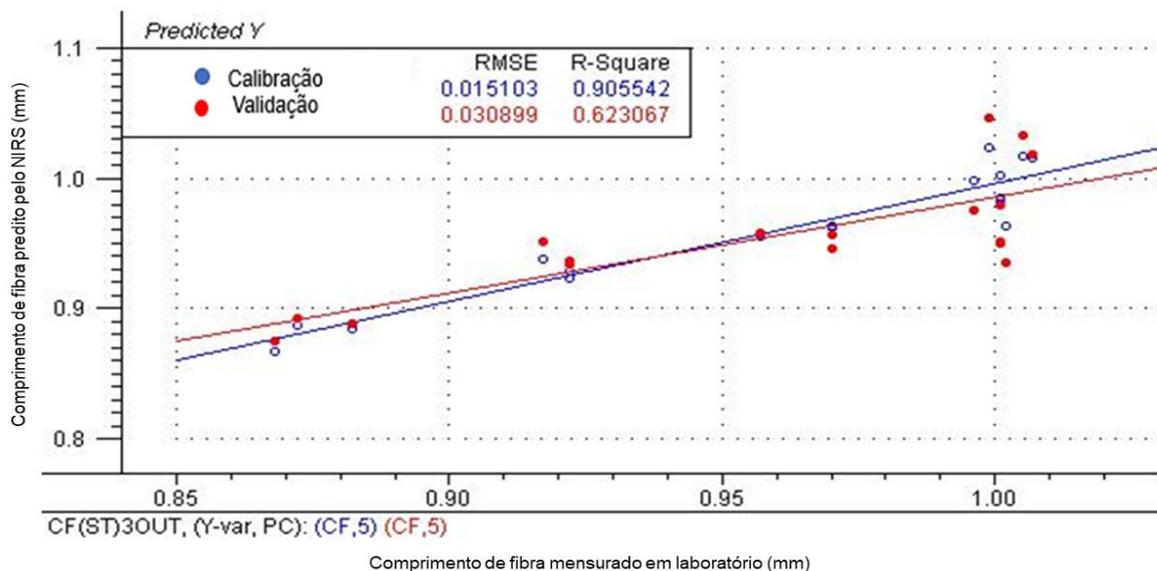
Fonte: Autor (2019).

Figura 27 - Calibração e validação cruzada do modelo para o comprimento médio das fibras de teca proveniente do sítio de Nossa Senhora do Livramento, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.



Fonte: Autor (2019).

Figura 28 - Calibração e validação cruzada do modelo para o comprimento médio das fibras de teca proveniente do sítio Cáceres, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.



Fonte: Autor (2019).

Ao analisar as Figuras 25, 26, 27 e 28 que apresentam os valores das fibras mensurados em laboratório e preditos pelo NIR é possível verificar a variabilidade e a proximidade dos valores através da correlação dos dados e do erro padrão da validação para a análise conjunta que demonstra uma baixa correlação. A individual dos sítios apresenta uma moderada correlação. Segundo Fujimoto et al., (2010) isso pode ser devido a uma estreita variação dos dados. De forma geral, as curvas de sítio obtidas pelo NIR são satisfatórias para prever o comprimento das fibras.

5.9.4 Calibração e validação da densidade a 12% de umidade

As calibrações para predizer a densidade a 12% de umidade da madeira de teca para os sítios estudados são apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15- Calibração e validação para a estimativa da densidade a 12% da madeira de *Tectona grandis*, proveniente de três sítios distintos, predito por NIR.

Sítio	Média (kg.m ³)	DP	Outliers	RMSEC (kg.m ³)	R ² c	RMSECV (kg.m ³)	R ² cv	LV	RPD
Entre sítios	619,37	68,35	8	12,384	0,96	32,459	0,72	8	2,10
Alta Floresta	577,79	41,40	3	8,332	0,95	14,402	0,87	3	2,87
N.S.do Livramento	589,0	39,06	3	8,036	0,96	18,311	0,84	5	2,13
Cáceres	691,29	52,98	2	11,458	0,94	34,558	0,57	6	1,57

DP- desvio padrão; *Outlier* - número de amostras descartadas em porcentagem (%); R²c - coeficiente de determinação da calibração; RMSEC - erro padrão da calibração; R²cv - coeficiente de determinação da validação; RMSECV - erro padrão da validação; LV - número de variáveis latentes; RPD - relação de desempenho do desvio.

Para a avaliação entre os sítios o coeficiente de calibração (R²c) e validação (R²cv) foram, respectivamente de 0,96 e 0,72. A relação de desempenho (RPD) para este caso foi de 2,10, porém apresentando valores altos para o RMSEC= 12,384 kg.m⁻³ e para RMSECV= 32,459 kg.m⁻³. Dentre os sítios em estudo, Alta Floresta, apresentou o maior valor do RPD de 2,87, com um coeficiente de determinação de calibração de 0,95 e de validação de 0,87. Ainda apresentou o menor valor para o erro padrão de validação (RMSECV) de 14,402 kg.m⁻³, utilizando-se três variáveis latentes (LV), com o melhor ajuste. N.S. do Livramento também apresentou forte correlação dos dados (R²cv= 0,84) e coeficiente de determinação da calibração (R²c= 0,96) e ainda um bom RPD de 2,13, demonstrando a eficiência na predição do modelo para a densidade a 12%. Para o sítio de Cáceres, apesar do valor de 0,57 (R²cv) e do RPD de 1,57, sendo considerado satisfatório para esta propriedade. Lembrando que para este caso, o R²c foi de 0,92.

Schimleck et al. (2018) avaliando a densidade a 12% para amostras de madeira obtidas de várias espécies de pinus (*Pinus caribaea* var, *Bahamensis*, var,

hondurensis e var, *caribaea*, *P. chiapensis*, *P. maximinoi*, *P. oocarpa*, *P. taeda* e *P. tecunumanii*), utilizando três métodos de obtenção dos espectros, *foss direct*, *foss probe* e *ASD probe*, encontraram, respectivamente, $R^2= 0,81$ e $RPD= 2,1$ (face radial), $R^2= 0,80$ e $RPD= 2,2$ (face transversal); $R^2= 0,51$ e $RPD= 1,4$ (face radial) e $R^2= 0,68$ e $RPD= 1,7$ (face transversal); $R^2= 0,73$ e $RPD= 2,0$ (face radial) e $R^2= 0,70$ e $RPD= 1,8$ (face transversal). Os valores para estes parâmetros no presente trabalho, de uma forma geral, são superiores.

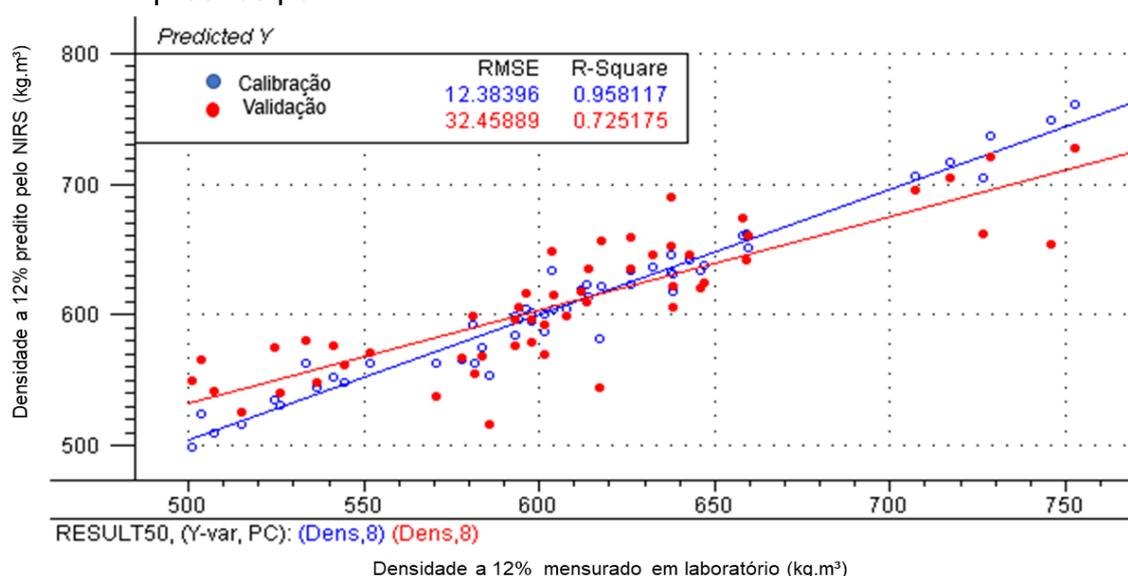
Fujimoto et al. (2010) verificando a viabilidade de espectroscopia de infravermelho próximo para classificação em linha de madeira serrada de Larício japonês (*Larix kaempferi*) na face tangencial, utilizando espectros brutos e com os tratamentos de correção multiplicativa de dispersão e 2º derivada, encontraram para a densidade aparente, respectivamente, os valores de R^2cv 0,70, 0,68 e 0,68 (coeficiente de validação) para o coeficiente de calibração R^2c de 0,45, 0,56 e 0,59. O RMSEVC (erro de padrão de validação cruzada) foram de 31,90 kg.m⁻³, 33,08 kg.m⁻³, 33,46 kg.m⁻³ e o RMSEC (erro de calibração) de 35,34 kg.m⁻³, 41,79 kg.m⁻³, 33,93 kg.m⁻³, com o RPD (relação de desempenho do desvio) de 1,66, 1,40, 1,73, para os dados brutos, MSC e 2 derivada, respectivamente. Segundo os autores as correlações apresentadas foram consideradas moderadas e a precisão dos modelos de calibração para prever cada propriedade da madeira será melhorada se os espectros NIR forem adquiridos na superfície radial da madeira. De fato, é o que demonstra o presente trabalho, onde os espectros NIR foram obtidos na face radial. Mostrando valores melhores dos índices das variáveis mencionadas.

Ribeiro (2017) trabalhando com o mesmo tratamento matemático deste trabalho, encontrou para a densidade básica, o modelo ajustado com o melhor desempenho fornecendo um coeficiente de determinação de calibração de 0,91 e de validação de 0,90. Onde foram retirados 3 *outliers*, o erro padrão da validação foi de 0,047 g.cm³ e a relação de desempenho do desvio (RPD) de 3,31, considerado alto, e utilizando 7 variáveis latentes (LV). Ribeiro (2009) analisando as faces da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea*, verificou que a face que melhor prediz os valores de densidade básica é a tangencial, tanto na validação cruzada, quanto na validação independente.

Gouvêa et al. (2011), investigando diferentes métodos de avaliação não destrutiva da madeira (Resistógrafo, Pilodyn e Espectroscopia de Infravermelho Próximo-NIRS) para predição da densidade básica da madeira, verificou que o Resistograph® mostrou-se mais adequado para estimar a densidade básica da madeira, comparado ao pilodyn e ao NIRS. Porém com o baixo erro de predição verificado com o modelo gerado pelo NIRS, concluiu ser esta técnica viável para prever a densidade básica da madeira de *Eucalyptus*.

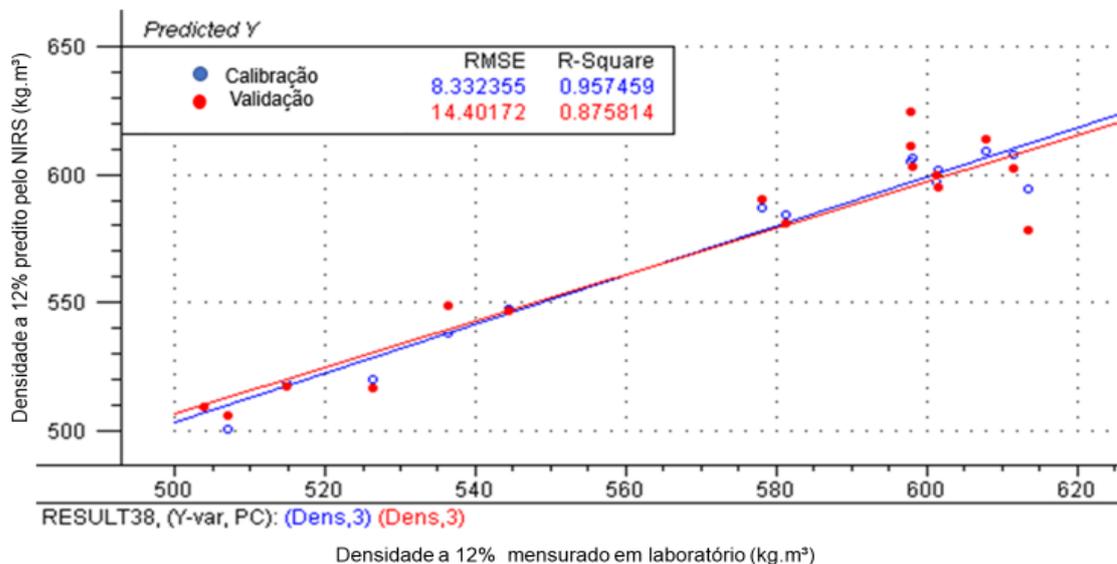
As Figuras 29, 30, 31 e 32 mostram os valores reais (mensurados em laboratório) e os valores preditos por espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) da calibração do modelo para a variável densidade a 12% (Dens.) para o conjunto e individualmente para os sítios. Destaca-se para esta variável, os sítios de Alta Floresta e de N.S. do Livramento por apresentarem os menores RMSEC (8,332 kg.m⁻³ e 8,036 kg.m⁻³, respectivamente) e o RMSECV de 14,402 kg.m⁻³ e 18,311 kg.m⁻³, respectivamente. Apesar de não ser comum o uso da densidade da madeira a 12% de umidade para a análise de referência, o presente trabalho demonstra a possibilidade do emprego desta propriedade, apresentando parâmetros com valores bem satisfatórios.

Figura 29 - Calibração e validação cruzada do modelo para a densidade a 12% de teca entre os sítios, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.



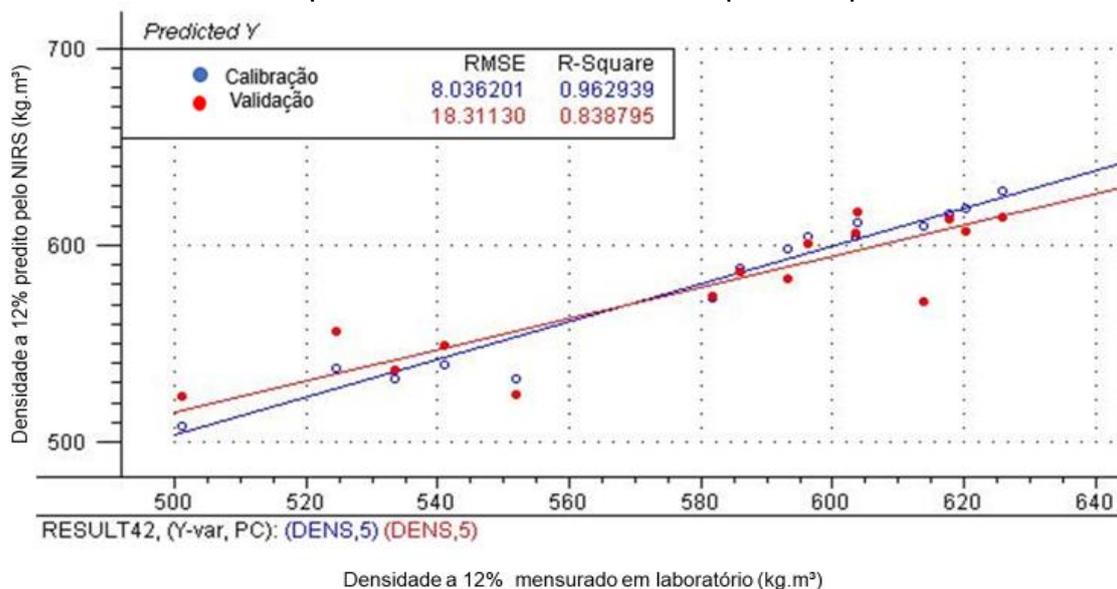
Fonte: Autor (2019).

Figura 30 - Calibração e validação cruzada do modelo para a densidade básica de teca proveniente do sítio Alta Floresta, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.



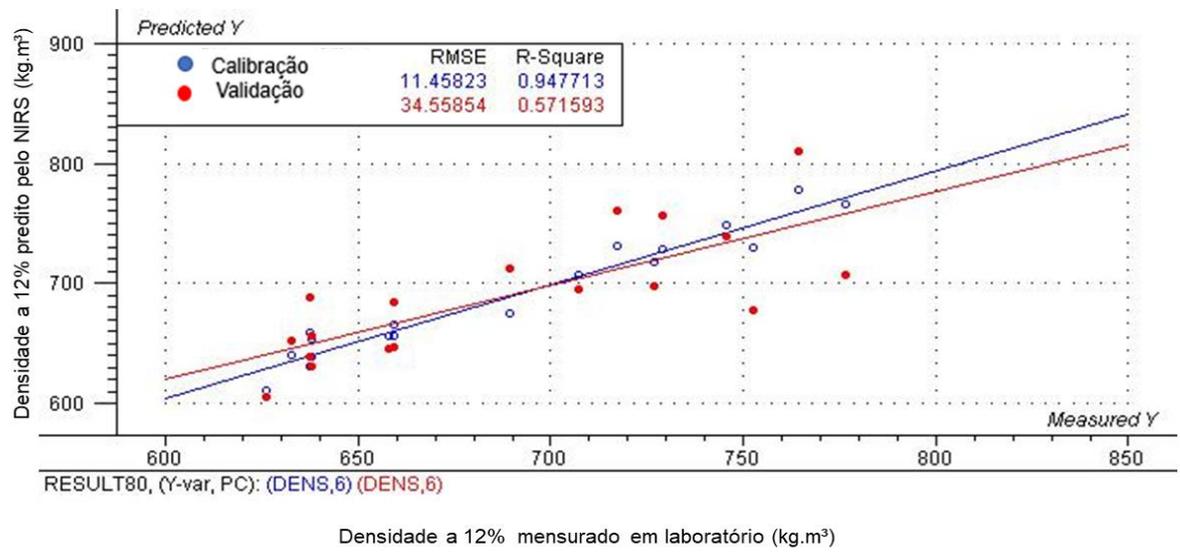
Fonte: Autor (2019).

Figura 31 - Calibração e validação cruzada do modelo para a densidade a 12% umidade de teca proveniente do sítio N. S. do Livramento, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.



Fonte: Autor (2019).

Figura 32 - Calibração e validação cruzada do modelo para a densidade a 12% umidade de teca proveniente do sítio Cáceres, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.



Fonte: Autor (2019).

5.9.5 Calibração e validação para o módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura da madeira (MOR) da madeira de teca para os sítios estudados.

As Tabelas 16 e 17 e as Figuras de 33 a 36 apresentam as calibrações para prever o módulo de elasticidade (MOE) obtidos nos ensaios de flexão estática da madeira de teca para a avaliação conjunta entre os sítios e para cada sítio individualmente.

Tabela 16- Calibração e validação para o módulo de elasticidade em flexão estática da madeira de *Tectona grandis* proveniente de três sítios distintos, predito por NIR.

Sítio	Média MOE (MPa)	DP	outliers	RMSEC (MPa)	R ² c	RMSECV (MPa)	R ² cv	LV	RPD
Entre sítios	15887,33	5311,93	8	2374,58	0,76	2897,81	0,64	3	1,83
Alta Floresta	11611,69	1126,74	3	336,29	0,75	461,51	0,62	2	2,44
N.S.do Livramento	16128,45	1707,45	3	128,12	0,99	916,31	0,75	8	1,86
Cáceres	19921,41	6682,82	3	3107,45	0,77	4298,75	0,58	2	1,55

DP- desvio padrão; *Outlier* - número de amostras descartadas em porcentagem (%); R²c - coeficiente de determinação da calibração; RMSEC - erro padrão da calibração; R²cv - coeficiente de determinação da validação; RMSEV - erro padrão da validação; LV - número de variáveis latentes; RPD - relação de desempenho do desvio.

De uma forma geral, os modelos apresentaram boa qualidade, validando os modelos gerados, os sítios Alta Floresta e Cáceres, com duas variáveis latentes, apresentaram o menor erro de previsão para a validação em relação ao erro padrão de calibração, o mesmo resultado obtido entre os sítios. Enquanto o sítio N.S. do Livramento, apesar de apresentar os valores mais altos para o R²c e R²cv, em relação aos demais sítios apresentou o maior erro padrão de validação (RMSECV) em relação ao erro padrão de calibração (RMSEC), usualmente os valores para o erro do RMSECV e RMSEC são bem próximos.

O módulo de elasticidade (MOE) em flexão estática em análise conjunta dos sítios foram ajustados em 0,76 para a calibração e 0,64 para a validação. Para o sítio

de Alta Floresta foram ajustados em 0,75 para calibração e 0,62 para a validação. O sítio N.S. do livramento apresentou coeficiente de determinação da calibração de 0,99 (R^2c) e para a validação de 0,75 (R^2cv). Para o sítio de Cáceres os valores para o coeficiente de calibração e validação foram, respectivamente, 0,77 (R^2c) e 0,58 (R^2cv). Dentre os sítios o que apresentou o melhor valor para a relação do desempenho (RPD) foi o sítio Alta Floresta (2,44).

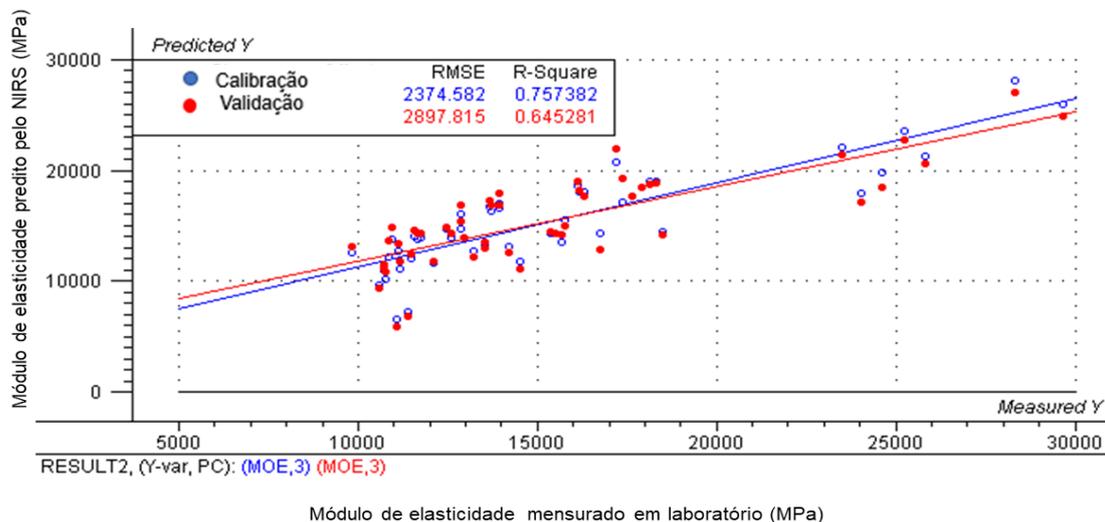
Para esta propriedade, Ribeiro (2017) em seu trabalho, encontrou para o módulo de elasticidade valores para o coeficiente de determinação na calibração e na validação de 0,53 e 0,46, respectivamente e para relação de desempenho do desvio foi de 1,41. Conforme a autora as calibrações para estimar o MOE a partir da madeira sólida, não foram satisfatórios, apresentando baixa correlação e baixa relação de desempenho do desvio. Os valores para o presente trabalho para o RPD são superiores, talvez em função da face de estudo (radial).

Corrêa Queiroz (2018), trabalhando com teca de seis procedências, coletando espectro na faixa transversal dos discos, separando o cerne e o alburno, encontrou para o módulo de elasticidade o coeficiente de determinação para a validação cruzada para o cerne e alburno, respectivamente, de 0,60 e 0,63, e a relação de desempenho do desvio de 1,59 para ambos os perfis analisados. Os resultados do presente trabalho demonstram que os espectros medidos na face radial fornecem modelos mais precisos. Segundo Hein et al. (2009) as informações a respeito da densidade e propriedades mecânicas estão contidas de forma complexa nos espectros medidos no infravermelho próximo, suspeitando-se que a face radial contenha informações mais importantes para a construção do modelo de regressão.

Rosso (2010) observou para módulo de elasticidade para o *Eucalyptus*, com espectros obtidos na face radial, valores para o coeficiente de determinação da calibração e da validação de 0,66 e 0,65, respectivamente, e relação de desempenho do desvio de 1,78.

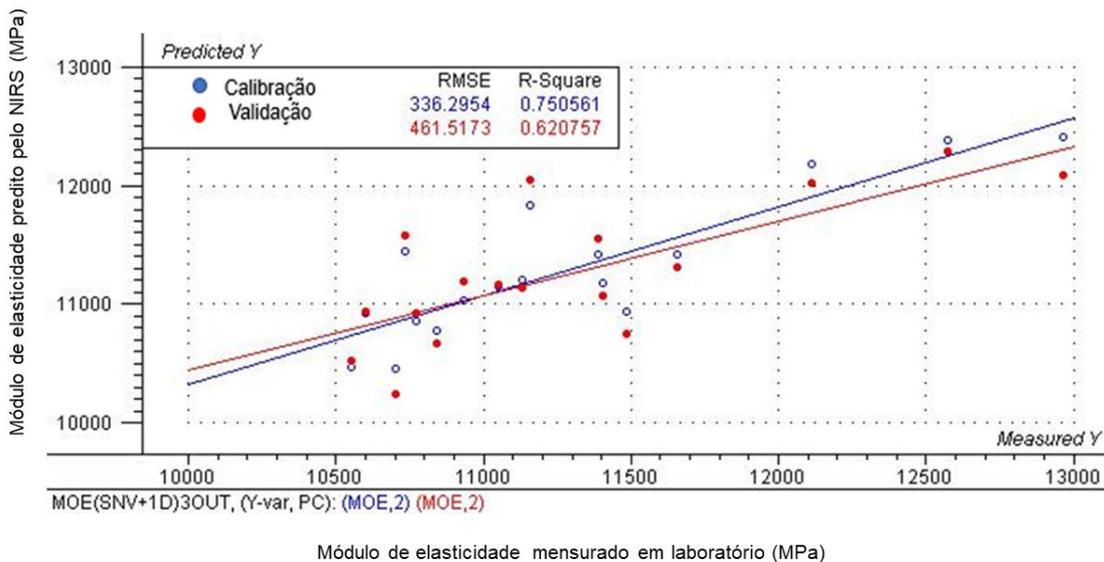
As Figuras 33, 34, 35 e 36 evidenciam a correlação entre valores mensurados em laboratório e os preditos pelo NIR, para o módulo de elasticidade da madeira de teca para os sítios estudados.

Figura 33 - Calibração e validação cruzada do modelo para o módulo de elasticidade de teca entre os sítios, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.



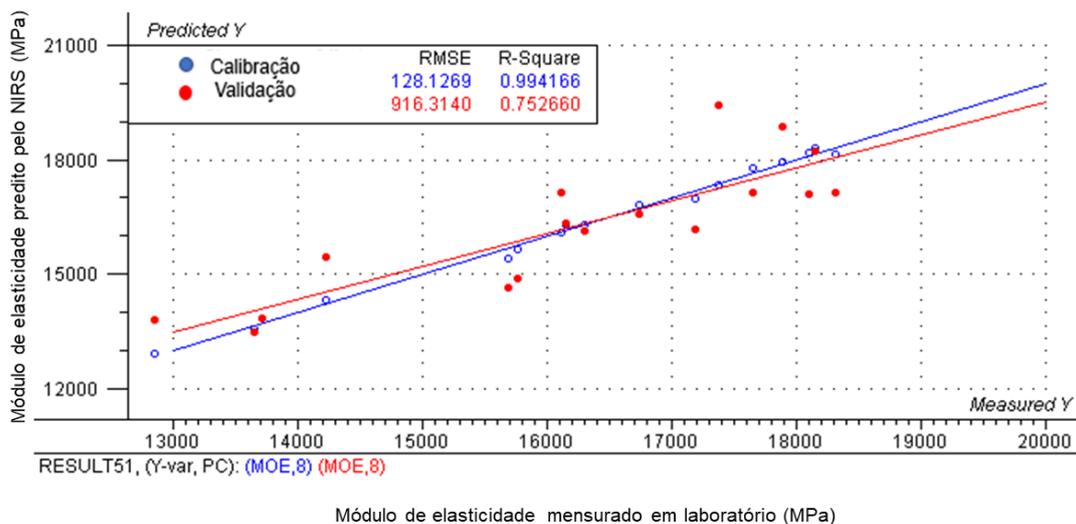
Fonte: Autor (2019).

Figura 34 - Calibração e validação cruzada do modelo para módulo de elasticidade em flexão estática para a teca proveniente de Alta Floresta, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.



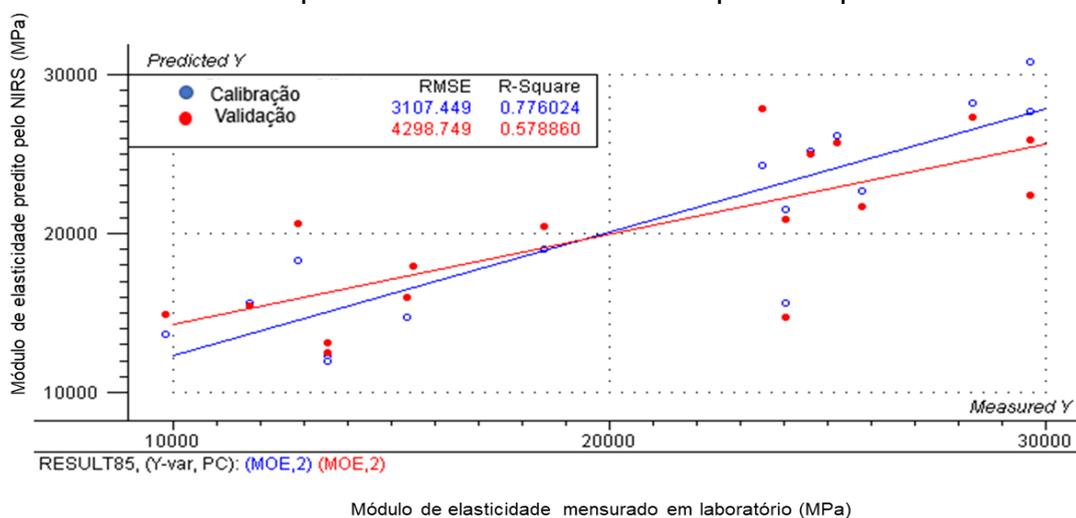
Fonte: Autor (2019).

Figura 35 - Calibração e validação cruzada do modelo para o módulo de elasticidade em flexão estática para a teca proveniente N. S. do Livramento, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.



Fonte: Autor (2019).

Figura 36 - Calibração e validação cruzada do modelo para o módulo de elasticidade em flexão estática para a teca proveniente do sítio Cáceres, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.



Fonte: Autor (2019).

Verifica-se que os modelos para predição do MOE utilizando-se o NIR e a face radial neste estudo mostra-se com comportamento superior em relação a tangencial, conforme visto nos trabalhos de outros autores citados.

A análise conjunta dos dados entre os sítios para o módulo de ruptura (Tabela 17) apresentou valores baixos para o coeficiente de calibração de 0,37 (R^2c) e 0,15 para a validação (R^2cv). Porém quando os sítios são observados de forma individual ocorre uma melhora para estes parâmetros. O módulo de ruptura para os sítios Alta Floresta e N.S. do Livramento apresentaram os valores para coeficiente de determinação para a calibração de 0,87 e 0,85, respectivamente, e para a validação de 0,58 e 0,63, respectivamente, com os valores de relação de desempenho de 1,41 e 1,34, respectivamente. O sítio de Cáceres apresentou os valores de 0,72 para o coeficiente de calibração (R^2c) e 0,52 para o coeficiente de validação (R^2cv), com a relação de desempenho de 1,32. Apesar de apresentarem bons coeficientes de calibração e validação quando avaliados individualmente os sítios apresentaram valores baixos para a relação de desempenho (RPD).

Tabela 17 - Calibração e validação módulo de ruptura (MOR) em flexão estática da madeira de *Tectona grandis* proveniente de três sítios distintos, predito por NIR.

Sítio	Média MOR (MPa)	DP	outliers	RMSEC (MPa)	R^2c	RMSECV (MPa)	R^2cv	LV	RPD
Entre sítios	103,67	10,00	8	7,577	0,37	8,863	0,15	3	1,13
Alta Floresta	100,25	14,09	3	5,125	0,87	9,984	0,58	4	1,41
N.S.do Livramento	101,40	1,88	3	0,772	0,85	1,405	0,63	4	1,34
Cáceres	109,70	7,04	3	3,974	0,72	5,321	0,56	2	1,32

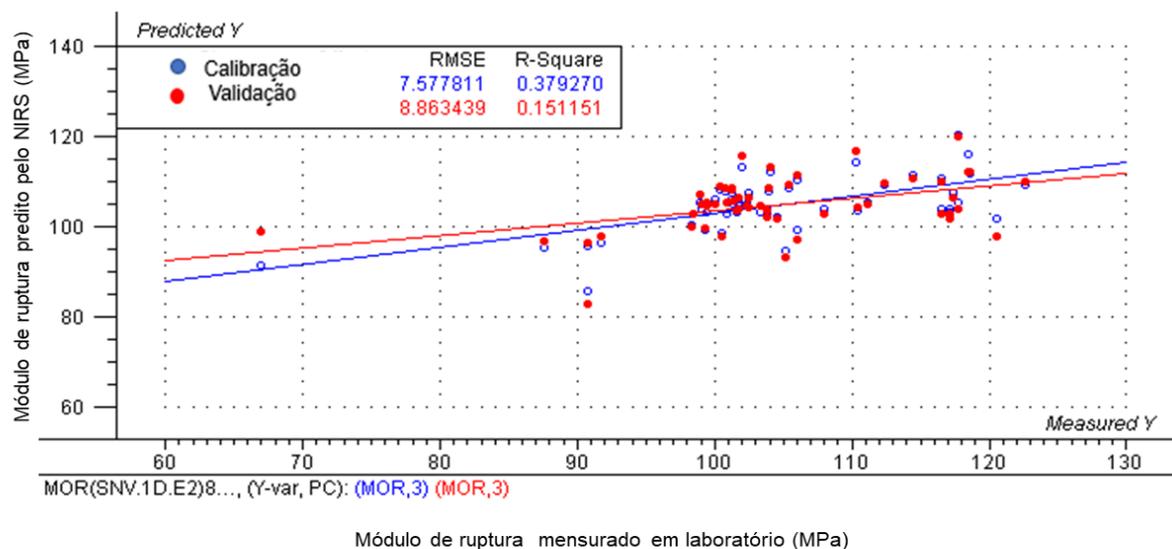
DP- desvio padrão; *Outlier* - número de amostras descartadas em porcentagem (%); R^2c - coeficiente de determinação da calibração; RMSEC - erro padrão da calibração; R^2cv - coeficiente de determinação da validação; RMSECV - erro padrão da validação; LV - número de variáveis latentes; RPD - relação de desempenho do desvio,

Rosso (2010) estudando a calibração de modelo para MOR na face radial para o *Eucalyptus* verificou um coeficiente de determinação da calibração igual a 0,63 e coeficiente de determinação da validação de 0,437 e RDP de 1,40. Enquanto Ribeiro (2017) em seu estudo, os valores de 0,52 e 0,44 para a calibração e validação, com a relação de desempenho de 1,38 (RPD). Observa-se também valores baixos de calibração e validação para o MOR, inferiores aos encontrados no presente trabalho. Corrêa Queiroz (2018) confirma esta tendência de ajustes não satisfatórios para o

MOR em flexão estática, pois o modelo preditor gerado a partir de 60 amostras de referência e de 180 espectros em seu trabalho, tem R^2_{cv} de 0,52 para o alburno e de 0,24 para o cerne, com os respectivos RPD de 1,43 de 1,14.

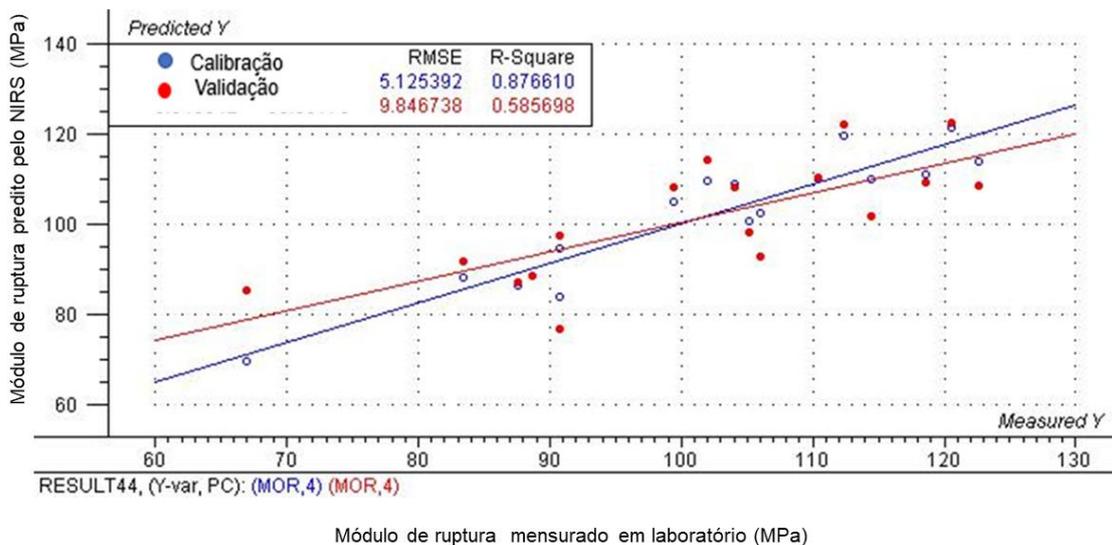
As Figuras 37, 38, 39 e 40 apresenta a correlação entre valores mensurados em laboratório e os preditos pelo NIR, para o módulo de ruptura da madeira de teca. Observa-se uma fraca correlação entre valores mensurados em laboratório e preditos pelo NIR, quando avaliado os resultados entre os sítios. Os coeficientes de determinação na calibração foram bons validando os modelos, para a análise individual dos sítios.

Figura 37 - Calibração e validação cruzada do modelo para o módulo de elasticidade de teca entre os sítios, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.



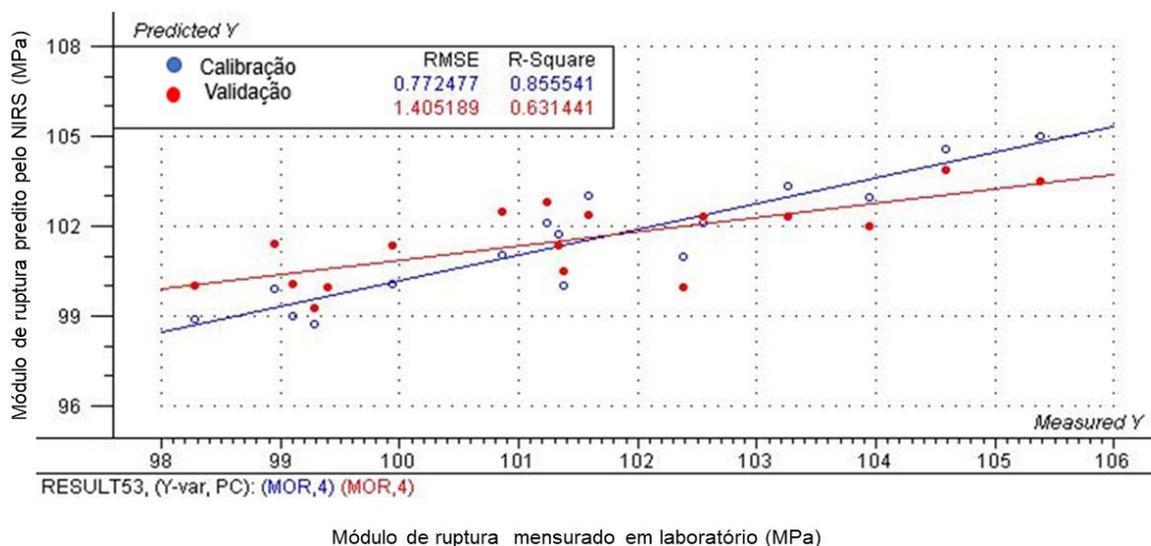
Fonte: Autor (2019).

Figura 38 - Calibração e validação cruzada do modelo para o módulo de ruptura em flexão estática para a teca proveniente do sítio Alta Floresta, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.



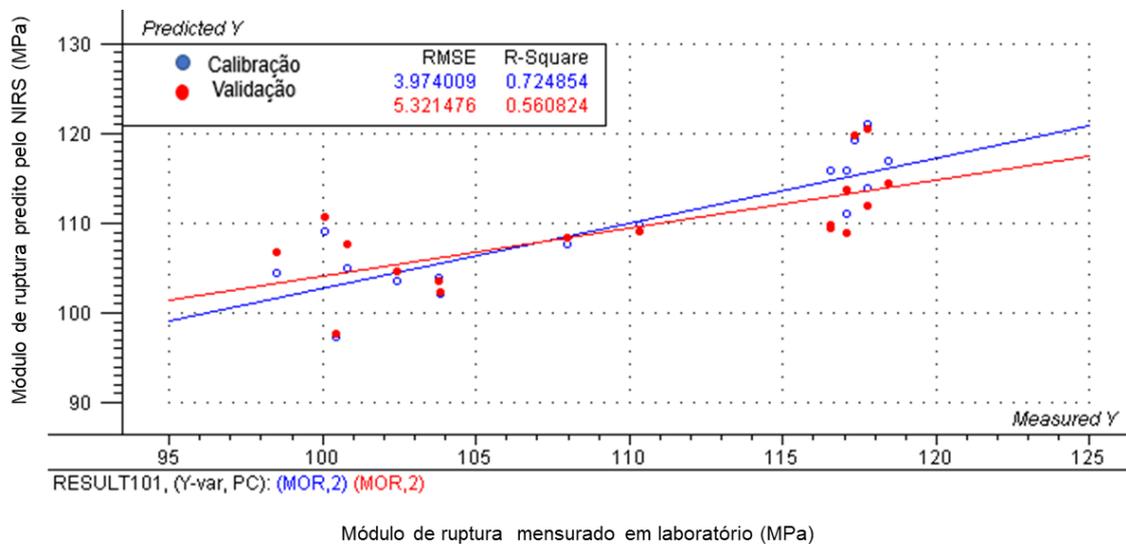
Fonte: Autor (2019).

Figura 39 - Calibração e validação cruzada do modelo para o módulo de ruptura em flexão estática para a teca proveniente do sítio N. S. do Livramento, obtidas em laboratório pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.



Fonte: Autor (2019).

Figura 40 - Calibração e validação cruzada do modelo para o módulo de ruptura em flexão estática para a teca proveniente do sítio Cáceres obtidas em laboratório, pelos métodos tradicionais e preditos por NIR.



Fonte: Autor (2019).

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Este estudo com a madeira de teca proveniente de três sítios distintos do estado do Mato Grosso permite concluir:

O sítio influenciou nos parâmetros das fibras (comprimento, largura da fibra, diâmetro do lume e espessura da parede) e nos raios (comprimento, largura e frequência). No entanto não foram evidenciadas influência relacionadas aos vasos.

Os parâmetros colorimétricos da madeira de teca não sofreram influências das características do solo, do clima e nem dos tratamentos silviculturais, apresentando a mesma coloração marrom-oliva para os três sítios.

Para os constituintes químicos da madeira de teca o sítio mostrou grande influência principalmente para o teor de extrativo e para o teor de cinzas. No entanto não foram observadas influência relacionado ao teor de lignina solúvel (TLsol). Os fatores como o solo e a idade dos plantios são os principais responsáveis por essas variações.

Apesar de nem sempre apresentarem diferenças significativas entre os sítios, a densidade básica, as retratibilidades e o coeficiente de anisotropia sofreram influência dos sítios. Para os três sítios em estudo a teca apresentou valores de coeficiente de anisotropia que classifica a sua madeira como de excelente estabilidade (sítio de Cáceres) e de estabilidade normal para os outros dois sítios (Nossa Senhora do Livramento e Alta Floresta).

As diferenças encontradas para as propriedades físicas e mecânicas para os diferentes sítios, como a densidade a 12%, o módulo de elasticidade estático, o módulo de ruptura, os módulos de elasticidades dinâmicos (ondas de tensão e ultrassonora) demonstram que fatores relacionados a idade, desbaste, adubação e índice pluviométrico podem influenciar nestas propriedades.

O método de propagação de ondas de tensão se mostrou mais adequado para estimar o módulo de elasticidade dinâmico (MOEds), em relação ao método de ondas

ultrassonoras (MOEdu), ambas as técnicas apresentam a vantagem de não alterar as propriedades físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais da madeira. O MOEds apresenta valores mais próximo do MOE estático, enquanto o MOEdu superestima. As velocidades de propagação de ondas (ondas de tensão e ultrassonora) não apresentaram diferenças significativas entre os sítios, demonstrando que o material não apresentava defeitos ou descontinuidade.

Foram observadas relação direta para os três sítios em estudo entre a velocidade das ondas de tensão (Vels) com o MOEds, ocorrendo o mesmo para a velocidade ultrassonora com o MOEdu.

As calibrações baseadas em regressão dos mínimos quadrados parciais para correlacionar espectros medidos no infravermelho próximo com o comprimento da fibra (CF), a densidade aparente (D12%) e o módulo de elasticidade (MOE) da madeira de teca apresentaram estatísticas satisfatórias em que os modelos ajustados por regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS) a partir dos espectros tratados apresentaram bons coeficientes de determinação. Não ocorrendo o mesmo para o módulo de ruptura.

Como sugestões para futuros trabalhos:

Os estudos de propriedades da madeira entre sítios deverão aumentar o número de árvores, assim como o número de amostras dos ensaios. Isso poderá melhorar os estudos de correlações entre as propriedades.

Para o estudo das propriedades químicas da madeira, a determinação dos constituintes químicos (química fina), principalmente dos extrativos, responsável pela pigmentação natural da madeira, com o objetivo de detalhar e determinar entre os flavonoides e polifenóis com quais propriedades químicas do solo apresentam correlação, com o objetivo de explicar a existência de influência das suas relações na cor da madeira.

Recomenda-se estudos com as propriedades químicas, com mensuração do ângulo microfibrilar e com os parâmetros colorimétricos para a teca utilizando a técnica de infravermelho próximo (NIR), para a predição de suas propriedades;

Para estudos relacionados a espectroscopia no infravermelho, recomenda-se obter espectros nas faces radial, tangencial, transversal e através de material moído para determinar dentre elas quais apresentarão os modelos preditivo mais satisfatório para as propriedades anatômica, física e mecânica para a teca.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6231**: Postes de Madera – Resistência à Flexão: ABNT. Rio de Janeiro, 4p. 1980.

ABREU, H. S.; OERTEL, A. C. Estudo químico da lignina de *Paullinia rubiginosa*. **Cerne**, Lavras, MG, v. 5, n. 1, p. 52-60, 1999.

AGUINALDO SILVA, A.; SOUZA FILHO, E. E. DE; CUNHA, S. B. Padrões de canal do rio Paraguai na região de Cáceres (MT). *Revista Brasileira de Geociências*. v. 38, n.01, p. 2- 8. Disponível em: www.sbgeo.org.br.

ANGELI, A. ***Tectona grandis*** (Teca): Identificação de espécies florestais. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – IPEF. Piracicaba, SP. 2003. Disponível em <<http://www.ipef.br/identificacao/tectona.grandis.asp>>. Acesso em: 28 de junho de 2015.

ANISH, M. C.; ANOOP, E. V.; VISHNU, R.; SREEJITH, B.; JIJEEESH, C. M. Effect of growth rate on wood quality of teak (*Tectona grandis* L. f.): a comparative study of teak grown under differing site quality conditions. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, v. 12, n.1, p. 81–88, 2015.

ALVES, R. C.; MOTTA, J. P.; OLIVEIRA, J. T. da S. Relação entre a estrutura anatômica e algumas propriedades da madeira de Angelim-Pedra (*Hymenolobium petraum*, leguminosae), **XII- Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e IX Encontro Latino Americano de Pós-Graduação** – Universidade do Vale do Paraíba. Disponível em: <http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2009/anais/arquivos/RE_1143_1428_01.pdf>. 2009. Acesso em: Jun. 2017.

ALMEIDA, C. F. A. M.; DEL MENEZZI, C. H.; SILVA, T. C. da. Uso da avaliação não destrutiva em vigotas de angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke), **Ciência da Madeira** (Braz. J. Wood Sci.), Pelotas, v. 03, n. 02, p. 128-143, nov. de 2012.

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

ANDRADE, C. R.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; QUINHONES, R.; LIMA, J. T. Calibrações NIRS TRÊS PROPRIEDADES QUÍMICAS DA MADEIRA DE *Eucalyptus urophylla*. **Cerne**, Lavras, v.16, Suplemento, p. 9-14, jul.2010.

ARRUDA, T. P. M. de. **Secagem da Madeira juvenil de *Tectona grandis* L.f.** 98 f. Tese (doutorado em Ciências Florestais – Departamento de Engenharia Florestal) Universidade Federal de Lavras, MG, p. 98, 2013.

ASTM E1316–99. American Society for Testing and Materials. **Standard terminology for nondestructive examinations.**

BALLARIN, A.W.; TARGA, L. A.; PALMA, L. H. A. Ensaios Não-Destrutivos de Vibração Transversal na Avaliação do Módulo de Elasticidade de Madeiras de Reflorestamento, In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8,2002, Uberlândia, **Anais**, Uberlândia, 2002.

BALABIN, R. M.; SAFIEVA, R. Z.; LOMAKINA, E. I. Comparison of linear and nonlinear calibration models based on near infrared (NIR) spectroscopy data for gasoline properties prediction, *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, v. 88, n. 2, p. 183-188, 2007.

BARROS, S. V. DOS S.; MUNIZ, G. I. B.; MATOS, J. L. M. de. Caracterização colorimétrica das madeiras de três espécies florestais da Amazônia, *CERNE*, v.20, n.3, Lavras, 2014.

BARREIROS, R. M. **Modificações na qualidade da madeira *Eucalyptus grandis* causadas pela fertilização com lodo de esgoto.** 2006. 112 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

BHAT, K. M.; PRIYA, P. B.; RUGMINI, P. Charaterisation of juvenile wood in teak. **Wood Science and Technology**, v.34, p. 517-532. 2001.

BHAT, K. M.; PRIYA, P. B. Influence of provenance variation on wood properties of teak from the Western Ghat region in India. **Iawa Journal**, v. 25, n.3, p. 273– 282, 2004.

BHAT, K. M.; THULASIDAS, P. K.; MARTA FLORENCE, E.J.; JAYARAMAN, K. Wood durability of home-garden teak against brown-rot and White-rot fungi, **Trees**, n.19, p, 654-660, 2005.

BEEBE, K.R.; KOWALSKI, B.R. Na Introduction to multivariate calibration and analysis. **Analitical Chemistry**, v. 59, n°17, p.1007-1017. 1987.

BELTRAME, R.; SOUZA, J. TELLES DE; MACHADO, W. G.; VIVIAN, M. A.; BULIGON, E. A.; PAULESKI, D.T; GATTO, D.A; HASELEIN, C.R. Propriedades físico-mecânicas da madeira de *Araucaria angustifolia* (Bertol) em três estratos fitossociológicos. *Ciência da Madeira*, Pelotas, v.01, n.02, p. 54-69, 2010.

BENJAMIN, C. A. **Estudo da estrutura anatômica e das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Corymbia (eucalyptus) citriodora* e *Eucalyptus grandis*.** 2006, 158f. Tese (Doutorado em Agronomia – Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas – Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Botucatu, 2006.

BENIN, C.C.; WATZLAWICK, L. F.; HILLING, E. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus benthamii* sob efeito do espaçamento de plantio. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.27, n.4, p. 1375-1384. 2017.

BLANCO FLÓREZ, J. **Caracterização tecnológica da madeira jovem de Teca (*Tectona grandis*)**. 2012, 85p. Dissertação (mestrado em Ciências Florestal, Departamento de Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, 2012.

BLANCO-FLÓREZ, J.; TRUGILHO, P. F.; TARCISIO-LIMA, J.; HEIN, P. R. G. Caracterización de la madeira joven de *Tectona grandis* L.f, plantadas em Brasil, **Madera y bosques**, v.20, n.1, p.11-20, 2014.

BRASIL. **Departamento Nacional da Produção Mineral**. Levantamento de recursos naturais. Folha SC. 21. Juruena; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso do potencial da terra. Rio de Janeiro: Gráfica Alvorada Ltda., 1980.

BODIG, J. The process of NDE research for wood and wood composites, The e-journal of Nondestructive Testing, v.6, n. 03, marc, 2001. www.ndt.net/index.html/ apresentado **no 12 th, International Symposium on Nondestructive Testing of Wood**, Sopron, 2001.

BONDUELLE, G. M.; IWAKIRI, S.; TRIANOSKI, R.; PRATA, J.G; ROCHA, V. Y. DA. Análise da Massa específica e da retratibilidade da madeira de *Tectona gradis* nos sentidos axial e radial do tronco, **Floresta**, Curitiba, PR, v.45, n.4, p.671-680, 2015.

BUCUR, V.; FEENEY, F. **Attenuation of Ultrasound in Solid Wood**. Ultrasonics, 30, 76-81. 1992.

BUCUR, V, **Acoustics of wood**, New York: CRC Press,1995, 284 p.

BUCUR, V. **Acoustics of wood**. 2.ed. New York: Springer-Verlag, 393p. 2006.

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

BURNS, D. A.; CIURCZAK, E. W. **Handbook of near-infrared analysis**. 3th ed. Boca Raton: CRC.p. 808, 2008.

CALDEIRA, S. F.; OLIVEIRA, D. L. C. Desbaste seletivo em povoamentos de *Tectona grandis* com diferentes idades, **Acta Amazônica**, v, 38, n, 2, p, 223–228, 2008.

CALDERON, C. M. A. **O segmento moveleiro na região do Alto Juruá-AC: perfil e uso de tecnologias alternativas para a caracterização das principais espécies madeireiras**. 147f. Tese (PPG em Ciências Florestais – Departamento de Engenharia Florestal), Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2012.

CALEGARI, L. **Uso da onda ultra-sônica como meio de controle do processo de secagem da madeira**, 92 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais- Departamento de Engenharia Florestal), Centro de Ciências Rurais – Universidade Federal de Santa Maria-UFSM, Santa Maria-RS, 2006.

CAMARGOS, J. A. A.; GONÇALEZ, J. C. A. colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira, **Brasil Florestal**, Brasília, n.71, 2001.

CAMPELLO JÚNIOR, J. H.; PRIANTE FILHO, N.; CASEIRO, F. T. Caracterização macroclimática de Cuiabá, In: ENCONTRO NACIONAL Londrina: UEL/NEMA, p. 542-552. 1991.

CANDIAN, M.; SALES, A. Aplicação das técnicas não destrutivas de ultra-som, vibração transversal e ondas de tensão para avaliação de madeira, **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v, 9, n, 4, p, 83-98, out./dez. 2009.

CARNEIRO, M, E, **Classificação de lâminas de madeira de *Pinus spp*, por espectroscopia óptica**. 2008, 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

CARREIRA, M. R.; SEGUNDINHO, P.G. DE A.; LAHR, F.A.R; DIAS, A.A; CALIL JÚNIOR, C. Bending stiffness evaluation of Teca and Guajará lumber through tests of transverse and longitudinal vibration. **Acta Scientiarum. Technology**. Maringá, v. 34, n. 1, p. 27-32, Jan.-Mar., 2012;

CARREIRA, M, R.; DIAS, A. A. Avaliação da rigidez à flexão de toras de madeira por meio de vibração transversal, **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v, 11, n, 53, p, 75-79 2009.

CASTRO, F.; RAIGOSA, J. CRECIMIENTO Y PROPIEDADES FISICO-MECANICAS DE LA MADERA DE TECA (*TECTONA GRANDIS*) DE 17 ANOS DE EDAD EN SAN JOAQUIN DE ABANGARES, COSTA RICA. **Agronomía Costarricense**, Universidad de Costa Rica San José, Costa Rica. v. 24. pp. 7-23. 2000.

CHAGAS, S.F.; EVANGELISTA, W. V.; SILVA, J. de C.; CARVALHO, A. M. M. L. Propriedades da madeira de Teca de diferentes idades e oriundas de desbaste, **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 5, n. 2, p. 138-150, 2014.

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.

CHRISTOFORO, A. L ; RIBEIRO FILHO, S. L. M.; PANZERA, T.; HALLAK; LAHR, F. A. R, Metodologia para o cálculo dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal em vigas de madeira de dimensões estruturais, **Ciência Rural**, Santa Maria, v,43, n,4, p,610-615, mar, 2013.

COPANT: COMISSÃO PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS, **Descrição macroscópica, microscópica e geral da madeira**, São Paulo, COPANT, v. 30, p,1-19, 1974.

COPANT: COMISSION PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS, **Maderas: selección y colección de muestras**, Caracas: COPANT, 1972a, (COPANT; 458).

COPANT: COMISSION PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS, **Maderas: acondicionamiento de las maderas destinadas a los ensayos físicos y mecánicos**, Caracas: COPANT, 1972b, (COPANT; 459).

COPANT: COMISSION PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS, **Maderas: método de determinación del peso específico aparente**, Caracas: COPANT, 1972c, (COPANT; 461).

COPANT: COMISSION PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS, **Maderas: método de determinación de la contracción**, Caracas: COPANT, 1972d, (COPANT; 462).

COPANT: COMISSION PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS, **Maderas: método de determinación de la flexión estática**, 555, Caracas: COPANT, 1973, (COPANT 30:1-006).

CORADIN, V. T. R.; BOLZON de MUNIZ, G. I. de, **Normas e procedimentos em estudos de anatomia da madeira: Angiospermae II-Gimnospermae**, Série Técnica 15, IBAMA, DIRPED, LPF, Brasília, 17pp, 1992.

CÓRDOBA, R.; SÁENZ, M. **Propiedades Físico Mecánicas de Teca de Costa Rica y Panamá**. (En línea). Disponível em: www.FundatecITCR.com. 2004. Acesso em junh. 2016.

CORRÊA QUEIROZ, F. L. **Qualidade da madeira de *Tectona grandis* L. f. de diferentes procedências para utilização na indústria de produtos florestais**. 171f. Tese (Doutorado – Doutorado em Ciências Florestais) — Universidade de Brasília, 2018.

COSTA, M. DE A.; COSTA, A, F, DA; PASTORE, T, C, M,; BRAGA, J, W, B; GONÇALEZ, J, C, **Caracterização Do Ataque De Fungos Apodrecedores De Madeiras Através Da Colorimetria E Da Espectroscopia De Infravermelho**, **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21 n.3, 2011.

CRESPO, R. G.; ROMERO, E. J; CUNUHAY, P. S; BLANCO, G. L.; FONSECA, C. S. **ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LA MADERA DE TECA (*Tectona grandis* L.F.) DE QUEVEDO Y BALZAR**. **Ciencia y Tecnología**, v.1, n.2, p- 55-63, 2008.

DAVIES, T.; FEARN, T. Back to Basics: **The Principles of Principal Component Analysis**. Spectroscopy Europe, 16, 20-23. 2004.

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

DERKYI, S. A. H.; BAILLERES, G.; CHAIX, M. F.; THEVENON, A. A. Oteng-Amoako; S. Adu-Bredu. Colour variation in teak (*Tectona grandis*) wood from plantations across the ecological zones of Ghana. **Ghana J. Forestry**, v. 25, p. 40-48. 2009.

DIAS, A. C. C. ; MARCHESAN, R.; ALEMEIRA, V. C.; MONTEIRO, T. C.; MORAES, C. B. Relação entre a densidade básica e as retrações em madeira de Teca, **Ciência da Madeira** (Braz., J. Wood Sci.), v. 9, n.1, p. 37-44, 2017.

DONG, X. H.; HAI, W. L. Comparative study on four different methods for measuring the dynamic modulus of elasticity of Acer mono wood, **Advanced Materials Research**, v,160-162, p,384-388, 2011.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. – Rio de Janeiro, EMBRAPA-SPI, 2006.

ERIKSON, R. G.; GORMAN, T. M.; GREEN, D. W.; GRAHAM, D. Mechanical grading of lumber sawn from small-diameter lodgepole pine, ponderosa pine, and grand fir trees from northern Idaho, **Forest Products Journal**, v,50, n,7-8, p,59-65, 2000.

ESTEBAN. L. G; CASAÚS. A.G.; ORAMAS. C.P.; PALACIOS. P.de P. LA MADERA E SU ANATOMÍA: anomalías y defectos. estructura microscópica de coníferas y frondosas. identificación de maderas. descripción de especies y pared celular. Fundación Conde del Valle de Salazar. 1º edição: 2003.

FENGEL. D.; WEGEMER. D. **Wood chemistry. ultrastructure. reaction**. Berlin: Walter de Gruyter. p.613. 1989.

FONSECA. W.G. **Manual de produtores de Teca en Costa Rica**. San José: Instituto Técnico de Costa Rica. 121 p. 2004.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Future of teak and the high-grade tropical hardwood sector: planted forests and trees working paper FP/44E. Rome. 2009a. Disponível em: <<http://www.fao.org>>. Acesso em: 15 nov. 2015.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Situación de los bosques en el mundo. Rome. 2009b. Disponível em: <http://www.fao.org>. Acesso em: 15 nov. 2015.

FUJIMOTO, T.; KURATA, Y.; MATSUMOTO, K.; TSUCHIKAWA, S. Feasibility of Near-Infrared Spectroscopy for On-Line Grading of Sawn Lumber. **Applied Spectroscopy**, v. 64, n.01. p.92-99. 2010.

GARCIA. R. A.; MARINONIO. G. B. Variação da Cor da Madeira de Teca em Função da Densidade e do Teor de Extrativos. **Floresta e Ambiente**. v.23 (1): p. 124-134. 2016.

GIERLINGER, N.; JACQUES, D.; GRABNER, M.; WIMMER, R.; SCHWANNINGER, M.; ROZENBERG, P. Colour of larch heartwood and relationships to extractives and brown-rot decay resistance. **Trees: Structure and Function**. v.18. n.1. p. 102-108. 2004.

GLASSER, W. G.; KELLEY, S.S. Light stability of polymers: lignin. In: MARK, H. F. (Ed.). Encyclopedia of polymer science and engineering. New York: J. Willey. 1987. V. 8. p. 795-852. 1987.

GOMES, F.P. **Curso de estatística experimental**. 14^a ed. Piracicaba, Degaspari. 2000. 477p.

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

GONÇALEZ, J. C.; JANIN, G.; SANTORO, A. C. S.; COSTA, A. F. da.; VALE, A. T.do. Colorimetria quantitativa: uma técnica objetiva de determinar a cor da madeira. **Brasil Florestal**. n. 72. p. 47-58. 2001.

GONÇALEZ, J. C.; VIEIRA, F.S.; CAMARGOS, J.A.A; ZERBINI, N.J. Influência do sítio nas propriedades da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Cerne**. v.15. n.2. p.251-255. 2009.

GONÇALEZ, J.C.; MARQUES, M.H.B.; KARAS, M.C.S.; JANIN, G. RIBEIRO, P.G. "Effect of drying process on marupá wood color". In: Maderas. **Ciencia y tecnologia**, v. 16, n.3, p. 337-342. 2014.

GONÇALVES, M. DA P.; COFFER, R.; CARVALHO, A. M. DE; GARCIA, R.A. Variação radial da densidade básica e comprimento das fibras da madeira de *Tectona grandis* L. **Floresta e Ambiente**. v. 14. n.1. p.70-75. 2007.

GOUVÊA, A. DE F. G.; TRUGILHO, P. F.; GOMIDE, J. L.; SILVA, J. R. M. DA; ANDRADE, C. R.; ALVES, I.C.N. Determinação Da Densidade Básica Da Madeiras De *Eucalyptus* por Diferentes Métodos Não Destrutivos. **Revista Árvore**. Viçosa-MG. v.35. n.2. p.349-358. 2011.

GOVAERE, G.; CARPIO, I.; CRUZ, L. **Descripción anatómica, durabilidad y propiedades físicas y mecánicas de *Tectona grandis***. San José: Universidad de Costa Rica. p.15, 2003.

GUIMARÃES, L.E.S; BUSSINGUE, A. P.; DEL MENEZZI, C. H.S.; M. L. SIQUEIRA; SOUZA, M.R. Efeito do carregamento cíclico sobre as propriedades de flexão e ultrassom em madeiras de quatro espécies florestais. **Scientia Forestalis**. Piracicaba. v. 40. n. 96. p. 473-481. dez. 2012.

HEIN, P.R.G. **Avaliação das propriedades da madeira de *Eucalyptus urophylla* por meio da espectroscopia no infravermelho próximo**. Dissertação de Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira. Universidade Federal de Lavras. 88p. 2008.

HEIN, P. R. G.; CAMPOS, A. C. M.; LIMA, J. T.; TRUGILHO, P. F.; CHAIX, G. Estimativa da resistência e da elasticidade à compressão paralela às fibras da madeira de *E. grandis* e *E. urophylla* usando a espectroscopia no infravermelho próximo. **Scientia Forestalis**. Piracicaba. v.37. n°82. p. 119-129. Jun. 2009.

HEIN, P.R.G.; LIMA, J.T. Relationships between microfibril angle, modulus of elasticity and compressive strength in Eucalyptus wood. **Maderas. Ciencia y tecnologia**. v. 14. n.3. p.267-274. 2012.

HOUNLONON, M. C.; KOUCHADE, C. A; KOUNOUHEWA, B. B. Propriétés Physiques Et Mécaniques Du Bois De Teck De Provenances Tanzanienne Et Locale Au Bénin. **Bois et Forétes Des Tropiques**. France. v.331. p. 45- 54. 2017.

HON, D.N.S.; MINEMURA, N. **Color and Discoloration**. In: HON. D.N.S.; SHIRAISHI. N. (eds.) Wood and Cellulosic Chemistry. 2nd. rev. and expanded. New York: Marcel Dekker Inc. 2001.

HUSEN. A.; PAL. M. Variation in shoot anatomy and rooting behaviour of stem cuttings in relation to age of donor plants in teak (*Tectona grandis* Linn. F.). **New Forests**. Dordrecht. v. 31. p. 57-73. Nov. 2004.

IAWA: INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMIST. Iawa list of microscopic features for hardwood identification. **IAWA Bulletin**. v.10, n. 3, 219-332. 1989.

IBÁ. Industria Brasileira de árvores. Relatório Ibá 2015. Disponível em:< <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/pdf/iba-2015.pdf>>. 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Base de dados das madeiras brasileiras. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/lpf/madeira/introducao.htm>. Acesso em: 24 jan. 2015.

ISEKOR, D. N; FUWAPE, J. P. Variations in mechanical properties among trees of the same and different age classes of teak (*Tectona grandis* L. F) wood. **Research Journal of Agriculture and Biological Sciences**, v.6, n.4 pp.562-567. 2010.

ITTO. Tropical Timber Market Report. Imagem da Flor de teca. Disponível em <http://www.tropicaltimber.info/pt-br/specie/teca-tectona-grandis/> . acesso em: Fev. 2019.

IWAKIRI. S.; MATOS. J.L.J. DE; TRIANOSKI. R.; PRATA. J.G.; ROCHA. V.Y.; IWAKIRI. V.T. Estimativa do módulo de elasticidade dinâmico nas diferentes posições do tronco das árvores de *Tectona grandis* utilizando método de ondas acústicas. **Scientia Forestalis**. Piracicaba. v. 41. n. 100. p. 523-532. dez. 2013.

JACONI, A. **O uso da espectroscopia no infravermelho próximo na quantificação de carbono em solos sob cultivo de cana-de-açúcar**. 2011. 52 f. Dissertação (Mestrado) Centro de Energia Nuclear na Agricultura. Universidade de São Paulo. Piracicaba. 2011.

JANG, S. S. Evaluation of lumber properties by applying stress waves to larch logs grown in Korea. **Forest Products Journal**. v.50. n.3. p.44-48. 2000.

JOHANSEN, D. A. **Plant microtechnique**. New York. Macgraw-Hill Book Company. 523p. 1940.

JOHANSSON, D. **Strenght and colour response of solid wood to heat treatment**. Luleå University of Technology. Department of Skellefteå Campus. Division of Wood Technology.p. 93. 2005.

KARLINASARI, L.; WABYUNA. M. E.; NUGROHO. N. Non-destructive ultrasonic testing method for determining bending strength properties of Gmelina wood (*Gmelina arborea*). **Journal of Tropical Forest Science**. Kepong. v. 20. n. 2. p. 99-104. 2008.

KLOCK, U; MUÑIZ. G. I. B. de; HERNANDEZ. J. A.; ANDRADE. A. S. de. Química da Madeira. 3ª edição revisada. 86 p. 2005. Disponível em : <<http://marioloureiro.net/ciencia/biomass/quimicadamadeira.pdf>>. Acesso em: set. 2016.

KOKUTSE. A. D.; ADJONOU. K.; KOKOU. K. Relationship between ecological indicators and teak wood characteristics in Tchorogo plantation (Togo). **International Journal of Biological and Chemical Sciences**. v.3. n.3. p. 483–491. 2009.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ JUNIOR, W. A. **Principles of wood science and technology**. 1968. Berlin: Springer. v. 2. 674 p.

LARSON, P. R. **The Vascular Cambium: Development and Structure**. Springer series in wood Science. Berlin Hendelberg. 1994.

LATORRACA, J. V. F.; ALBUQUERQUE, C. E. C. de. Efeito do rápido crescimento sobre as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**. Rio de Janeiro. v. 7. n. 1. p. 279-291. jan./dez. 2000.

LEONARDO, F. V. S.; ROCHA. H. F.; MENDOZA. Z. M. S. H. Compostos químicos em teca. **Pesquisa Florestal Brasileira**. Colombo. v. 35. n. 83. p. 315-322. jul./set. 2015.

LESTANDER, T.R.N. A.; LINDEBERG, J.; ERIKSSON, D.; BERGSTEN, U. Prediction of *Pinus sylvestris* clear-wood properties using NIR spectroscopy and biorthogonal partial least squares regression. **Canadian Journal Forest Research**. n. 38. p. 2052–2062 2008.

LIANG, S.; FU, F. Comparative study on three dynamic modulus of elasticity and static modulus of elasticity for Lodgepole pine lumber. **Journal of Forestry Research**. v.18. p.309-312. 2007.

LAINÉ, C. **STRUCTURES OF HEMICELLULOSES AND PECTINS IN WOOD AND PULP**. Dissertação para o grau de Doutor em Ciências da Tecnologia a ser apresentada. Universidade de Tecnologia de Helsinque (Espoo, Finlândia) no dia 10 de junho de 2005.

LIMA, I. L. DE; FLORSHEIM, S. M. B.; LONGUI, E.L. Influência do espaçamento em algumas propriedades físicas da madeira de *Tectona grandis* linn. **CERNE**. v.15. n.2. p.244-250. 2009.

LIMA, I. L. de; GARCIA, R.; LONGUI, E. L.; FORSHEIM, S. M. B. Dimensões anatômicas da madeira de *Tectona grandis* Linn. em função do espaçamento e da posição radial do tronco. **Scientia Forestalis**. Piracicaba. v. 39. n. 89. p. 061-068. mar. 2011.

LOPES, J. DE O.; GARCIA, R. A.; LATORRACA, J. V. DE F.; NASCIMENTO, A.M.DO. Alteração da cor da madeira de Teca por tratamento térmico. *Floresta e Ambiente*. **Floram**. 2014.

MAGALHÃES, D. F. **Aplicações da Espectroscopia de Infravermelho Próximo na Monitorização de Processos Farmacêuticos**. 106 f. Dissertação (Mestrado em Farmácia- Departamento de Química e Bioquímica). Universidade de Lisboa. 2014.

MAPPUJI, A. **Desing and implementation of nondestructive elavualtion instrument for acoustic-based prediction of wood modulus od elasticithy and method to assess the recorded longitudinal stress wave**. 139 p. Undergraduate thesis. Department of nuclear engineering and engineering physics faculty of engineerin. Universitas Gadjah Mada. 2017.

MEDEIRO NETO, P. N; PAES, J. B.; SEGUNDINHO, P.G.de A. Determinações dos módulos de elasticidade e ruptura de madeiras por técnicas não destrutiva e destrutivas. **Scientia Florestalis**. Piracicaba. v. 44. n.111. p.683-690. 2016.

MELO, R.R DE; DEL MENEZZI, C.L.S; SOUZA, M.R. DE; STARGENLIN, D.M. Avaliação das propriedades físicas. químicas. mecânicas e de superfície de lâminas de Paricá. (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke). **Floresta e Ambiente**. v.20. n.2. p. 238-249. 2013.

MELO, R. R de; DEL MENEZZI, C. H. S. ESTIMATIVAS DAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE COMPOSTOS LVL CONFECCIONADOS COM PARICÁ POR MEIO DE ULTRASSOM. V. 26. n.1. p.263-272. 2016.

MEENA, R. K.; NIMKAR, A. U. Variation in soluble extractives, lignin and holocellulose content of wood of different provenances of *Tectona grandis* L. **Journal of Applied and Natural Science**. v. 8. n.1. p. 80 – 83. 2016.

MENESES, V. A.; TRUGILHO, P. F.; CELAGRIO, N.; LEITE, H. G. Efeito da idade e do sítio na densidade básica e produção de massa seca de madeira em um clone do *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**. Piracicaba. v. 43. n.10. p.101-116. 2015.

MICKO, M. M; YANCHUK, A. D.; WANG, E.I.C; TAYLOR, F. W.; COMPUTERISED MEASUREMENT OF FIBRE LENGHT. IAWA BULLETIN N.S. v.2. n.02. 1982.

MILAGRES, F. R. Avaliação da madeira de híbridos de *Eucalyptus globulus* com *E. grandis* e *E. urophylla*. para produção de celulose. utilizando espectroscopia NIR. **Dissertação** (PPG em Ciência Florestal). 142 pag. Universidade Federal de Viçosa – UFV. Viçosa-MG. 2009.

MINÁ, A. J. S.; OLIVEIRA, F. G. R.; CALIL JÚNIOR, C.; DIAS, A. A.; SALES, A. Avaliação não destrutiva de postes de madeira por meio de ultrassom. **Scientia Forestalis**. n.65. p.188-196. 2004.

MINOLTA. **Precise Color Communication**. Color control From perception to instrumentation. Japão: Minolta Co. Ltd. 1998.

MONTERO, R. S.; MOYA, R.; BERROCAL, A.; TREJOS, G. G.; FOGLIA, R. C. General, physical and mechanical properties, térmites resistance and drying defects of lumber of *Tectona grandis* from plantations of different climatic and sites fertility condition. **Indian Academy of Wood Science** (Springer), v. 12, n. 1, p. 63-73. 2015.

MORALES, E. A. M. **Técnicas de propagação de ondas na estimativa de propriedades mecânicas de painéis OSB**. Tese (Doutorado). Interunidades Ciência e Engenharia de Materiais. da Universidade de São Paulo. São Paulo. Brasil. 2006.

MOREIRA, R. Y.O; ARRUDA, M. S. P.; SANTOS, L. S.; MULLER, A.H; GUILNON, G.M.S.P.; SANTOS, A. S.; TEREZO, E. Antraquinonas e naftoquinonas do caule de um espécime de reflorestamento de *Tectona grandis* (Verbenaceae). **Brazilian Journal of Pharmacognosy**. Curitiba. v. 16. n. 3. p. 392-396. July/Sept. 2006.

MORI, C. L. S. DE O.; LIMA, J. T.; TRUGILHO, J. F. OLIVEIRA, A. C. INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS NA COR DA MADEIRA DE EUCALIPTOS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 14, n. 2, p. 123-132. 2004.

MOTTA, J. P.; OLIVEIRA, J. T. DA S.; PAES, J B.; ALVES, R. C.; DAMBROZ, G. B. V. Resistência natural da madeira de *Tectona grandis* em ensaio de laboratório. **Ciência Rural**. Santa Maria. RS. v.43. n.8. p.1393- 1398. 2013.

MOULIN, J. C.; ARANTES, M. D. C.; VIDAURRE, G. B.; PAES, J. B.; CARNEIRO, A. DE C.O. Efeito do espaçamento, da idade e da irrigação nos componentes químicos da madeira de Eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 39, n.1, p. 199-208. 2015.

MOYA, R.; ARCE, V. Estudio experimental del efecto del espaciamento sobre las propiedades físicas de peso específico básico y contracciones en plantaciones de Teca (*Tectona grandis*) de 10 años. **Revista Forestal Venezolana**. Caracas. v. 47. n. 1. p. 1-24. 2003.

- MOYA, R.; BERROCAL, A.; SERRANO, J.R; TOMAZELLO, M. F. Variación radial de la anatomía, densidade y durabilidad de la madera de Teca (*Tectona grandis*) procedente de dos calidades de sítios y regiones climáticas de Costa Rica. **Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales**. v.18. n.2. p.119-131. 2009.
- MOYA, R.; BERROCAL, A. Wood colour variation in sapwood and hartwood of Young trees of *Tectona grandis* and its relationship with plantataion characteristics. site. and decay resistance. **Ann. For. Sci.** N.67. p.109. 2010.
- MOYA, R.; CALVO-ALVARADO, J. C. Variation of wood color parameters of *Tectona grandis* and its relationship with physical environmental factors. **Ann For Sci**, n. 69, p. 947–959. 2012.
- MORENO, J. R.; ROQUE, R. M. Propiedades físico mecánicas de la madera de *Tectona grandis* Linn. F. (teca). proveniente de una plantación de ocho años de edad en Cochabamba. Bolivia. Kuru: Revista Forestal. Costa Rica. v. 3. n. 9. 2006.
- MORESCHI, J. C. **Propriedades tecnológicas da madeira**. Curitiba: Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. Setor de Ciências Agrárias/UFPR. p.176. 2010.
- MUNSELL. COLOR. **Soil color charts**. Baltimore: Koelmorgen. 1975.
- MUÑIZ, G. I. B. DE; MAGALHÃES, W. L. E; CARNEIRO, M. E.; VIANA, L. C. Fundamentos E Estudo Da Arte Da Espectroscopia No Infravermelho Próximo No Setor De Base Florestal. **Ciência Florestal**. Santa Maria. v.22. n.4. p.865-875. 2012.
- NABIVI, M.; DAHLEN, J.; SCHIMLECK, L.; EBERHARDT, T. L.; MONTES, C. Regionaal Calibration models for predicting lobolly pine tracheid properties using near-infrared spectroscopy. **Wood Science and Tecnolog**. v. 52. n. 2. p.445-463. 2018.
- NISGOSKI, S. Espectroscopia no infravermelho próximo no estudo de características da madeira e papel de *Pinus taeda* L. **Tese** (Doutorado em Engenharia Florestal) 173p. Universidade Federal do Paraná-UFPR. Curitiba. PR. 2005.
- NOCK, P. H.; RICHTER, H. G.; BURGER, L. M. *Tecnologia da madeira*. Curitiba: UFPR. p. 216. 1975.
- OLIVEIRA, F. G. R.; CAMPOS, J. A. O.; SALES. A. Ultrasonic measurements in Brazilian hardwood. **Materials Research**. v.5. n.1. p.51-55. 2002.
- OLIVEIRA, J. T. S. (1998). **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. 429p. 1998.
- ORELLANA, J.B.P. **Valorização tecnológica da madeira de *Tachigali vulgaris* provenientes plantios de dois sítios distintos localizados no estado do Amapá.**

Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, 74p. 2015.
Pere

PAN, S.; KUDO, M. Recognition of wood porosity based on direction insensitive feature sets. v. 5. n. 1. p. 45-62. Transactions on Machine Learning. Ibai Publishing. 2012. Disponível em http://ibaipublishing.org/journal/issue_mldm/2012_july/mldm_5_1_45-62.pdf>. Acesso em: mar. 2016.

PANDEY, D.; BROWN, C. La teak: una visión global. **Revista Internacional de Silvicultura e Industrias Forestales**. Rome. v. 51. n. 2. p. 3-13. 2000.

PANSHIN, A. J.; De ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 3.ed. New York: McGraw Hill. p. 722. 1980.

PASSOS, C. A. M.; BUFULIN, L. J.; GONÇALVES, M. R. Avaliação silvicultural de *Tectona grandis* L.f. em Cáceres – MT. Brasil: resultados preliminares. **Ciência Florestal**. Santa Maria. v. 16. n. 2. p. 225-232. 2006.

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.

PASQUINI, C. Near infrared spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications. **Journal of the Brazilian Chemical Society**. v. 14. n. 2. p. 198-219. 2003.

PAULA, M.H; MESQUITA, R.R.S.DE; GONÇALEZ, J.C; RIBEIRO, E.S.; SOUZA, R.S. Utilização de métodos não destrutivo para caracterização simplificada da madeira de cumaru (*Dipteryx odorata* willd.). **Biodiversidade**. v. 15. n.2.p136-149. 2016.

PELLISSARI, A. L. **SILVICULTURA DE PRECISÃO APLICADA AO DESENVOLVIMENTO DE *Tectona grandis* L.f. NA REGIÃO SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO**. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais- Departamento de Engenharia Florestal). Universidade Federal de Mato Grosso. 2012.

PITER, J. C.; ZERBINO, R. L.; BLAB, H. J. Effectiveness of fundamental resonant frequency for determining the elastic properties of Argentinean *Eucalyptus grandis* in structural sizes. **Holz Roh Werkst**. v.62. n.2. p.88-92. 2004.

PINTO, M. de L. **Propriedades e Características da Madeira de Teca (*Tectona grandis*) em função da idade**. Tese (Doutorado) – Programa de pós-graduação em engenharia civil. Universidade Federal de Santa Catarina. SC. 124. 2007.

PHILIPP, P.; D'ALMEIDA, M. L. O. **Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. 2. ed. São Paulo: IPT. 1988. 964 p.

QUEIROZ, F. L. C.; GONÇALEZ, J. C.; DEL MENEZZI, C. H.; RIBEIRO, E. S.; LIMA, C. M. Intemperismo artificial em lâminas de *Tectona grandis* tratadas com produtos de acabamento. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 23 n. 4, p. 573-581. 2016.

RAVENSHORST, G. J. P.; VAN DE KUILEN, J. W. G; BRUNETTI, M.; CRIVELLARO, A. Species independent machine stress grading of hardwoods. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING. 10.. Miyazaki. **Proceedings...** Miyazaki: Curran Associates. 2008.

RIBEIRO, E. S. **Propriedades tecnológicas de vinte espécies de madeiras tropicais comercializadas pelo estado de Mato Grosso**. 183f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais – Departamento de Engenharia Florestal). Universidade de Brasília. Brasília. 2017.

RIBEIRO, E. S.; GONÇALEZ, J. C.; SOUZA, R. S.; PAULA, M. H. Avaliação de propriedades por meio de métodos destrutivos e não destrutivos. **Nativa**. Sinop. v. 4. n. 2. p.103-106. 2016.

RIBEIRO, P. G. **Utilização de técnicas não destrutivas para a caracterização de madeira de *Pinus caribea* var. *hondurensis* e de *Eucalyptus grandis***. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília. 114p. Brasília-DF. 2009.

RIGATTO, P. A; DEDECEK, R. A.; MATOS, J. L. M DE. Influência dos atributos do solo sobre a qualidade da madeira de *Pinus taeda* para a produção de celulose Kraft. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n.2 p. 267-273, 2004.

RODRÍGUEZ-ANDA, R.; FUENTES-TALAVERA, F. J.; SILVA-GUZMÁN, J. A.; PALACIOS-JUÁREZ, H.; TURRADO-SAUCEDO, J. Relationship of the cellular structure of teak wood (*Tectona grandis* L. f.) with different ages and growth sites. **Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente**. v. 24. n. 1. jan.-abr. 2017.

ROGGO, Y.; CHALUS, P; MAURER, L.; LEMA-MARTINEZ, C.; EDMOND, A. ; JENT, N. A review of near infrared spectroscopy and chemometrics in pharmaceutical Technologies. **J Pharm Biomed Anal**. v.44, n.3, p. 683-700. 2007

ROSA, R. A.; FRANÇA, L. C. A.; SEGUNDINHO, P. G. de A.; LUBE, V. M.; PAES, J. B. Caracterização da Madeira de Maçaranduba (*Manikara* sp.) por Métodos Destrutivos e Não Destrutivos. **Ciência da Madeira** (Braz. J. Wood Sci.). Pelotas. v.05. n.01. p. 68-78. 2014.

ROSA, T. DE F.DE D.; SCARAMUZZA, W. L. M.P; SILVA, R. G. DA. Concentração de acúmulo de nutrientes em povoamentos de Teca no estado de Mato Grosso, Brasil. **Cerne**, Lavras, v. 21, n.1, p 51-57. 2015.

ROSS, R. J.; BRASHAW. B. K.; PELLERIN. R. F. Nondestructive evaluation of wood. **Forest Products Journal**. v.48. n.1. p.14-19. 1998.

ROSS, R. J. **Nondestructive Evaluation of Wood**. 2nd Ed. Forest Product Laboratory U.S. Department of Agriculture. 2015.

ROSSI, R. G. **Ánalyse de components principais**. 81f. Dissertação (Mestrado em Ciência da computação- Departamento de Matemática e Estatística). Universidade de São Paulo. 2017.

ROSSO, S. **Predição das Propriedades de *Eucalyptus grandis* Maiden por espectroscopia no infravermelho próximo**. 126 f. Tese (doutorado) – Faculdade de Engenharia Florestal. Universidade Federal do Paraná. Curitiba-PR. 126p. 2010.

ROQUE, R. M.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da estrutura anatômica do lenho de árvores de *Gmelina arborea* em diferentes condições de clima e de manejo na Costa Rica. **Scientia Forestalis**. Piracicaba. v. 37. n. 83. p. 273-285. set. 2009.

ROWELL, R. M.; PETTERSEN, R; HAN, J. S.; ROWELL, J. S.; TSHABALALA, M.A. **Cell Wall Chemistry**. USDA. Forest Service. Forest Products Laboratory. Madison.WI. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/230771042>. Acesso em: Julhh.2017.

SALES, A.; CANDIAN, M.; CARDIN, V. S. Evaluation of the mechanical properties of Brazilian lumber (*Goupia glabra*) by nondestructive techniques. **Construction and Building Materials**. v.25. n.3. p.1450-1454. 2011.

SAMISTRARO, G.; MUNIZ, G. I. B. DE; PERALTA-ZAMORA, P.; CORDEIRO, G.A. previsão das propriedades físicas do papel kraft por espectroscopia no infravermelho próximo (nir) e regressão por mínimos quadrados parciais (PLS). **Quim. Nova**. v. 32. n.6. p.1422-1425. 2009.

SANDAK, J.; SANDAKA, A; MEDER, C. R. Tutorial Assessing trees. wood and derived products with near infrared spectroscopy: hints and tips. **J. Near Infrared Spectrosc**. n. 24. p. 485–505. 2016.

SANSÍGOLO, C. A. Deslignificação em metanol-água de *Eucalyptus globulus*. Labill: Características da lingina e da polpa. 1994. 163 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Física e Química de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos. 1994.

SANTOS, M. de F. da P. **Desenvolvimento e Validação de Métodos de Esprestroscopia no Inframavelho Próximo e Médio para Caracterização de Lamas de Etar para Uso Agrícola**. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. Dissertação (Engenharia Biológica).89p. 2007.

SANTOS, P. V. dos; SILVA, M. A. da; DIAS JÚNIOR, A. F.; CARVALHHO, A. M. de; Nascimento, A. M. do. Qualidade tecnológicas da madeira de *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S Johnon submetida ao processo de termorreificação. **Scientia Florestalis**. Piracicaba. v. 44. n.110. p.343-350. 2016.

SCAFFI, S.H. F. **Sistema de Monitoramento em Tempo Real de Destilações de Petróleo e Derivados Empregando a Espectroscopia no Infravermelho Próximo**. TESE (Doutorado)- universidade estadual de campinas. Instituto de química. 214p. 2005.

SCANAVACA, L.; GARCIA, J. N. Determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis** n.65. p. 10-129. jun. 2004.

SCAPARO, B. T. **Avaliação das propriedades da madeira de Teca (*Tectona grandis* L.f) no Estado de Goiás- Brasil**. 2015. 189f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade de Trás-Os-Montes e Alto Douro. Vila Real-Portugal. 2015.

SCHIMLECK, L. R.; MATOS, J. L. M.; TRIANOSKI, R.; PRATA, J. G. Comparison of Methods for Estimating Mechanical Properties of Wood by NIR Spectroscopy. **Hindawi Journal of Spectroscopy** v. 2018.

SAVITZKY, A.; GOLAY, M.J.E. Smoothing and differentiation of data by simplified least-squares procedures. **Analytical Chemistry, Washington**, n.36, p.1627-1639, 1964.

SEGUNDINHO, P. G. A.; COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A.; CALIL JÚNIOR, C. Aplicação do método de ensaio das frequências naturais de vibração para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira. **Revista Árvore**. Viçosa-MG. v.36. n.6. p.1155-1161. 2012.

SENAI/SP. SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL (SÃO PAULO). CELULOSE/SENAI/SP. SÃO PAULO: SENAI-SP. EDITORA. 2013.

SHIMOYAMA. V.R.S. **Estimativas de propriedades da madeira de *Pinus taeda* através do método não destrutivo de emissão de ondas de tensão. visando a geração de produtos de alto valor agregado**. 151 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2005.

SILVA, E.S.; STANGERLIN, D. M.; GATTO. D. A.; CALEGARI, L.; PARIZ, E. "Colorimetria da madeira de oito espécies nativas do estado do Rio Grande do Sul. Brasil". **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**. v. 6. nº1. p. 31-37. 2015.

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. TCC- Engenharia Florestal, Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 2010.

SILVA, G. J. A.; FUENTES, T. F. J. RODRÍGUEZ, A. R.; TORRES, A. P.; LOMELÍ, R. M. G.; RAMOS. Q. J.; RICHTER, H. G. **Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas**. Guadalajara. Jalisco. México: Amaya Ediciones. 2010.

SILVA, J. DE C.; TOMAZELLO FILHO. M.; J. T. DA S. OLIVEIRA; CASTRO. V. R. DE. Influência de idade e da posição radial nas dimensões das fibras e dos vasos da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**. Viçosa. v. 31. n.6. 2007.

SILVA, R. A. F da; SETTER, C.; MAZETTE, S. S; MELO, R. R.de; STANGERLIN. D.M. Colorimetria da madeira de trinta espécies tropicais. **Ciência da Madeira** (Braz. J. Wood Sci). v. 08. n. 1. p. 36-41. 2017.

SINKOVIC, T.; GOVORCIN, S.; RAJKOVIC, V.J.; SEDLAR, T.; MIKLECIC, J. MAROSAN. M. Defining of Wood Colour. **Proceedings of the 57th International Convention of Society of Wood Science and Technology** - Zvolen. SLOVAKIA. June 23-27. 2014.

SOUZA, A. M. D.; BREITKREITZ, M. C.; FILGUEIRAS, P. R.; ROHWEDDER, J. J. R.; POPPI, R. J. Experimento didático de quimiometria para calibração multivariada na determinação de paracetamol em comprimidos comerciais utilizando espectroscopia no infravermelho próximo: um tutorial. parte II. **Química Nova**. v. 36. n. 7. p. 1057-1065. 2013.

SOUZA, A. M.; POPPI, R. J. Experimento didático de quimiometria para análise exploratória de óleos vegetais comestíveis por espectroscopia no infravermelho médio e análise de componentes principais: um tutorial. parte 1. **Química Nova**. 2012.

SOUZA, R. F.; GUILHON, G.M.S.P; AGUIAR, O.J.R.; SANTOS, A.S. Concentrados de metabólitos obtidos das folhas da teca (*Tectona grandis* (L.f)) para uso como corante. In: ENCONTRO DE PROFISSIONAIS DA QUÍMICA DA AMAZÔNIA, 10., 2007, Belém. **Anais...** Belém, UFPA, p. 1-5. 2007.

SYKES, R.; LI, B.; HODGE, G.; GOLDFARB, B.; KADLA, J.; CHANG, H. Prediction of loblolly pine wood properties using transmittance near-infrared spectroscopy. **Canadian Journal of Forest Reserch**. v.35. n. 10. p. 2423-2431. 2005.

STARGENLIN, D.M; CALEGARI, L.; SANTINI, E. J.; DOMINGUES, J. M.X.; GATTO, D.; MELO, R.R. Determinação do módulo de elasticidade em madeiras por meio de métodos destrutivos e não destrutivos. *Revista brasileira de ciências agrárias*. v. 3. n.2. p.145-150. 2008.

STARGENLIN, D. M; MELO, R.R.; GATTO, D.A.; CADEMARTON, P.H.G. de. Propriedades de flexão estática da madeira de *Carya illinoensis* em duas condições de umidade. *Ciência da Madeira*. Pelotas. v.1. n.02. p. 70-90. 2013.

STANGERLIN, D. M; CALVACANTE, C.F.P; COSTA, C.A. da; PARIZ, E.; MELO, R. R. de. Mechanical properties of Amazonian woods estimated by ultrasound waves propagation methods. **Nativa: Pesquisas Agrárias e Ambientais**. v.5. n. especial. p. 628-633. 2017.

TAKIZAWA, F. Produção de teca em Mato Grosso será destaque no 4º Encontro Brasileiro de Silvicultura - EXPOFOREST 2018. Disponível em: <http://www.arefloresta.org.br/noticia/299/producao-de-teca-em-mato-grosso-sera-destaque-no-4-encontro-brasileiro-de-silvicultura-expoforest-2018>>. Acesso em: fev. 2019.

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.

TARGA, L. A.; BALLARIN, A. W.; BIAGGIONI, M. A. M. Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não-destrutivo de vibração transversal. **Engenharia Agrícola**. v.25. n.2. p. 291-299. 2005.

TELES, R. F.; DEL MENEZZI, C.H.S.; SOUZA, F. de; SOUZA, M. R. de; Nondestructive evaluation of a tropical hardwood: interrelationship between methods and physical-acoustic variable. **Ciência da Madeira**. Pelotas. v. 02. n. 01. p.01-14. 2011.

TELES, R. F. **Ensaaios não destrutivos para avaliar o desempenho de madeiras amazônicas tratadas quimicamente**. 195f. Tese de Doutorado em Ciências Florestais. Publicação PPGEFL.TD-040/2014. Departamento de Engenharia Florestal. Universidade de Brasília. Brasília. DF. 195p. 2014.

THULASIDAS, P. K.; BHAT, K. M.; OKUYAMA, T. Heartwood colour variation in home garden teak (*Tectona grandis*) from wet and dry localities of kerala. India. **Journal of Tropical Forest Science**. v. 18. n.1. p. 51-54. 2006.

THULASIDAS, P. K.; BHAT, K. M. Mechanical properties and wood structure characteristics of 35-year old home-garden teak from wet and dry localities of Kerala. India in comparison with plantation teak. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**. v.9. n.1. p. 23–32. 2012.

TIENNE, D. L.C.; OLIVEIRA, J. N.; PALERMO, G. P. M.; SOUZA, M. J. S.; LATORRACA, J. V. F. Influência do espaçamento no ângulo das microfibrilas e comprimento de fibras de clone de eucalipto. **Revista Florestal Latino Americana**. v. 24. n.1. p. 67-83. 2009.

TOMAZELLO FILHO, M. Formação e anatomia da madeira. Piracicaba: ESALQ/USP. 2002. 76p.

TRIANOSKI, R.; MATOS, J. L. M. DE; IWAKIRI, S.; PRATA, J. G. Avaliação da Estabilidade Dimensional de Espécies de Pinus Tropicais. **FLORAM**. v. 20. n. 3. p.398-406. 2013.

TSUCHIKAWA, S; KOBORI, H. A Review of Recent Application of Near Infrared Spectroscopy To Wood Science And Technology. **Journal Wood Science**. v. 61. p. 213-220. 2015.

VARELA, J. J. **Caracterização de polpas de minerais de indústrias através do equipamento Colorcell visando o controle da qualidade do produto**. Dissertação (PPG em Engenharia de Minas. Metalúrgica e de Materiais) 160pag. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS. 2002.

VALERO, S.; REYES, E.; GARAY, D. Estudio de las propiedades físico-mecánicas de la especie *Tectona grandis*. de 20 años de edad. proveniente de las plantaciones de la unidad experimental de la reserva forestal Ticoporo. estado barinas. **Revista Forestal Venezolana**. Caracas. v. 49. n. 1. p. 61-73. 2005.

VALDERRAMA, P. **Avaliação de figuras de mérito em calibração multivariada na determinação de parâmetros de controle de qualidade em indústria alcooleira por espectroscopia no infravermelho próximo**. 135 f. Dissertação (mestrado)-Universidade estadual de Campinas. Instituto de química. 2005.

VIANA, L. C. **Uso da espectroscopia no infravermelho próximo para predição de propriedades tecnológicas da madeira de *Eucalyptus***. 111f. **Dissertação** (Mestrado em Ciências Florestais – Departamento de Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras. 2008.

VIVIAN, M. A.; SANTINI, E. J.; MODES, K. S.; CARVALHO, D. E.; MORAES, W. W. C.; SOUZA, J.T.; SUSIN, F. Estimativa da resistência e rigidez da madeira de *Eucalyptus grandis* por meio de onda ultrassonora. **PFB Pesquisa Florestal Brasileira**. Colombo-PR. v. 32. n 69. p. 109-113. jan./mar. 2012 a.

VIVIAN, M.A.; MODES, K. S.; SANTINI, E.J.; CARVALHO, D.E.; MORAIS, W. W. C.; SOUZA, J.T. GATTO, D.A. Estimativa dos módulos de elasticidade e ruptura da madeira de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell por meio de método não destrutivo. *Ciência da Madeira (Braz. J. Wood Sci)*. Pelotas. v. 03. n.02. p.91-101. 2012. b.

WANG, S.Y.; CHEN, J. H.; TSAI, M. J.; LIN, C. J.; YANG, T. H. Grading of softwood lumber using non-destructive techniques. **Journal of Materials Processing Technology**. v.208. p.149-158. 2008.

WEAVER, L. *Tectona grandis* L. f. Teak: SOITF-SM-64. New Orleans: USDA. 18 p. 1993.

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

WINDEISEN, E.; KLASSEN, A.; WEGENER, G. On the chemical characterisation of plantation teakwood from Panama. **Holz Roh Werkst.** n. 61. p. 416. 2003.

ZAHABU, E. K.; TUMAINI, R.; CHAMSHAMA, S. A. O; IDDI, S.; MALIMBWI, R. E. - Effect of Spacing Regimes on Growth, Yield, and Wood Properties of *Tectona grandis* at Longuza Forest Plantation, Tanzania. International Journal of Forestry Research, p.6, 2015.

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