



**QUALIDADE DA MADEIRA DE *Tectona grandis* L. f. DE DIFERENTES
PROCEDÊNCIAS PARA UTILIZAÇÃO NA INDÚSTRIA DE PRODUTOS
FLORESTAIS**

FRANCIS LÍVIO CORRÊA QUEIROZ

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

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**QUALIDADE DA MADEIRA DE *Tectona grandis* L. f. DE
DIFERENTES PROCEDÊNCIAS PARA UTILIZAÇÃO NA
INDÚSTRIA DE PRODUTOS FLORESTAIS**

FRANCIS LÍVIO CORRÊA QUEIROZ

ORIENTADOR: CLÁUDIO HENRIQUE SOARES DEL MENEZZI

TESE DE DOUTORADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

PUBLICAÇÃO: PPGEFL.TD-087/2018

BRASÍLIA/DF: MARÇO – 2018

FOLHA DE APROVAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

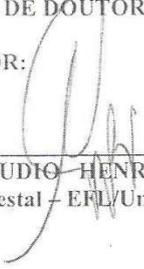
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

“QUALIDADE DA MADEIRA DE *Tectona grandis* L.f. DE DIFERENTES
PROCEDÊNCIAS PARA UTILIZAÇÃO NA INDÚSTRIA DE PRODUTOS
FLORESTAIS”

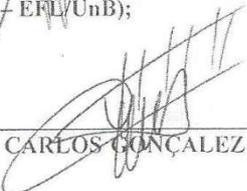
FRANCIS LÍVIO CORRÊA QUEIROZ

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.

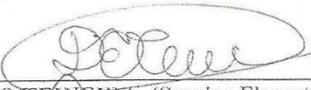
APROVADA POR:



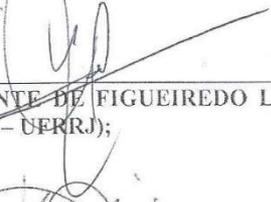
Prof. Dr. CLÁUDIO HENRIQUE SOARES DEL MENEZZI (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB);
(Orientador)



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



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



Prof. Dr. JOÃO VICENTE DE FIGUEIREDO LATORRACA (Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ);
(Examinador Externo)



Prof. Dr. AILTON TEIXEIRA DO VALE (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB).
(Examinador Suplente)

Brasília-DF, 05 de março de 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

CTD
087/2018q

CORRÊA QUEIROZ, FRANCIS LÍVIO

Qualidade da madeira de *Tectona grandis* L. f. de diferentes procedências para utilização na indústria de produtos florestais / FRANCIS LÍVIO CORRÊA QUEIROZ; orientador CLÁUDIO HENRIQUE SOARES DEL MENEZZI — Brasília, 2018.

171 p.

Tese (Doutorado – Doutorado em Ciências Florestais) — Universidade de Brasília, 2018.

1. TECA. 2. DENDROMETRIA. 3. QUALIDADE DA MADEIRA. 4. DIFRAÇÃO. 5. ESPECTROSCOPIA. I. SOARES DEL MENEZZI, CLAUDIO HENRIQUE, oriente. II, Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

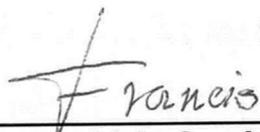
QUEIROZ, F.L.C. (2018). Qualidade da madeira de *Tectona grandis* L. f. de diferentes procedências para utilização na indústria de produtos florestais. Tese de Doutorado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.TD-087/2018, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 171p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Francis Lívio Corrêa Queiroz. **TÍTULO:** Qualidade da madeira de *Tectona grandis* L. f. de diferentes procedências para utilização na indústria de produtos florestais.

GRAU: Doutor **ANO:** 2018

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



Francis Lívio Corrêa Queiroz
Rua 01 Casa 07 – Setor Norte, Morada do Ouro.
78.053-478 – CUIABÁ – MT – Brasil.

DEDICATÓRIA

Dedico este estudo a Deus! Pela vida quase sempre tranquila que tenho.

Dedico ao meu avô Levi Queiroz e a minha avozinha Bertholina Nunes Queiroz, pela vida do meu pai Francisco Nunes de Queiroz, ao meu avô Pedro Corrêa e a minha avozinha Maria Corrêa pela vida da minha mãezinha, Dona Regina da Silva Corrêa Queiroz, que é a luz e guia da minha vida, pelas oportunidades e pelas orientações, para uma vida de confiança e conhecimentos. Aos meus irmãos Alcy Ricardo Corrêa Queiroz, esposo de Sirley Lange e Altamir Rogério Corrêa Queiroz, esposo de Cliscia Mendes Leão Queiroz, papai de Felipe Mendes Leão Queiroz e Lavínia Mendes Leão Queiroz, meus sempre amigos e eterna chama de desafios.

Dedico a minha esposa, Marinete Oliveira Queiroz, pelo seu amor e compreensão, nos muitos dias em que eu dediquei toda a minha atenção aos estudos.

E finalmente dedico aos meus filhos Pedro Henrique Magalhães Queiroz, Guilherme Levi Magalhães Queiroz, Bruno Francisco Magalhães Queiroz, Alessandro José Magalhães Queiroz, Amarah Rodrigues Montagner Queiroz e Antonius Rodrigues Montagner Queiroz, que são o meu futuro e eterna fonte de inspirações.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Cláudio Henrique Soares Del Menezzi, pela confiança e pela oportunidade, por me receber como seu orientado e por compartilhar comigo seus conhecimentos.

Aos Professores Joaquim Carlos Gonzalez, Ailton Teixeira do Vale e Alexandre Florian da Costa, pelos preciosos auxílios na elaboração e execução do meu projeto de tese.

Aos secretários e secretárias da Secretaria do Departamento de Engenharia Florestal e da Secretaria de Pós-Graduação, Francisco, Yuri, Patrícia e Flávia, pelo sempre eficiente atendimento em meus pleitos administrativos.

Ao meu colega de profissão, amigo de teréré, e agrícolino Professor José Roberto Rodrigues Pinto e a sua esposa Monaliza pela confiança e amizade! Só por vocês consegui me instalar em Brasília com tranquilidade e segurança.

A Alan, Ruy, Samanta, Samy Lopes, Jolie Pavan, Caio Souza e Heitor Mattos pela confiança, convivência, paciência. Obrigado!

Aos meus amigos, Rubens Marques Rondon Neto, Benedito Lucas de Miranda, Antonio de Arruda Tsukamoto, Ronaldo Drescher e Cerilo Ramos (*In memoriam*), pela amizade e incentivo, para que eu sempre persistisse na excelência, em tudo que me proponho a fazer.

Para a execução deste projeto de pesquisa contei com a ajuda do Senhor João e de sua equipe na marcenaria da UnB, do Senhor Ricardo e de sua equipe na marcenaria do LPF, do Senhor Luiz Domiciano Santana (Lula) da seção de produtos florestais e do Senhor João Gomes da Marcenaria Varjão, nas preparações e confecções dos corpos de provas. No controle de umidade e na climatização das amostras, contei com o apoio dos Senhores Peter, João e Sérgio. Com a assistência e tutela de Alexandre Bahia Gontijo, de Elisa, de Juliana e de Fernando, na coleta de dados para a parte de anatomia da madeira, no LPF. Nos ensaios para a determinação das variáveis das propriedades químicas, contei com a tutela e ajuda do Senhor Alessandro Moreira e do Senhor Francisco Lopes. Contei com a orientação e ajuda da Doutora Teresa Cristina Pastore e de sua estagiária Liz Franco, do LPF, para as coletas de espectros em espectrômetro. Com a orientação do Professor Doutor Jez Batista, do IQ/UnB e dos Professores Mário Tomazello e Gilles Chaix, da EFL/ESALQ/USP, na análises e avaliações dos dados dos espectros FTNIR. Com a assistência das estagiárias do Laboratório de Tecnologia da Madeira do EFL/FT/UnB Mariana e Loyane Fernando da Silva, nos ensaios para a determinação das propriedades mecânicas determinadas com a máquina universal de ensaios. E com o socorro da Senhora Marinete Oliveira Queiroz, nas mensurações das variáveis das propriedades físicas.

Ao Senhor Fausto Takizawa bem como a Floresteca e seus colaboradores, Joamir Barbosa, Wellington Cardoso, Luís Roberto, Wisney Amaral, Willian Roque e Wesley Batista, pela paciência e generosidade, em fornecer as procedências de *Tectona grandis* deste estudo e pelo trabalho na colheita e no desdobro da madeira.

E finalmente agradeço aos meus colegas de curso, Clarissa Melo Lima, Edilene Silva Ribeiro, Roberta Souza, Ana Nakamura Diniz, Emanuela de Barros Lustosa, Matheus Couto, Joabel Raabe, Marcella de Paula, Robert Mesquita, Elian Oliveira e Mirian Costa pelas motivações, pelas trocas de experiências e pelas orientações nesses vários anos de companhia e estudos.

Ao INDEA/MT e aos meus colegas de trabalhos pelas experiênciãs de vidas que moldam a minha vida tranquila.

RESUMO:

QUALIDADE DA MADEIRA DE *Tectona grandis* L. f. DE DIFERENTES PROCEDÊNCIAS PARA UTILIZAÇÃO NA INDÚSTRIA DE PRODUTOS FLORESTAIS

Autor: Francis Lívio Corrêa Queiroz

Orientador: Cláudio Henrique Soares Del Menezzi

Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais

Brasília, março de 2018

Este trabalho tem por objetivos qualificar seis procedências de *Tectona grandis* L. f. com nove anos de idade, quanto ao rendimento de madeira serrada e as propriedades tecnológicas, caracterizadas por técnicas convencionais e por técnicas não destrutivas de ensaios, das variáveis de rendimento de madeira serrada, das variáveis das propriedades, anatômicas, químicas, físicas, mecânicas e organolépticas, bem como definir se as técnicas de espectroscopia por infravermelho são adequadas na caracterização da qualidade, visando o uso adequado de suas madeiras. As procedências estudadas foram MT-SE – seminal, MT-00, MT-01, MT-02, MT-08 e MT-80 – clonal, de floresta comercial plantadas no Mato Grosso. Concluiu-se que, para as variáveis de rendimento de madeira serrada, os clones MT-00, MT-01, MT-02 e MT-08, se destacaram das outras procedências. Não há diferença entre as madeiras das procedências, para as propriedades tecnológicas, em função da utilização final. O cerne das procedências tem três cores distintas: marrom-claro para MT-SE, rosa-acinzentada para MT-00, MT-01, MT-02 e MT-80 e marrom-oliva para MT-08. A técnica de FTNIR foi eficiente na predição das variáveis das propriedades tecnológicas da madeira.

Palavras-chaves: teca, dendrometria, qualidade da madeira, difração, espectroscopia.

ABSTRACT

WOOD QUALITY *Tectona grandis* L. F. OF DIFFERENT ORIGINS FOR USE IN FOREST PRODUCTS INDUSTRY

Author: Francis Lívio Corrêa Queiroz

Supervisor: Cláudio Henrique Soares Del Menezzi

Program of Post Graduate in Ciências Florestais

Brasília, march of 2018

This work aims to qualify six origins of *Tectona grandis* L. F. with nine years of age, with regarding to the yield in sawmill and the technological properties, characterized by conventional techniques and non-destructive testing techniques, of variables of yield in sawmill, of the variables of properties, anatomical, chemical, physical, mechanical and organoleptic, as well as to define whether the techniques of infrared spectroscopy are appropriate in the characterization of the quality, aiming at the use proper of their woods. The studied origins were MT-SE – seeds, MT-00, MT-01, MT-02, MT-08 and MT-80 – clonal, from commercial forest plantations in Mato Grosso state. It was concluded that, for the variables of lumber yield, the clones MT-00, MT-01, MT-02 and MT-08, stood out from the other origins. There is no difference between the timbers of the origins, for the technological properties, depending on the final use. The heartwood of the origins has three distinct colours: light-brown for MT-SE, pink-grayish for MT-00, MT-01, MT-02 and MT-80 and olive-brown for MT-08. The FTNIR technique was efficient in predicting the variables of the technology properties of wood.

Key words: teak, dendrometry, wood quality, diffraction, spectroscopy.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.1.1 Objetivos gerais	3
1.1.2 Objetivos específicos	3
1.2 HIPÓTESE	3
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 <i>Tectona grandis</i>	3
2.1.1 Ocorrência, fitofisionomia e qualidade da madeira de teca	3
2.2 MADEIRA DE LENHO JUVENIL	5
2.3 PROPRIEDADES DENDROMÉTRICAS E RENDIMENTO EM DESDOBRO	6
2.4 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DA MADEIRA	8
2.4.1 Propriedades anatômicas	8
2.4.1.1 Parede celular	8
2.4.1.2 Elementos de vasos	11
2.4.1.3 Fibras	12
2.4.1.4 Microfibrila e ângulo microfibrilar	13
2.4.1.4a Cristalografia	15
2.4.1.4b Difração de raios-X	17
2.4.2 Propriedades físicas	19
2.4.3 Propriedades químicas	21
2.4.4 Propriedades mecânicas	24
2.4.5 Classes de resistência da madeira	25
2.5 TÉCNICAS DE ANÁLISES	26
2.5.1 Técnicas destrutivas ou convencionais	26
2.5.2 Técnicas não-destrutivas	26
2.5.2.1 Técnica de espectrometria no infravermelho próximo	27
2.5.2.2 Colorimetria	29
2.6 ANÁLISES MULTIVARIADAS DE DADOS	31
CAPÍTULO I: RENDIMENTO DE MADEIRA SERRADA DE PROCEDÊNCIAS DE <i>Tectona grandis</i> EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS	35
1 INTRODUÇÃO	35
2 MATERIAL E MÉTODOS	37
2.1 GENÓTIPOS E ÁREA DE ESTUDO	37
2.2 DENDROMETRIA E RENDIMENTO DE MADEIRA SERRADA DE PROCEDÊNCIAS DE <i>Tectona grandis</i>	38
2.2.1 Variáveis dendrométricas	38
2.2.2 Rendimento em desdobro	42
2.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA	44
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
3.1 VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS	45
3.2 RENDIMENTO EM DESDOBRO	50
3.3 CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS E AS VARIÁVEIS DE RENDIMENTO DE DESDOBRO DE MADEIRA SERRADA	54

3.4 CLASSIFICAÇÃO DE IMPORTÂNCIA ENTRE AS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS E AS VARIÁVEIS DE RENDIMENTO DE DESDOBRAMENTO DE MADEIRA SERRADA NA QUALIFICAÇÃO DAS PROCEDÊNCIAS	57
5 CONCLUSÃO	60
CAPÍTULO II: EFEITO DAS PROCEDÊNCIAS SOBRE AS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DA MADEIRA DE <i>Tectona grandis</i>	
1 INTRODUÇÃO	62
2 MATERIAL E MÉTODOS	64
2.1 MATERIAL DE ESTUDO	64
2.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA DE PROCEDÊNCIAS DE <i>Tectona grandis</i>	64
2.2.1. Características Anatômicas	64
2.2.1.1 Microscopia na avaliação de caracteres Anatômicos	65
2.2.1.2 Anatomia por difração de raios-X para estimativa do ângulo microfibrilar	66
2.2.2 Propriedades químicas	68
2.2.2.1 Componentes químicos	68
2.2.2.2 Extrativos	69
2.2.2.3 Cinzas sem extrativos	70
2.2.2.4 Lignina	70
2.2.2.4a Lignina insolúvel	70
2.2.2.4b Lignina solúvel	71
2.2.2.4c Lignina total	71
2.2.2.5 Holocelulose	72
2.2.3 Propriedades físicas	72
2.2.3.1 Ensaio físicos	72
2.2.3.2 Densidade aparente	73
2.2.3.3 Densidade básica	73
2.2.3.4 Variação dimensional da madeira	74
2.2.4 Propriedades mecânicas	76
2.2.4.1 Variáveis das propriedades mecânicas	76
2.2.4.2 Resistência à compressão paralela às Fibras	77
2.2.4.3 Resistência à compressão normal	77
2.2.4.4 Flexão estática	78
2.2.4.5 Dureza	79
2.2.5 Propriedades organolépticas por colorimetria – CIELab – Cor da madeira	80
2.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA	81
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
3.1 CARACTERÍSTICAS ANATÔMICAS	82
3.1.1 Microscopia na avaliação de caracteres anatômicos	82
3.1.2 Difração de raios-X para estimativa do ângulo microfibrilar de celulose	90
3.2 PROPRIEDADES QUÍMICAS	94
3.2.1 Componentes químicos	94

3.3	PROPRIEDADES FÍSICAS	97
3.3.1	Densidade aparente e densidade básica	97
3.3.2	Variação dimensional da madeira	100
3.4	PROPRIEDADES MECÂNICAS	104
3.4.1	Variáveis das propriedades mecânicas	104
3.5	COR DA MADEIRA POR COLORIMETRIA CIELab	108
3.6	CORRELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DA MADEIRA DE <i>Tectona grandis</i>	114
3.7	CLASSIFICAÇÃO DE IMPORTÂNCIA ENTRE VARIÁVEIS DE PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS NA QUALIFICAÇÃO DAS PROCEDÊNCIAS	117
3.8	QUALIFICAÇÃO DA MADEIRA DE <i>Tectona grandis</i> A PARTIR DE VARIÁVEIS DE PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS	119
4	CONCLUSÃO	123
	CAPÍTULO III: CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DAS PROCEDÊNCIAS DE <i>Tectona grandis</i> POR INFRAVERMELHO PRÓXIMO	125
1	INTRODUÇÃO	125
2	MATERIAL E MÉTODOS	127
2.1	MATERIAL DE ESTUDO	127
2.2	PROPRIEDADES DA MADEIRA DAS PROCEDÊNCIAS DE <i>Tectona grandis</i> – POR INFRAVERMELHO PRÓXIMO	127
2.2.1	Variáveis das propriedades anatômicas, químicas, físicas e mecânicas preditas por infravermelho próximo	127
2.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA	131
3	RESULTADOS	131
3.1	PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DA MADEIRA POR FTNIR .	131
3.1.1	Pré-tratamentos dos dados espectrais por infravermelho próximo	131
3.1.2	Variáveis de propriedades tecnológicas por infravermelho próximo	132
4	CONCLUSÃO	141
	CONCLUSÃO GERAL	142
	RECOMENDAÇÕES	142
	REFERÊNCIAS	143
	APÊNDICES	158
	A - CLASSIFICAÇÃO DA VARIÁVEIS TECNOLÓGICAS	159
	B – ESTATÍSTICA	159
	B.1 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA	159
	B.2 – TWO STEP CLUSTER	168

LISTA DE TABELAS

	Página	
Tabela 1.1	Resumo da análise de variância e da estatística descritiva para as variáveis dendrométricas, em função de seis procedências de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade	46
Tabela 1.2	Resumo das médias e do teste de Tukey, para as variáveis dendrométricas, em função de seis procedências de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade	48
Tabela 1.3	Resumo da análise de variância e da estatística descritiva para as variáveis de rendimento de desdobro de madeira serrada, em função de seis procedências de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade	50
Tabela 1.4	Resumo das médias e do teste de Tukey, para as variáveis de rendimento de desdobro de madeira serrada, em função de seis procedências de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade	51
Tabela 1.5	Correlação de Pearson, entre as variáveis dendrométricas e as variáveis de rendimento de desdobro de madeira serrada, em função de seis procedências de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade	55
Tabela 2.1	Resumo da análise de variância e da estatística descritiva, para os caracteres anatômicos, das seis procedências com as camadas do perfil radial de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade, em esquema fatorial 6 x 3	83
Tabela 2.2	Resumo das médias e do teste de Tukey, do fator 1 (procedências) e do fator 2 (camadas do perfil radial), para os caracteres anatômicos das procedências de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade	86
Tabela 2.3	Análise de variância e estatística descritiva do ângulo microfibrilar de celulose (mfa), das seis procedências com as camadas do perfil radial de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade, em esquema fatorial 6 x 3	90
Tabela 2.4	Resumo de médias e do teste de Tukey, do fator 1 (procedências) e do fator 2 (camadas do perfil radial), para a ultraestrutura anatômica <u>MFA</u> (°), em função das seis procedências de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade	91
Tabela 2.5	Resumo da análise de variância e da estatística descritiva para os percentuais dos componentes químicos, em função de seis procedências de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade	95
Tabela 2.6	Resumo das médias e do teste de Tukey, para os percentuais dos componentes químicos, em função de seis procedências de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade	95
Tabela 2.7	Resumo da análise de variância e da estatística descritiva para a propriedade física densidade, em função de seis procedências (fator 1) e das camadas do perfil radial (fator 2) da madeira de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade, em esquema fatorial 6 x 2	98

Tabela 2.8	Resumo das médias e do teste de Tukey, para as propriedades físicas, densidade, em função de seis procedências (fator 1) da madeira de <i>Tectona grandis</i> , com nove anos de idade	99
Tabela 2.9	Resumo da análise de variância e da estatística descritiva para as propriedades físicas: inchamento, retração, variação volumétrica e anisotropia dimensional de retração, em função de seis procedências (fator 1) e das camadas do perfil radial (fator 2) de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade	100
Tabela 2.10	Resumo dos valores médios e do teste de Tukey, para as propriedades de variação dimensional, em função de seis procedências (fator 1) e das camadas do perfil radial (fator 2) da madeira de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade	102
Tabela 2.11	Resumo da análise de variância e da estatística descritiva para as propriedades mecânicas, em função de seis procedências (fator 1) e das camadas do perfil radial (fator 2) da madeira de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade, em esquema fatorial 6 x 2	105
Tabela 2.12	Resumo das médias e do teste de Tukey, para as propriedades mecânicas, em função de seis procedências (fator 1), e das camadas do perfil radial (fator 2), da madeira de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade.	106
Tabela 2.13	Resumo da análise de variância e da estatística descritiva para as variáveis cromáticas, em função de seis procedências (Fator 1) e das camadas do perfil radial (Fator 2) da madeira de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade, em esquema fatorial 6 x 2	109
Tabela 2.14	Resumo das médias e do teste de Tukey, para as variáveis cromáticas, em função de seis procedências (Fator 1) e das camadas do perfil radial (Fator 2) da madeira de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade	111
Tabela 2.15	Valores médios das variáveis cromáticas, em função das seis procedências (Fator 1) com as camadas do perfil radial (Fator 2) para a determinação da cor da madeira de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade	113
Tabela 2.16	Correlação linear de Pearson, entre as variáveis das propriedades anatômicas, químicas, físicas e mecânicas, em função de seis procedências de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade	114
Tabela 2.17	Resumo dos valores médios por procedências das variáveis das propriedades tecnológicas, para enquadramento da madeira de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade, conforme classe de resistência	120
Tabela 2.18	Resumo dos valores médios gerais, para classificação das variáveis das propriedades tecnológicas da madeira de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade	121
Tabela 3.1	Valores da porcentagem de variância (% var), para os dados dos espectros FTNIR da madeira de <i>Tectona</i>	

	<i>grandis</i> com nove anos de idade, em função das camadas do perfil radial	132
Tabela 3.2	Espessura das paredes da fibra da madeira de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade, predita por FTNIR, em função das camadas do perfil radial	133
Tabela 3.3	Ângulo microfibrilar de celulose da madeira de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade, predito por FTNIR, em função das camadas do perfil radial	133
Tabela 3.4	Teor de lignina da madeira de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade, predito por FTNIR, em função das camadas do perfil radial	135
Tabela 3.5	Densidade básica da madeira de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade, predita por FTNIR, em função das camadas do perfil radial	136
Tabela 3.6	Módulo de ruptura da madeira de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade, predito por FTNIR, em função das camadas do perfil radial	136
Tabela 3.7	Módulo de elasticidade da madeira de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade, predito por FTNIR, em função das camadas do perfil radial	137
Tabela A	Classificação das variáveis tecnológicas, em função da classe de resistência, para dicotiledôneas (U = 12%)	159
Tabela B	Anova para as variáveis dendrométricas DAP, HT, HC, %CRN, %ALB e C das seis procedências de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade, em DIC	159
Tabela C	Anova para as variáveis de rendimento de madeira serrada VTASC, VCASC, VMS, VRS, RTASC e RCASC das seis procedências de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade, em DIC	160
Tabela D	Anova para os caracteres anatômicos CEV, CF, LF, DL e EPF das seis procedências com as camadas do perfil radial de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade, em esquema fatorial 6 x 3	160
Tabela E	Anova para os caracteres anatômicos DV e FV das seis procedências com as camadas do perfil radial de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade, em esquema fatorial 6 x 3	161
Tabela F	Anova para os caracteres anatômicos MFA das seis procedências com as camadas do perfil radial de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade, em esquema fatorial 6 x 3	161
Tabela G	Anova para os componentes químicos das seis procedências de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade, em DIC	162
Tabela H	Anova para as variáveis das propriedades físicas U, ρ_{AP} , ρ_B , ΔV , ϵ_{r1} , ϵ_{r2} , ϵ_{r3} , ϵ_{i1} , ϵ_{i2} e ϵ_{i3} das seis procedências com as camadas do perfil radial de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade, em esquema fatorial 6 x 2	162
Tabela I	Anova para as variáveis das propriedades físicas A_i e A_r das seis procedências com as camadas do perfil radial de	

	<i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade, em esquema fatorial 6 x 2	164
Tabela J	Anova para as variáveis das propriedades Mecânicas $f_{C,0}$, $f_{C,90}$, f_H , f_M e E_M das seis procedências com as camadas do perfil radial de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade, em esquema fatorial 6 x 2	165
Tabela K	Anova para as variáveis das cromáticas L^* , a^* , b^* , C e h^* das seis procedências com as camadas do perfil radial de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade, em esquema fatorial 6 x 2	166

LISTA DE FIGURAS

		Página
Figura 1	Parede celular. Parede primária com arranjo de microfibrilas (A). Paredes primária e secundária, com arranjo ordenado de microfibrilas, nas camadas da parede secundária (B)	10
Figura 2	Estrutura da parede celular, com detalhes das microfibrilas e micelas, e arranjo ordenado das micelas	11
Figura 3	Elemento de vaso – 10x	12
Figura 4	Fibras – 4x	13
Figura 5	Projeções de faces, sistemas e formas presentes em cristais: Projeção perpendicular (A); Projeção paralela, sistema hexagonal e forma prisma (B); Projeção estereográfica, sistema hexagonal e forma bipirâmide, com seis faces e com eixos de ângulos aleatórios (C) ...	16
Figura 6	Geometria da reflexão da Lei de Bragg - $\theta = \text{sen}^{-1}_n ((\lambda/2)^*(n/2d_{hkl}))$	18
Figura 1.1	Dendrometria das procedências de <i>Tectona grandis</i> . Mensuração de altura comercial (A); Mensuração da CAP (B)	38
Figura 1.2	Rendimento da madeira das procedências de <i>Tectona grandis</i> . Desdobramento em serra fita geminada (A); Madeira desdobrada em blocos (B); Madeira desdobrada em sarrafos (C)	43
Figura 1.3	Resumo do modelo preditor (A); Tamanhos de <i>Cluster</i> (B); e Qualidade de Cluster (C) – <i>Output, two step cluster</i>	58
Figura 1.4	Importância geral das variáveis dentro do modelo preditor (A) Importância das variáveis por <i>cluster</i> no modelo preditor (B) – <i>Output, two step cluster</i>	59
Figura 2.1	Amostragem dos clones de <i>Tectona grandis</i> . (A) Secções de retirada de corpos de prova para caracterização anatômica e química. (B) Secções para retirada dos corpos de prova para caracterização físicas e mecânicas. (C) Corpos de prova para caracterização física, mecânica, organoléptica e FTNIR	64
Figura 2.2	Figura 2.2 – Caracterização microscópica do lenho de <i>Tectona grandis</i> . Confeção de lâminas temporárias a partir de macerado (A). Medições e fotografias dos caracteres anatômicos, com o programa Olympus DP2 - BSW (B). Quadrilátero para contagem da frequência de vasos (C). E lupa Olympus (D)	66
Figura 2.3	Análise por DRX - amostra da madeira de <i>Tectona grandis</i> (A), amostra da madeira moída (B), madeira moída acondicionada em microtubo, sendo montada na lâmina de análise (C), lâminas montadas para análise (D), análise da amostra no difratômetro de raios-X (E) e difratograma processado com o <i>Software</i> JADE 9 (F)	68
Figura 2.4	Constituintes químicos: preparação de amostras (A); teor de extrativos (B); teor de cinzas, sem extrativos (C);	

	hidrólise ácida para separar lignina (D); filtragem da lignina insolúvel (E); leitura de absorvância para determinação do teor de lignina solúvel (F)	69
Figura 2.5	Ensaio das propriedades físicas da madeira de seis procedências de <i>Tectona grandis</i> , com nove anos de idade: secagem da madeira (A); saturação dos corpos de prova em água (B); medidas das dimensões com paquímetro (C); e mensuração da massa em balança analítica (D)	73
Figura 2.6	Ensaio mecânicos da madeira das seis procedências de <i>Tectona grandis</i> : resistência à compressão paralela às fibras (A); resistência à compressão normal às fibras (B); flexão estática (C); e dureza Janka (D)	77
Figura 2.7	Figura 2.7 – Equipamento espectrofotômetro portátil COLOR Eye XTH – Gretag Macbeth (A) e Panorâmica de coleta de espectros da amostra de madeira de <i>Tectona grandis</i> no espectrofotômetro, com visualização de dados e gráficos processados no Software Color iControl (B)	81
Figura 2.8	Interação do Fator 1 – (procedências) com o Fator 2 – (camadas do perfil radial), para o caractere anatômico comprimento de fibra (CF) (A); espessura da parede da fibra (EPF) (B); largura da fibra (LF) (C), para madeiras de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, nas colunas, para teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade	89
Figura 2.9	Difratograma, em função da intensidade de difração e do ângulo de difração (2θ), dos raios-X, para madeira de <i>Tectona grandis</i> com 9 anos	93
Figura 2.10	Distribuição de escores, em função dos espectros de refletância, obtidos para o modelo estimador das cores da madeira de <i>Tectona grandis</i> , com o software iControl, com base no sistema colorimétrico – CIELab (1976), para as variáveis L^* , a^* e b^*	112
Figura 2.11	Resumo do modelo preditor (A). Tamanhos de <i>Cluster</i> (B). E Qualidade de <i>Cluster</i> (C) – <i>Output, two step cluster</i>	118
Figura 2.12	<i>Cluster</i> com variáveis classificadas por importância geral do modelo preditor – <i>Output, two step cluster</i>	119
Figura 3.1	Equipamento espectrofotômetro Tensor 37, da ©Bruker, com sonda óptica coletando espectros da madeira sólida (A); e Padrão de coleta de espectros processados com o Software OPUS 6.5 (B)	129
Figura 3.2	Espectros transformados (A) e (C). E resultados de validação cruzada dos modelos PLS1, com valores preditos por FTNIR, em função dos valores de referência (B) e (D). para madeira de <i>Tectona grandis</i> com nove anos	139

Figura A	<i>Two step cluster</i> para variáveis de rendimento da madeira serrada de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade	168
Figura B	<i>Two step cluster</i> para variáveis de propriedades tecnológicas da madeira de <i>Tectona grandis</i> com nove anos de idade	169
Figura C	Classificação das procedências: Dentro do <i>cluster</i> 1 (A). Dentro do <i>cluster</i> 2 (B) de variáveis de rendimento	170
Figura D	Classificação das procedências dentro do único <i>cluster</i> de variáveis de propriedades tecnológicas	171

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIações

ASTM	– <i>American Society for Testing and Materials Standards</i> .
CAP	– Circunferência à altura do peito.
CIE	– <i>Commision Internationale L'Eclairage</i> – Comissão Internacional de Iluminação.
cm	– Centímetros.
cm.m ⁻¹	– Centímetros por metro.
COPANT	– Comissão Panamericana de Normas Técnica.
CV	– Coeficiente de variação.
DIC	– Delineamento inteiramente casualizado.
DIN	– Normas Germânicas.
F _{Cal}	– <i>F-ratio</i> – F-estatístico calculado
FTIR	– <i>Fourier Transform-Infrared</i> – Infravermelho com Transformada de Fourier.
GL	– Grau de liberdade.
hc	– Altura comercial.
ht	– Altura total.
K	– Valor característico das ações variáveis.
kg.cm ⁻³	– Quilogramas por centímetro cúbico.
m ²	– Metros quadrados.
m ³	– Metros cúbicos.
mm	– Milímetros.
MPa	– Megapascal.
NBR	– Normas brasileiras.
N.cm ⁻²	– Newtons por centímetro quadrado.
nm	– Nanômetros.
PCA	– <i>Principal Component Analysis</i> – Análise Componentes Principais.
PLS	– <i>Partial Least Squares</i> – Mínimos Quadrados Parciais.
R	– Coeficiente de correlação.
R ²	– Coeficiente de determinação.
RMSEC	– <i>Root Mean Square Error of Calibration</i> – Raiz Quadrada do erro Médio Quadrático de Calibração.
RMSECV	– <i>Root Mean Square Error of Cross Validation</i> – Raiz Quadrada do erro Médio Quadrático de Validação Cruzada.
RMSEL	– <i>Root Mean Square Error of Cross Validation</i> – Raiz Quadrada do erro Médio Quadrático de Laboratório.
RPD	– <i>Residual Prediction Deviation</i> – Desvio Residual de Predição ou Relação de Desempenho de Desvio.
SNV	– Standard Normal Variate – Variação de Padrão Normal.
TAPPI	– <i>Technical Association of the Pulp and Paper Industry</i> – Associação Técnica das Indústrias de Poupas e Papel.
VL	– Variável Latente.
Σ	– Desvio padrão.
°	– Graus.
μm	– Micrômetro.
π	– <i>Pi</i> .
%	– Porcentagem.
Σ	– Somatória.
Θ	– Ângulo de incidência – <i>Teta</i> .

1 – INTRODUÇÃO GERAL

A silvicultura de floresta plantada em Mato Grosso está em franco desenvolvimento, com a ampliação das florestas de *Tectona grandis* L. f. (teca) e de *Eucalyptus* spp, que são cultivadas com objetivo final de madeiras para as indústrias moveleira e naval e para a produção de energia. Os produtores florestais com a perspectiva de obtenção de um bom retorno financeiro ao investimento estão introduzindo novas espécies de rápido crescimento ao arranjo produtivo da silvicultura matogrossense, que são: *Schizolobium amazonicum*, *Ochroma pyramidale*, *Azadirachta indica* e *Acácia mangium*, porém, o destaque ainda continua sendo para as florestas de *Tectona grandis*.

Ângelo et al. (2009) e Shimizu et al. (2007) em estudos com teca, no Estado de Mato Grosso a descreveram como madeira altamente valorizada no mercado internacional, e a espécie que demonstrou a maior perspectiva de retorno dos investimentos em plantios intensivos, com comprovação em estudo de aspecto financeiro, com investimento lucrativo aos produtores.

A madeira de teca alcança bons preços e, compete, no momento em igualdade de situação com madeiras consideradas nobres mundialmente, em especial comparada ao mogno. No entanto, na indústria naval o preço da teca sobressai àquelas indicadas para esta utilização (COSTA et al. 2007).

Para conquistar incrementos médios maiores há necessidade de produzir florestas com o uso de materiais selecionados e por clones geneticamente melhorados, em sítios bem condicionados e com atenção aos tratos culturais. As empresas de base florestal objetivando o máximo rendimento dos materiais adaptados às condições de solo e clima de Mato Grosso, tem buscado pela seleção de árvores com características superiores na produção de clones, que tem demonstrado excelentes resultados preliminares, quanto às características dendrométricas.

Estudos para comprovação desses resultados são necessários para orientar os investimentos na cultura, bem como para incentivar a demanda para a madeira de teca no mercado local e internacional, buscando agregar mais valor a um produto tão valioso.

As empresas florestais selecionam seus materiais com objetivo de buscar árvores com fuste reto, com menor número de galhos, com menor ângulo de inserção dos galhos e com dominância no crescimento. Depois buscam caracterizar seus materiais quanto às características tecnológicas e suas aplicações. A avaliação das variáveis das propriedades dendrométricas e tecnológicas são importantes na determinação da variabilidade entre os materiais testados, visando o uso final adequado de seus produtos.

A seleção de árvores de *Tectona grandis* em programa de melhoramento florestal com base em características dendrológicas superiores, na busca de materiais genéticos que produzam madeiras com requisitos tecnológicos desejáveis as diversas aplicações é o objetivo de comum a todas as empresas florestais. O estudo das propriedades físicas e mecânicas associadas a caracterização anatômica do lenho e suas correlações permitirão a seleção e a aptidão dos clones estudados.

As propriedades mecânicas da madeira representam a expressão do seu comportamento quando sujeitas a ação de esforços externos e internos, como de sua própria massa. O conhecimento destas propriedades constitui um dos fundamentos básicos para a determinação de seus possíveis usos, principalmente na construção civil (BOTREL, 2007).

As relações entre a genética e as propriedades da madeira são muito importantes. Normalmente há uma correlação estreita, onde a genética afeta diretamente a propriedade da madeira, como no caso da espessura da parede celular e a densidade da madeira (ZOBEL e JETT, 1995). Assim, há necessidade de estudos que façam interações entre as propriedades tecnológicas das madeiras buscando tanto o aperfeiçoamento dos programas de melhoramento e o seu direcionamento para usos específicos.

A utilização da madeira está diretamente relacionada com o uso que se deseja dar a essa matéria-prima. Em trabalhos de melhoramento florestal as empresas buscam a maximização de volume, pois, seu objetivo principal é produzir o maior volume de madeira em um menor tempo visando os principais usos da madeira de *Tectona grandis*.

1.1 - OBJETIVOS

1.1.1 – Objetivos gerais

Este trabalho tem por objetivos gerais caracterizar e avaliar as propriedades de rendimento de madeira serrada e as propriedades tecnológicas, na qualidade da madeira de seis procedências de *Tectona grandis*.

1.1.2 – Objetivos específicos

Os objetivos específicos são, qualificar as seis procedências de *Tectona grandis* L. f., quanto: ao rendimento de madeira serrada em função das variáveis dendrométricas; a seleção das procedências em função da classificação das propriedades tecnológicas, visando o uso adequado de suas madeiras; e a definição da técnica não destrutiva de análise de material por espectroscopia no infravermelho como adequada à caracterização das propriedades tecnológicas.

A parte textual deste trabalho está assim organizado: Introdução, com objetivos, hipótese, e revisão de literatura; Capítulo I; Capítulo II; Capítulo III; Conclusão geral; Recomendações; Referências; e Apêndices.

1.2 – HIPÓTESE

Existe diferença significativa entre a madeira das procedências MT-SE, MT-00, MT-01, MT-02, MT-08 e MT-80 de *Tectona grandis*, e essa diferença reflete no rendimento de madeira serrada e nas propriedades tecnológicas de sua madeira.

2 - REVISÃO DE LITERATURA

2.1 - *Tectona grandis*

2.1.1 – Ocorrência, fitofisionomia e qualidade da madeira de teca

A espécie *Tectona grandis* L. f. é uma **Lamiaceae**, conhecida mundialmente por teca, teak, tiek, teck e djati. Tem ocorrência natural entre 10° e 25°N no subcontinente Índico e no sudeste asiático, especialmente na Índia, Burma

(hoje Myanmar), Tailândia, Laos, Camboja, Vietname e Java. Foi introduzida na Malásia, e hoje é plantada em todo espaço tropical, sendo: Togo, Camarões, Zaire, Nigéria, Trinidad, Honduras, Costa Rica, Panamá, Brasil e México. É uma caducifólia e atinge alturas entre 25 e 35 m, raramente acima de 45 m, com DAP de 100 cm ou mais em árvores adultas. As diversas progênies distinguem-se pela forma e coloração das folhas, pela cor e estrutura da casca e pela forma do tronco. As procedências do norte da Tailândia e de Burma são conhecidas pelos troncos retilíneos. A teca da Índia e da Indonésia possui geralmente ramos de inserção baixa no fuste. O tronco é geralmente cilíndrico e frequentemente bifurcado. A casca mole atinge até 15 mm de espessura, desprendendo-se em longas faixas verticais e tem sabor amargo (LAMPRECHT, 1990; ARIAS, 2013).

As folhas de disposição oposta a verticilar em grupos de três são coriáceas e possuem comprimentos de 30 a 60 cm e largura entre 20 e 35 cm. Os limbos são largo-elípticos, glabros na face superior, bem como tomentosos e verruculosos na face inferior. As pequenas flores brancas, dispõem-se em panículas de até 40 x 35 cm. Os frutos drupáceos de forma cilíndrica e de cor marrom possuem diâmetros de cerca de 1 cm, apresentam 4 valvas, mas apenas produzem geralmente entre 1 e 3 sementes, por fruto (LAMPRECHT, 1990).

As propriedades tecnológicas da madeira de teca dependem substancialmente da qualidade do sítio. Para Centeno (1997), o bom crescimento e a alta qualidade da madeira de teca estão associados a solos aluviais planos, bem drenados e profundos, e ricos em cálcio. Com temperatura média anual entre 22 e 27 °C. Com precipitação anual entre 1.500 a 2.500 mm, com estação seca marcada de 3 a 5 meses, com no máximo de 50 mm de chuvas. As condições locais de secas são normalmente associadas com crescimento atrofiado. Excesso de umidade pode levar a um crescimento mais rápido, mas também a uma má qualidade geral, incluindo menor densidade média, cor menos atraente, empobrecimento da textura e perda de resistência mecânica. O espaço disponível para cada árvore, influência fortemente os seus padrões de crescimento, e, por consequentemente no conjunto desenvolvimento e rendimento da plantação, bem como na quantidade e qualidade da madeira produzida.

2.2 – MADEIRA DE LENHO JUVENIL

A madeira de árvores mais jovens, constituída de alta percentagem de lenho juvenil na seção do tronco, possui propriedades mecânicas mais baixas que nas árvores maduras (SANTINI et al. 2000).

Gatto et al. (2008) em análise da variação radial das características anatômicas da madeira de *Luehea divaricata* em função da idade, concluiu que, o comprimento das fibras aumentou linearmente nos primeiros anos, seguindo-se de uma estabilização e de um pequeno decréscimo com o aumento da idade, que a distinção entre o lenhos juvenil e o lenho adulto pode ser determinada através do comprimento das fibras, e que o diâmetro das fibras, o diâmetro do lume e espessura da parede celular não permitem definir o ano de segregação dos lenhos juvenil e adulto.

Burdon et al. (2004) entendem que a terminologia madeira juvenil e madeira madura é inadequada, consideram que a terminologia alternativa para essa progressão radial é de *corewood* (madeira da medula) e *outerwood* (madeira exterior), com mais adequada, em função de dois pontos: (1) várias propriedades da madeira mostram uma variação substancial no eixo axial e na medula; (2) esta categorização baseada unicamente em variação radial não é contemplada no conceito botânico de maturação. No entanto, a variação axial está estreitamente relacionada a variação axial da morfologia no início da fase reprodutiva, que reflete na maturação da árvore. Estes defendem uma caracterização bidimensional das propriedades da madeira: juvenil por maduro para a progressão no eixo axial, da base para o topo do tronco, e *corewood* contra *outerwood* para a progressão radial, da medula para a casca.

De Moura Palermo et al. (2013), em estuda da delimitação entre os lenhos juvenil e adulto de *Pinus elliottii*, em função de comprimento dos traqueídeos e da densidade do lenho, descrevem que no processo de diferenciação da célula ocorre primeiramente o seu alongamento, para depois ocorrer o espessamento. Assim, é de se esperar que a transição do lenho juvenil e adulto aconteça em diferentes idades, dependendo das propriedades comprimento de fibra, densidade, ângulo microfibrilar. Diante do fato de a idade de transição poder ser diferente em razão

da propriedade, a proporção de madeira juvenil também mudará, dependendo da variável utilizada na medição. Dessa forma, programas de melhoramento genético poderá selecionar árvores com idades de transição equivalentes, assegurando as mesmas proporções de lenhos e madeira com características mais uniformes.

Para densidade da madeira De Moura Palermo et al. (2013) consideraram que apesar da alta herdabilidade, esta é também influenciada por fatores externos, que afetam a atividade cambial – adubação, densidade de plantio, fatores climáticos, irrigação. Assim, enquanto a estabilização do comprimento de fibra é afetada diretamente pela maturação do câmbio, a da densidade depende da atividade cambial, que é afetada por fatores externos. Dessa forma, na fase adulta a densidade tende a se estabilizar no momento em que a relação entre os lenhos inicial e tardio se tornam menos discrepantes.

Bhat et al. (2001), em estudo das propriedades de madeira juvenil de *Tectona grandis* L. F, para avaliar o potencial da utilização da madeira da rotação curta (entre 50 e 60 anos), na Índia, com uso de modelos segmentados de regressão e interpretação visual dos padrões radial de variação nas propriedades anatômicas chegaram a resultados que revelam que em plantações cultivadas o lenho juvenil se estende até 15 e ou 20-25 anos de idade, dependendo da propriedade, da taxa de crescimento individual da árvore e do local da plantação. Sendo o comprimento da fibra, o ângulo microfibrilar, o diâmetro do vaso, a porcentagem e a largura do anel de crescimento os melhores indicadores anatômicos da demarcação da idade entre a madeira juvenil e madura, considerando que a idade da maturação variou frequentemente entre as propriedades analisadas.

2.3 – PROPRIEDADES DENDROMÉTRICAS E RENDIMENTO EM DESDOBRO

Nos estudos referentes à produção e quantificação volumétrica de madeira de plantio florestal é importante o conhecimento das variáveis dendrométricas das árvores de um povoamento, tais como o diâmetro, o volume da madeira, a conicidade, etc. Além dessas variáveis, para o setor florestal madeireiro é também importante o conhecimento da porcentagem de cerne e alborno ou da relação cerne-alborno da madeira de certa espécie ou clone, em idades específicas. O

conhecimento do rendimento de madeira serrada é também fundamental no planejamento de atividades industriais que tem a madeira como matéria prima. A quantificação do cerne e do alburno na madeira é muito importante para a definição de usos, em função das características do lenho desses materiais. A madeira com maior quantidade de cerne é desejável para a produção de móveis e construção civil, devido a maior proporção de madeira adulta (EVANGELISTA, 2007).

O principal produto de uma serraria é a madeira serrada, porém, para a sua obtenção uma grande quantidade de subprodutos é gerada. O conhecimento sobre quais subprodutos estão sendo gerados, assim como a sua porcentagem são importantes para a melhor gestão da indústria e a redução dos impactos ambientais (MONTEIRO et al. 2013).

Na maioria das pequenas serrarias da região sul do Estado do Espírito Santo, o desdobro de toras é realizado com pouco planejamento e com base na experiência dos operadores, resultando em baixo desempenho operacional e produtos de baixa qualidade (BATISTA et al. 2013). Esta descrição é a realidade das pequenas indústrias madeireiras no Brasil, sendo também verdade que, essas características restringem o mercado das serrarias, que conseguem atender apenas a uma gama de produtos de baixo valor agregado, o que limita o sucesso econômico dos empreendimentos.

Ângelo et al. (2004), em análise econômica da indústria de madeiras tropicais do polo madeireiro de Sinop/MT, constataram que o rendimento do processamento de toras é alto, 54,85%, considerando os padrões das indústrias da região amazônica do Brasil. Porém, a baixa produtividade dos fatores capital e trabalho empregado no processamento, traz a necessidade de modernização do parque industrial, para a manutenção dos ganhos com o beneficiamento.

Hardiyanto e Prayitno (2008) estudando técnicas de desdobro nas indústrias privadas rurais e nas indústrias comunitárias de madeira de teca, em Java, Indonésia, as avaliaram como tradicionais e muito simples. Constataram que a maioria dos pequenos empreendimentos não avaliam o rendimento de madeira serrada e que com os dados obtidos sobre a serraria revela que a taxa de rendimento no processamento de teca nas pequenas indústrias comunitárias foi baixa, menor que 40%.

Budiaman e Komalasari (2012) avaliando a gestão de floresta comunitária, e de floresta privada de teca em Perum Perhutani, Indonésia, descrevem que o desdobro das toras é realizado de forma tradicional e há deficiências na informação sobre a produção de madeira serradas e de resíduos de madeira. E concluíram que, a quantidade de resíduos de madeira produzidos nas florestas privadas foi de 28%, enquanto que a quantidade de resíduos de madeira provenientes da produção blocos de madeira com uso de motosserra foi de 41,3% nas florestas comunitárias, classificadas como razoavelmente alta.

Kokutse et al. (2004) estudando a proporção e qualidade do cerne de teca (*Tectona grandis* L. f) em Togo, observaram que com idades entre 40-45 anos de idade as árvores possuem uma proporção relativamente grande de cerne (70%). Acima dos 30 anos, o crescimento é lento e as correlações entre DAP e volume de cerne por idade não são significativas. Acima de 40 anos de idade a proporção de cerne parece não aumentar significativamente. Os engenheiros florestais em Togo não têm os recursos financeiros para gerenciar as plantações de teca, com os dados desse estudo é possível sugerir que a idade de rotação pode ser reduzida para 40 anos, em vez dos atuais 60-70 anos.

2.4 – CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DA MADEIRA

2.4.1 – Propriedades anatômicas

As propriedades físicas e mecânicas variam de uma espécie para outra, entre árvores de uma mesma espécie e entre peças provenientes de uma mesma árvore, em função da anatomia da madeira e de sua constituição química. O principal objetivo da investigação anatômica é determinar a relação existente entre as características estruturais da madeira e seu uso. Como exemplo, as dimensões das fibras, que dão indicações importantes das propriedades da celulose e sua adequação na fabricação de um determinado tipo de papel. Entre as principais dimensões das fibras se destacam o comprimento, a largura, o diâmetro do lúmen e a espessura da parede celular (HUGHES, 1973; CARNEIRO, 2006).

2.4.1.1 – Parede celular

KRAUS et al. (2006) descrevem que uma das mais significativas características da célula vegetal é a presença da parede, que envolve

externamente a membrana plasmática e o conteúdo celular. Células sem paredes são raras e ocorrem, por exemplo, durante a formação do endosperma de algumas angiospermas e de embriões de gimnospermas. A estrutura da parede celular é formada por microfibrilas de celulose, imersas em uma matriz contendo polissacarídeos não-celulósicos: hemiceluloses e pectinas. É composta por 30 a 100 moléculas de celulose, que se unem paralelamente por meio de pontes de Hidrogênio.

A parede celular forma-se externamente à membrana plasmática. As primeiras camadas formadas constituem a parede primária (PP), onde a deposição das microfibrilas ocorre por intussuscepção, arranjo entrelaçado. Entre as paredes primárias de duas células contíguas está presente a lamela média, ou mediana (LM). Em muitas células a parede primária é a única que permanece. Em outras internamente à parede primária ocorre a deposição de camadas adicionais, que constituem a parede secundária (PS) (KRAUS et al. 2006).

Na parede secundária KRAUS et al. (2006) descrevem que as microfibrilas são depositadas por deposição, em arranjo ordenado (Figura 1-A). A primeira, a segunda e terceira camadas da parede secundárias são designadas S1, S2 e S3, respectivamente, sendo delimitadas pela mudança de orientação da deposição, que varia nas diferentes camadas. A última camada S3 pode faltar. Durante a deposição da parede secundária inicia-se a lignificação (Figura 1-B).

A parede primária geralmente é depositada de forma homogênea, mas pode apresentar regiões mais espessadas do que outras, como ocorre nas células do colênquima. A parede secundária por sua vez, pode ser descontínua, como verificado nos elementos traqueais, sendo depositada em forma de anel, espiral, escada e rede. As paredes diferem em espessura, composição e propriedades físicas nas diferentes células. A união de duas células adjacentes é efetuada através da lamela mediana, que frequentemente se apresenta delgada e tem natureza péctica (KRAUS et al. 2006).

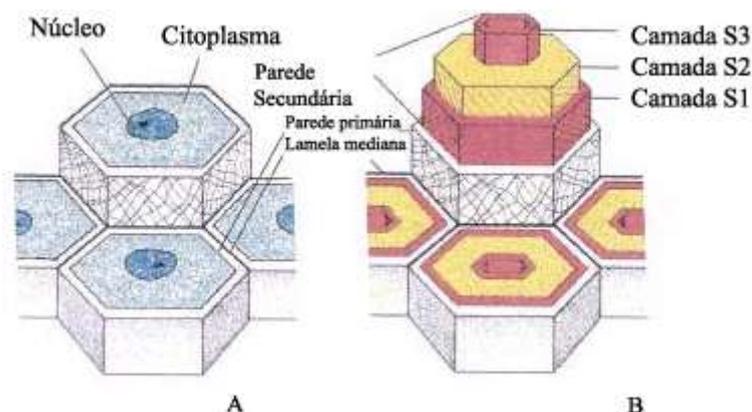


Figura 1 – Parede celular. Parede primária com arranjo de microfibrilas (A). Paredes primária e secundária, com arranjo ordenado de microfibrilas, nas camadas da parede secundária (B). Foto de Raven et al. (1999), modificada por Kraus et al. (2006).

A formação da parede celular inicia-se pelo aparecimento da placa celular na telófase da divisão da célula-mãe. Nesta os microtúbulos estão dispostos periféricamente. Entretanto, antes da prófase, ocorre o aparecimento da banda da préprofase, formada por microtúbulos na região equatorial da célula-mãe. À medida que a placa celular aumenta de tamanho no sentido radial, os microtúbulos e as vesículas restantes são encontradas apenas periféricamente, indicando que os microtúbulos do fragmoplastos atuam no direcionamento das vesículas. Durante esse processo, as vesículas coalescem, liberados as substâncias constituintes da placa celular.

Quanto a origem KRAUS et al. (2006) explicam que a partir da união dos revestimentos das vesículas, que é de natureza lipoproteica, origina-se a membrana plasmática de cada futura células-filhas. Sequentemente, há deposição de novos polissacarídeos de parede, dando origem às paredes primárias nas duas células-filhas junto à placa celular. O material derivado da placa celular torna-se a lamela mediana da nova parede. A lamela mediana estabelece-se entre as duas paredes primárias recém-formadas das células-filhas. Durante o crescimento das células-filhas, a parede da célula-mãe é eliminada e as novas microfibrilas de celulose são orientadas pelos microtúbulos, dispostos perpendicularmente na direção do alongamento celular. No caso de essas células formarem parede secundária, esta aparecerá posteriormente e internamente à parede primária (Figura 2).

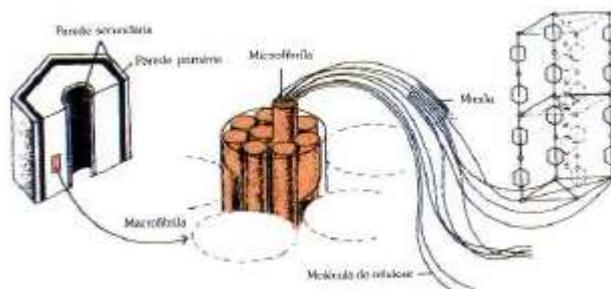


Figura 2 – Estrutura da parede celular, com detalhes das microfibrilas e micelas, e arranjo ordenado das micelas. Foto de Raven et al. (1999), modificada por Kraus et al. (2006).

A espessura da parede secundária varia consideravelmente entre as espécies e entre diferentes células. Esta parede é normalmente mais espessa nos elementos celulares cujas as funções são mecânicas e de condução, do que nos que exercem função de armazenamento (BURGER e RICHTER, 1991). Assim a parede celular está altamente relacionada, as características tecnológicas das madeiras, tais como: stress de crescimento; largura dos anéis de crescimento; proporção de lenho inicial e tardio; massa específica; bem como com a contração e inchamento.

O diâmetro do lume, a espessura da parede celular nas fibras, são medidas em micrômetros (μm) – (1×10^{-6}). Em função da espessura das paredes, as fibras são classificadas em: fibras de paredes delgadas – lume no mínimo três ou mais vezes mais largo que o dobro da espessura da parede; fibras de paredes delgadas a espessas - lume no máximo três vezes o dobro da espessura da parede, mas distintamente perceptível; e fibras muito espessas – lume quase totalmente imperceptível (CORADIN e MUÑIZ, 1992).

2.4.1.2 – Elementos de vasos

Os elementos de vasos são um tipo de elemento traqueal, que se diferem dos traqueídes – imperfuradas, presentes nas gimnospermas primitivas – por serem dotados de placas de perfuração. Os elementos de vaso são característicos das angiospermas e das ordens mais evoluídas de gimnospermas. Ocorrem em fileiras longitudinais e se comunicam através das placas de perfuração, constituindo os vasos (Figura 3). Tanto as traqueídes como os elementos de vaso, no curso de sua diferenciação, perdem seus protoplastos, tornando-se aptos para o transporte da água e dos sais minerais. Nos elementos de vaso, a parede terminal de cada extremidade sofre um processo de dissolução, originando a placa de perfuração. A

dissolução da parede terminal pode ser total, dando origem à placa de perfuração simples, ou parcial, constituindo as placas de perfuração foraminada, reticulada, escalariforme, mista e radiada (COSTA et al. 2006).

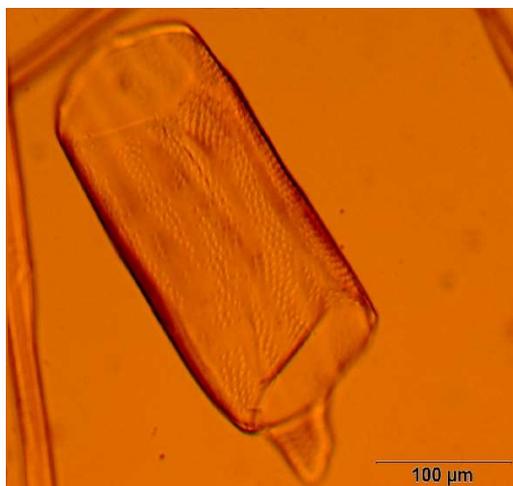


Figura 3 – Elemento de vaso – 10x.

O comprimento de elementos de vasos é mensurado em material macerado, pelo comprimento total de cada elemento vascular, em micrômetros (μm). Mencionar os valores máximo, mínimo e médio, bem como o valor do desvio padrão (CORADIN e MUÑIZ, 1992).

Os vasos, devido à sua grande dimensão e às paredes delgadas, são estruturas fracas, e sua abundância, dimensão e distribuição influem na resistência mecânica da madeira. O lenho com porosidade em anel – poros grandes acumulados no início do período vegetativo – é menos resistente a determinados esforços, do que o lenho com porosidade difusa – poros distribuídos uniformemente ao longo do anel de crescimento (BURGER e RICHTER, 1991).

2.4.1.3 – Fibras

As fibras são células de sustentação, responsáveis pela rigidez ou flexibilidade da madeira. Possuem forma alongada e extremidades afiladas, com maior dimensão no sentido longitudinal do tronco da árvore (Figura 4). As paredes das fibras variam em espessura, mas, geralmente, são mais espessas que as paredes das demais células do xilema secundário. As fibras dividem-se em: libriiformes e fibrotraqueóides. As libriiformes possuem pontoações simples; as fibrotraqueóides, pontoações areoladas. Ambas podem apresentar septos transversais de parede celulósica, que as subdividem, sendo então denominadas

libriformes septadas ou fibrotraqueídes septadas. Em uma mesma espécie, podem ser observadas, lado a lado, fibras libriformes e, ou, fibrotraqueóides septadas e não septadas. Os elementos septados retêm seus protoplasmas, são multinucleados e estão relacionados com a reserva de substâncias (COSTA et al. 2006).



Figura 4 – Fibras – 4x.

O comprimento de fibras e a largura das fibras, são medidos em micrômetros (μm). A mensuração do comprimento e da largura é obtida em material macerado, com determinação dos valores máximo, mínimo, com o valor da média e com o desvio padrão. Em função dos comprimentos, as fibras são classificadas em: muito curtas, com comprimento menor ou igual a $900 \mu\text{m}$; curtas, com comprimento de 900 a $1600 \mu\text{m}$; e longas, com comprimento maior ou igual a $1600 \mu\text{m}$ (CORADIN e MUÑIZ, 1992).

As fibras libriformes e fibrotraqueóides são os elementos mais importantes à resistência mecânica do lenho das dicotiledônias. A estreita correlação entre o volume de fibras, massa específica e resistência é um fato experimentalmente comprovado (BURGER e RICHTER, 1991).

2.4.1.4 – Microfibrila e ângulo microfibrilar

O principal constituinte da estrutura da parede celular é a celulose. As moléculas de celulose se unem entre si formando fibras de policristalinos (fibrilas) conhecidas como microfibrila. Que estão embebidas numa massa básica denominada *matriz*, composta principalmente por pectina e hemicelulose, (BURGER e RICHTER 1991; KRAUS et al. 2006).

Burger e Richter (1991) descrevem que no processo de divisão celular, a primeira membrana a ser formada é a lamela média, com função de unir as células umas às outras. Sobre estas posteriormente no interior da célula microfibrilas de celulose, formando uma trama irregular, que constitui a parede primária, dotada de grande elasticidade. Após a formação da parede primária, depositam-se junto à membrana primária microfibrilas de celulose, obedecendo certa orientação, que destaca as três camadas constituintes da parede secundária, as camadas S1, S2 e S3.

Kraus et al. (2006) descrevem a microfibrila de celulose como uma estrutura filamentosa que tem cerca de 10 a 25 nm de diâmetro e comprimento indeterminado. Nas microfibrilas, em certas porções, as moléculas de celulose mostram um arranjo ordenado – estrutura micelar – que é responsável por sua propriedade cristalina.

O ângulo formado pelas microfibrilas com o eixo da fibra é o ângulo fibrilar, e ele é importante pois, se relaciona com o comprimento e com a resistência individual da fibra. Os ângulos fibrilares médios de cada camada são: S1, de 50 a 70°; S2, de 10 a 30°; e S3, de 60 a 90°. A orientação das microfibrilas na camada S2 confere alta resistência à tração à fibra. Enquanto a orientação das camadas S1 e S3 dão resistência a compressão e torsão. A camada S1 pelo fato de ter um alto ângulo fibrilar age como uma cinta na fibra, assim quando a fibra se hidrata e incha a camada S1 tende a restringir a expansão. Porém, no local onde a camada S1 se quebra, ocorre um inchamento característico conhecido por embalonamento (FOELKEL, 1977).

O ângulo de microfibrilas de celulose (MFA) na parede celular é conhecido por ter efeitos importantes sobre a rigidez da madeira e na contração. No entanto a sua influência sobre as características da madeira juvenil não é totalmente compreendida. A influência do MFA na rigidez da madeira é conhecida por ser significativamente maior que a da densidade (HEIN et al. 2013).

A técnica tradicional para obtenção do MFA é com o uso de microscópio com luz polarizada, e com mesa giratória, conforme trabalho de Tienne et al. (2009), em estudo de ângulo das microfibrilas e comprimento de fibras de madeiras de clone de eucalipto, e de estudo de Ribeiro et al. (2011) em ensaio das características das dimensões das fibras e análise do ângulo microfibrilar de *Toona ciliata*. Porém, com

o avanço da utilização de novas tecnologias em análises de material, a difração de raios-X, com base na cristalografia é uma técnica que vem se consolidando como adequada na estimativa do valor do ângulo de microfibrilas de celulose, tal qual como aplicada por Hein et al. (2013) em estudo de estimativa do ângulo microfibrilar em madeira de *Eucalyptus*.

2.4.1.4.a – Cristalografia

WAHLSTROM (1969) descreve que um cristal pode ser definido como um sólido poliédrico limitados por faces planas que exprimem um arranjo interno ordenado de átomos ou moléculas. No estudo da estrutura interna das substâncias pelas técnicas de raios-X, dá-se menos ênfase as faces do cristal.

Considera-se um cristal como um corpo caracterizado por uma extensão de espaço tridimensional mais ou menos rígida de uma unidade característica de estrutura interna. Faz-se distinção entre as substâncias cristalina e as amorfas. Estas últimas apresentam arranjo ao acaso dos átomos ou das moléculas. Um cristal perfeito ou ideal é uma repetição regular nas três dimensões de uma unidade de estrutura denominada cela unitária, que para uma substância cristalina determinada, em condições de pressão e temperatura especificadas, tem sempre o mesmo número e espécies de átomos, em um arranjo característico. Quase todos os cristais são imperfeitos em um ou mais aspectos. A análise de intensidade da reflexão dos raios-X para vários ângulos de incidência sobre as superfícies dos cristais indica a presença comum de uma estrutura em mosaico, na qual os cristais parecem estar construídos com blocos medindo 10^{-5} cm em um lado, aproximadamente (WAHLSTROM, 1969).

Quanto as faces de um cristal WAHLSTROM (1969) diz que, referem-se de maneira conveniente, a linhas ou direções imaginárias que podem ser usadas para descrever a posição de uma face ou de um grupo de faces no espaço. Estas linhas ou direções são denominadas eixos cristalográficos. Todos os cristais distribuem-se naturalmente em seis sistemas, baseados em seis agrupamentos simples, geométricos, dos eixos cristalográficos.

Os eixos são designados por *a*, *b* e *c*. Aos ângulos entre as extremidades positivas de *b* e *c*, *c* e *a*, e *a* e *b* são designados por α , β e γ (alfa, beta e gama), respectivamente (Figura 5) (WAHLSTROM, 1969).

Cristalograficamente, uma forma é uma face ou um grupo de faces possuindo relações iguais para com os eixos cristalográficos. Um cubo é uma forma constituindo em seis faces semelhantes, cada uma delas sendo perpendicular a um eixo de sistema isométrico e paralela aos outros dois. Quando uma ou mais formas estão presentes em um cristal, diz-se que ele é uma combinação. Quando se usam índices para designar as faces individuais, são eles colocados entre parênteses. Assim, (hkl) designam faces individuais. Se os índices estão incluídos em colchetes, assim $[hkl]$, referem-se a uma forma completa e não a uma face individual de uma forma (Figura 5-A) (BLOSS, 1971 e WAHLSTROM, 1969).

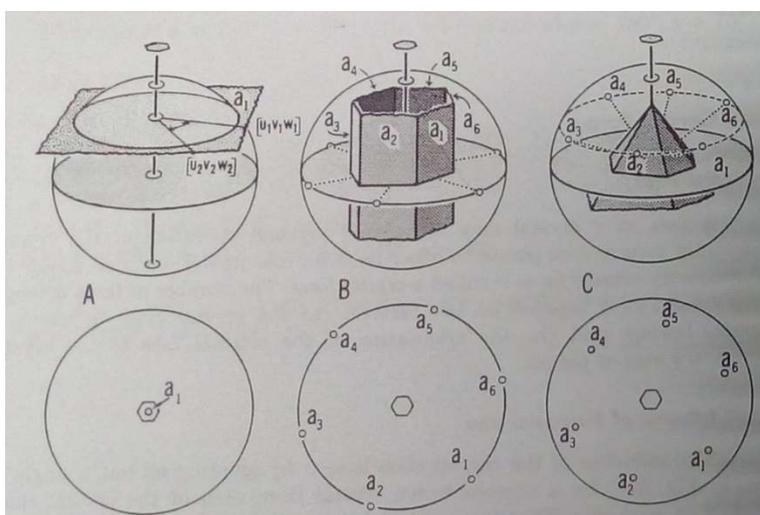


Figura 5 – Projeções de faces, sistemas e formas presentes em cristais: Projeção perpendicular (A); Projeção paralela, sistema hexagonal e forma prisma (B); Projeção estereográfica, sistema hexagonal e forma bipirâmide, com seis faces e com eixos de ângulos aleatórios (C). Foto de BLOSS, 1971.

Na Figura 5.A, se uma face é perpendicular para um eixo de simetria adequada de um plano de simetria, a projeção do eixo ou o plano, na face não vai exigir qualquer face adicional. No entanto, na Figura 5.B, se a face "a1" está em paralelo ao eixo de seis faces, os seis eixos de projeções referem-se a "a1", o eixo adicional "a1... a6" para produzir um prisma. Por definição, uma pirâmide é qualquer forma composta por três ou mais faces não-paralelas, com todas as interseções em um ponto comum. Se as seis faces da Figura 5.C foram substituídos por quatro eixos, as projeções dos quatro eixos em "a1" vão gerar uma pirâmide de quatro faces, como uma das grandes pirâmides do Egito (BLOSS, 1971).

2.4.1.4.b – Difração de raios-X

Para Formoso (1984) os raios-X são radiações eletromagnéticas que, como tais, podem ser polarizadas, difratadas e refletidas. Os raios-X no espectro eletromagnético estende-se de 0,01 nm a 10 nm ($1 \text{ nm} = 10 \text{ \AA} = 10^{-5} \text{ cm}$), na parte dos comprimentos de onda mais curto. Os raios-X são produzidos a partir de bombardeios do ânodo por elétrons do cátodo, acelerados por altas voltagens. A medida que cresce a voltagem, os comprimentos das ondas dos raios-X deslocam-se para valores mais baixos ($\lambda = hc / eV$). O comprimento de onda médio utilizado em difratometria é de cerca de 1 \AA ou 1/6.000 comprimento de onda da luz amarela. Os raios-X usados em difratometria são os raios-X “moles” (comprimento de onda relativamente grandes).

Cada elemento tem seu espectro de emissão característico. Se a diferença de potencial no tubo de raios-X for suficientemente elevada, o espectro emitido foi constituído de uma série de linhas superpostas a um background contínuo. As linhas de emissão são características, aparecem em grupos denominados K, L, M, iniciando em K, pelas de menor comprimento de onda. As radiações mais usadas na difração de raios-X são as $K\alpha$, com comprimento de onda compreendidos entre 0,56 e 2,29 \AA (FORMOSO, 1984).

O princípio é que a difração de raios-X pelos cristais, contidos nos elementos, resulta de um processo em que os raios-X são dispersos pelos átomos sem mudança de comprimento de onda (dispersão coerente ou de Bragg). Um feixe difratado é produzido por dispersão só quando algumas condições geométricas, expressas pela Lei de Bragg, são satisfeitas. A difração resultante de um cristal, compreendendo posições e intensidades das linhas de difração, é uma propriedade física fundamental da substância, servindo não só a identificação como também ao estudo de sua estrutura. Os raios-X como ondas eletromagnéticas são acompanhadas por um campo elétrico em flutuação periódica. Um elétron de um átomo, influenciado pelos raios-X é excitado pelo campo elétrico flutuante, tornando-se uma fonte de ondas eletromagnéticas de mesma frequência e mesmo comprimento de onda que os raios-X incidentes. Assim, o elétron dispersa o feixe incidente. As ondas dispersas pelos diversos elétrons dos átomos combinam-se, daí pode-se dizer que o átomo difrata a radiação X. A intensidade da dispersão é dependente do número de elétrons no átomo, mas como os elétrons são

distribuídos em todo o seu volume, e não em um ponto, a intensidade varia com a direção. A combinação coerente das ondas dispersas é denominada difração. Se um feixe de raios-X atingir um plano de átomos, estes difratam raios-X em duas direções principais. Quando um cristal difrata raios-X, de acordo com a equação de Bragg – $\theta = \text{sen}^{-1}_n (((\lambda/2)*(n/2d_{hkl}))$ ou $n\lambda = 2d*\text{sen}\theta$ – cada feixe difratado constitui uma reflexão. Cada reflexão é atribuída a um conjunto de planos (hkl) e em consequência, a reflexão é designada hkl , Figura 6 (FORMOSO, 1984; GUIMARÃES, 1999; MOORE e REYNOLDS JR, 1989).

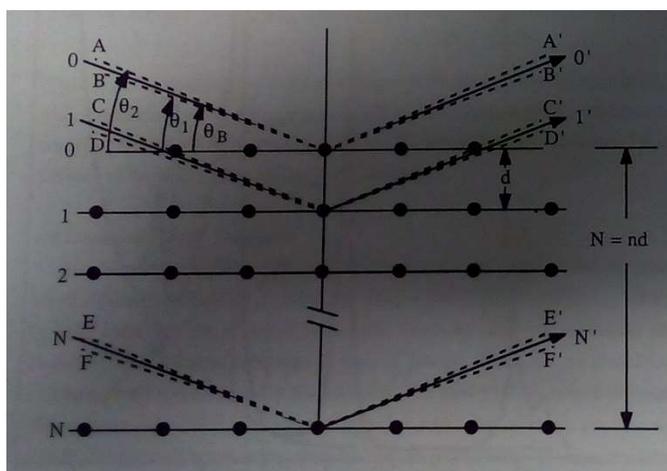


Figura 6 – Geometria da reflexão da Lei de Bragg - $\theta = \text{sen}^{-1}_n (((\lambda/2)*(n/2d_{hkl}))$.
Foto de: Moore e Reynolds Jr (1989).

O princípio do difratômetro de raios-X não é novo. Em um difratômetro a radiação de um comprimento de onda é dispersa por diversos planos de um cristal com diferentes espaçamentos interplanares. O difratômetro caracteriza-se por incluir um medidor de intensidade dos raios difratados a diversos ângulos 2θ (contador Geiger-Müller, contador proporcional ou contador cintilador), associado a um sistema de registro de dados. O arranjo geométrico de um difratômetro é parafocal e tem a finalidade de aumentar a intensidade da radiação difratada. A sua elevada resolução é consequência do uso de tubo com foco linear em conjunção com fendas de Soller, que limitam a divergência dos feixes fora do círculo de focalização do difratômetro, com moderada redução em intensidade. A largura da fenda receptora é dependente da velocidade do goniômetro ($^\circ/\text{min}$), da constante de tempo do circuito (*ratemeter*) do nível de intensidade e da resolução mínima necessária. A fenda de antidispersão serve para melhorar a razão pico/radiação de fundo, excluindo toda radiação que não provenha da amostra. O aperfeiçoamento

em eletrônica resultou em diversas possibilidades no que concerne a detectores e sistemas de leitura (FORMOSO, 1984).

A caracterização mineral, bem como da determinação da estrutura de compostos orgânicos e inorgânicos naturais ou sintetizados, pode ser efetuada com o auxílio da difração de raios-X. O fato de os cristais funcionarem como redes de difração para os raios-X, à semelhança das redes de difração comuns para a radiação ultravioleta e visível (espectrógrafos ópticos), faz com que eles possam ser identificados pela radiação dos raios-X. As substâncias amorfas, com carência de periodicidade de arranjos atômicos (iônicos ou moleculares) já não podem ser caracterizados ou então, em casos especiais o são com grandes dificuldades (FORMOSO, 1984; GUIMARÃES, 1999).

2.4.2 – Propriedades físicas

As propriedades físicas mais empregadas na caracterização da madeira são a densidade, o teor de umidade e as alterações dimensionais promovidas pela perda ou ganho de água, notadamente a retratibilidade e o inchamento. Elas dão conta da ponderação direta dos dois primeiros fatores inerentes à organização estrutural da madeira (BENJAMIN, 2006).

A densidade da madeira é uma característica complexa resultante da combinação de diversos fatores. Existem inúmeros trabalhos mostrando sua relação com as dimensões das fibras, particularmente espessura da parede, volume dos vasos e parênquimas, proporção entre madeira primaveril e outonal, e arranjo dos elementos anatômicos. Este assunto tem sido intensivamente estudado para as coníferas, porém para as folhosas as informações disponíveis se restringem a poucas contribuições. A densidade é um importante fator na determinação das propriedades físicas e mecânicas que caracterizam diferentes espécies de madeiras, diferentes árvores de uma dada espécie e diferentes regiões de uma mesma árvore (FOELKEL et al. 1971).

Na caracterização da madeira, a determinação de sua densidade e principalmente de sua variação dentro da árvore, tanto na direção radial, da medula para a casca, quanto no sentido base-topo, é fundamental como subsídio ao entendimento de sua qualidade. Madeira mais homogênea, no que diz respeito à sua densidade no interior do tronco, sem dúvida nenhuma poderá se comportar melhor nas operações de processamento e refletir maior uniformidade nas demais

propriedades tecnológicas. As peças de madeira com menor variação de densidade são adequadas para utilizações que exigem material homogêneo e com menor variabilidade nas propriedades físico-mecânicas (OLIVEIRA et al. 2005).

Para Moreschi (2014) a densidade é reflexo fiel da quantidade de matéria lenhosa por unidade de volume ou, de forma inversa, do volume de espaços vazios existentes na madeira. O termo massa específica aparente é utilizado quando se calcula a massa específica da madeira pelo relacionamento de sua massa e seu volume aparente, ou seja, do volume que inclui o material lenhoso, extrativos e o ar contido nas células da madeira, ambos em algum teor de umidade específico.

Quanto a relação da massa específica com as propriedades tecnológicas, Burger e Richter (1991) ponderam que, ela reflete a composição química e o volume da matéria lenhosa por peso, e é talvez a característica tecnológica mais importante da madeira, pois dela dependem estreitamente outras propriedades, tais como a resistência, o grau de instabilidade dimensional pela desorção ou absorção de água, entre outros.

Kokutse et al. (2004) estudando a proporção e qualidade do cerne de *Tectona grandis* L. f., em Togo, constataram que a densidade média, com teor de umidade de 12%, é de 0,7 g/cm³, que a densidade correlacionou-se significativamente com a idade da árvore e com o diâmetro à altura do peito. Na madeira juvenil a densidade foi altamente variável, com tendência a aumentar antes de estabilizar-se com a idade. Concluindo ainda que o módulo de elasticidade em madeira adulta foi significativamente maior do que em madeira juvenil. Consideraram ainda que mais estudos sobre a influência de desbastes na densidade deverão ser realizados, bem como acompanhar se a durabilidade evolui com a idade da árvore e se as diferenças ocorrem dependendo do local de plantação.

Quanto a variação dimensional da madeira Moreschi (2014), descreve que a maior alteração dimensional da madeira se manifesta no seu sentido anatômico tangencial, depois no sentido radial e, finalmente, no sentido longitudinal. Este último sentido anatômico, por ter alteração dimensional muito baixa, normalmente é negligenciado para fins práticos. E descreve ainda que a madeira incha e contrai desigualmente, segundo os sentidos anatômicos tangencial, radial e longitudinal. E que este fenômeno é denominado de anisotropia dimensional, o qual pode ser

discriminado em: anisotropia dimensional de contração (Ac) e anisotropia dimensional de inchamento (Ai). Assim as tensões de natureza anisotrópica devem tender a 1, ou seja, a se anularem nas direções em que a retração ou inchamento atuam, resultando em um material com menos propensão a defeitos, como empenamentos e fendilhamentos.

Kokutse et al. (2010) consideram que a estabilidade dimensional, juntamente com a durabilidade natural e a cor da madeira, são umas das mais importantes características de *Tectona grandis* usada como madeira. No entanto, a determinação dessas características é muito demorada. Para efeitos de seleção para a produção de variedades melhoradas, o número de amostras a ser medida rapidamente excede a capacidade de um laboratório tradicional. A espectroscopia por infravermelho, com base em um conjunto de dados de referência, é uma ferramenta que permite a estimação de muitas das propriedades da madeira com redução do número de medições e do tempo de análise em laboratório. A questão então é de verificação da eficácia da ferramenta de espectroscopia por infravermelho próximo (NIR) para construir modelos e prever o ponto de saturação de retratibilidade e de fibras de madeira de *Tectona grandis* do Togo. Os resultados de seus estudos mostraram que é possível utilização do NIR para medir a estabilidade dimensional da madeira *Tectona grandis* e que é apropriado escolher o tipo de madeira e tipo de superfície a ser medida pelo NIR. Os melhores modelos de previsão para retratibilidade radial e tangencial e ponto de saturação de fibra dar valores de R² de 0,72, 0,83 e 0,87, respectivamente com relação ao desvio padrão de desempenho (RPD) de 1,8, 2,4 e 2,8. Consequentemente, após a verificação de outros conjuntos de amostras, que podem ou não podem ser incluídas no modelo de previsão, NIR podem ser usadas para prever a saturação de encolhimento e fibra de teca aponte valores com exatidão para muitas amostras, tornando-se possível incluir estas características nos critérios de seleção para a classificação de fenotipagem de madeira e alta taxa de transferência.

2.4.3 – Propriedades químicas

A madeira é um material orgânico e os seus componentes químicos estão diretamente relacionados com as suas propriedades tecnológicas.

Muitas substâncias, orgânicas e inorgânicas, são encontradas nas paredes celulares em quantidades variáveis, dependendo do tipo de parede. Entre as

Substâncias orgânicas destacam-se a lignina, proteínas e lipídios. Substâncias lipídicas como suberina, cutina e ceras tornam a parede celular impermeável à água. Dentre as substâncias inorgânicas podem ser citadas a sílica e os cristais (KRAUS et al. 2006).

KLOCK et al. (2005) explica que os extrativos pertencem a uma grande gama de compostos químicos, embora, representem apenas uma pequena parte da madeira. Os extrativos de uma amostra de madeira podem ser isolados com o propósito de um exame detalhado da estrutura e composição de um ou mais dos seus componentes. Em geral, em análise da madeira, somente a quantidade é determinada após o isolamento. Por esse método, madeira livre de extrativos é obtida, como material para isolamento e análise dos componentes macromoleculares das paredes celulares.

Quanto ao isolamento dos extrativos KLOCK et al. (2005) descreve que é realizado por extração com solventes neutros e ou misturas destes, em sucessão. De acordo com as diferentes solubilidades dos extrativos, muitos esquemas de sequências podem ser realizados. As extrações com solventes podem ser realizadas com diferentes solventes, tais como: éter, acetona, benzeno (tolueno), etanol, diclorometano, ou misturas destes. Ácidos graxos, ácidos resinosos, ceras, taninos e pigmentos coloridos são as substâncias mais importantes extraíveis por solventes.

A lignina é um complexo polímero fenólico e um dos constituintes da parede celular dos vegetais, juntamente com os carboidratos estruturais celulose e hemicelulose. É formado pela união covalente de vários monômeros fenólicos. Estas ligações são do tipo éter (C-C e C-O), resultantes a vários agentes hidrolíticos, inclusive a vários sistemas enzimáticos. Os compostos fenólicos que constituem os blocos construtivos da lignina são núcleos guaiacílico, siringílico e p-coumarílico. A distribuição e proporção desses monômeros obedece a origem filogenética de cada vegetal. Sendo que as madeiras duras – angiospermas – possuem núcleos guaiacílicos e siringílicos na lignina. Enquanto que as madeiras moles – gimnospermas – são quase que exclusivamente formados por núcleos guaiacílicos. Por outro lado, as gramíneas possuem uma certa quantidade de unidades de p-coumarílicos. Os núcleos siringílicos são mais susceptíveis ao ataque do ácido sulfúrico, na hidrólise ácida. As ligninas guaiacílicas são mais

hidrolisadas pelo H_2SO_4 , que as ligninas siringílicas (FUKUSHIMA e HATFIELD, 2003).

A celulose ($C_6H_{10}O_5$) é o componente orgânico majoritário, perfazendo aproximadamente a metade das madeiras tanto de coníferas, como de folhosas. Caracteriza-se como um polímero linear de alto peso molecular, 162, constituído exclusivamente de β -D-glucose. Devido as suas propriedades físicas e químicas, bem como a sua estrutura supramolecular, preenche sua função como o principal componente da parede celular dos vegetais. Localizado principalmente na parede secundária (KRAUS et al. 2006; KLOCK et al. 2005).

As hemiceluloses (polioses) estão em estreita ligação com a celulose na parede celular. Os principais constituintes das polioses são cinco açúcares neutros: as hexoses: glucose, manose e galactose; e as pentoses: xilose e arabinose. Algumas polioses contêm adicionalmente ácidos urônicos. As cadeias moleculares são muito mais curtas que a de celulose, podendo existir grupos laterais e ramificações em alguns casos. As folhosas, de maneira geral contém maior teor de polioses que as coníferas, e a composição é diferenciada (KLOCK et al. 2005).

As cinzas são todos os resíduos resultantes da queimada ou incineração de uma amostra. Consiste principalmente de compostos inorgânicos. Klock et al. (2005) descrevem que vários constituintes minerais são necessários para o crescimento das plantas. Tais constituintes são retirados do solo e são encontrados na madeira, sendo que a composição do material encontrado na madeira depende das condições ambientais sob as quais as árvores crescem e da localização do mineral na planta. Os constituintes minerais compreendem principalmente potássio e cálcio, que constituem até 50% dos cátions na cinza da madeira, que também são encontradas magnésio, sódio, fósforo e cloro, assim como, sílica, no caso de florestas tropicais. Os ânions mais comuns são os carbonatos, fosfatos, silicatos e sulfatos.

Peréz (2012) em caracterização tecnológica de madeira jovem de *Tectona grandis*, obteve valores médios para lignina na madeira, considerados altos. Para extrativos, que são relacionados com a durabilidade natural da madeira, com ações antifúngica, bactericida e repelente a insetos, o autor constatou-se que o valor obtido é similar a valores de outros estudos, com árvores de plantios com maiores idades, entre 29 e 70.

Leonardo et al. (2015), em estudo de compostos químicos em *Tectona grandis*, consideram que, apesar dos usos já consagrados para essa madeira, 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 da teca e de outras espécies, permite relacionar múltiplas áreas da ciência para o desenvolvimento e aplicação de tecnologias provenientes de fontes renováveis, pela utilização de insumos químicos, como os quinônicos, que despontam como uma alternativa importante para as áreas de preservação natural, corantes naturais, farmacologia e cosmetologia. Teca biossintetiza o lapachol e tectocquinona, entre outros fitoquímicos secundários. Nidavani e Mahalakshmi (2014) descrevem que essas quinonas são encontradas nas folhas e no cerne de *Tectona grandis*.

Lacret et al. (2012) relataram que um estudo com extração de fitoquímicos, bioativos naturais em *Tectona grandis* levou ao isolamento de dois novos compostos neolignanas, tectonoelin A e tectonoelin B. Esses compostos químicos juntamente com outros alcaloides, conferem cor a madeira de *Tectona grandis* e estão relacionados com o seu mecanismo de defesa, alelopatia e herbivoria.

2.4.4 – Propriedades mecânicas

Naranjo et al. (2012), em avaliação genética precoce, da morfologia e algumas propriedades da madeira de clones de *Tectona grandis*, com idade de 4 anos, chegaram a resultados em que a avaliação da herdabilidade e do controle genético da madeira para as propriedades tecnológicas é limitado, quando é avaliado no estágio juvenil. No entanto dois parâmetros morfológicos, o DAP, a altura, e duas propriedades tecnológicas, a retratibilidade radial e o módulo de elasticidade dinâmico correlacionaram-se com a herdabilidade ou valores de controle genético precoce e podem ser introduzidos em programa de melhoramento genético.

Valero et al. (2005), em estudo das propriedades mecânicas em madeira de *Tectona grandis*, com 20 anos de idade, plantada na Venezuela, obtiveram resultados em que as resistências à compressão paralela à fibra apresentam valores considerados de médios a muito baixo, possui alta resistência a compressão perpendicular à fibra, resistência média a dureza nas superfícies longitudinais e baixa resistência nas superfícies transversais, e baixa resistência ao

cisalhamento. Porém, consideram a madeira de *Tectona grandis* como muito promissora, podendo ser usada na carpintaria em geral, como elementos torneados e como vigas e vigotas, sob forma estruturais, entre outros usos.

Lima et al. (2011b), em estudo das propriedades mecânicas e da densidade aparente da madeira de *Tectona grandis*, em função do espaçamento (3 x 1,5 m, 3 x 2 m e 3 x 2,5 m) e da posição radial na tora, chegaram a resultados em que o espaçamento entre as árvores com 32 anos, não influenciou na resistência e na compressão paralela às fibras, resistência ao cisalhamento, no módulo de resistência a flexão estática, no módulo de elasticidade na flexão estática e na densidade aparente, de madeira isenta de defeitos. Então, espaçamentos maiores podem produzir um maior volume de madeira por unidade de área, sem prejuízo para as propriedades mecânicas e para a densidade aparente. Constataram também que ocorre uma tendência de aumento no sentido medula-casca, para resistência a compressão paralela as fibras, resistência ao cisalhamento, módulo de resistência a flexão estática, módulo de elasticidade na flexão estática e densidade aparente. As propriedades mecânicas e a densidade aparente estudadas apresentam uma tendência de estabilização a partir da posição intermediária do raio da tora.

2.4.5 – Classes de resistência da madeira

Para Sales e Lahr (1996), em proposição de classe de resistência para madeiras nativas e cultivadas no Brasil, consideram que de maneira geral, os sistemas de classe de resistência independem dos métodos utilizados para a classificação da madeira, pois, possuem o objetivo de facilitar a especificação do material na fase de concepção de projetos estruturais, enquanto os métodos de classificação visual e mecânica são utilizados com o intuito de selecionar e homogeneizar lotes de madeira com características específicas visando o adequado aproveitamento do material para fins estruturais. Assim a utilização das classes de resistência permite orientar a escolha do material, de tal modo que um projeto poderá utilizar na construção a madeira disponível na região, desde que os valores das propriedades físicas e mecânicas dos lotes se enquadrem na classe definida no projeto técnico.

Sales (2000) contextualiza que a maneira de especificar o material na concepção do projeto estrutural, em muitos casos contribui para tornar a madeira

menos competitiva frente a outros materiais como o aço e o concreto. Em geral o projetista possui dificuldade no conhecimento das espécies disponíveis no local de aplicação do projeto optando pela especificação de espécies de uso tradicional, as quais podem apresentar elevados custos de aquisição, devido a distância da região de extração. Além disso ainda há dúvida quanto a verificação da espécie botânica dos lotes a serem adquiridos, possibilitando a ocorrência de erros que podem afetar o desempenho da estrutura de madeira. Assim o uso das classes de resistência para madeiras nativas e cultivadas representa uma importante contribuição, favorecendo a utilização da madeira como material estrutural, tornando-a competitiva em relação ao aço e ao concreto.

2.5 – TÉCNICAS DE ANÁLISES

2.5.1 – Técnicas destrutivas ou convencionais

Tradicionalmente, a caracterização das propriedades da madeira é feita por meio da avaliação destrutiva de corpos de prova amostrados e especificamente preparados para esse fim. Essa prática pode introduzir variabilidade adicional nos resultados em função de fatores como amostragem inadequada ou problemas na confecção do corpo de prova (CUNHA e MATOS, 2010).

Nos ensaios destrutivos convencionais há alteração de forma permanente nas propriedades do material ensaiado. São utilizados equipamentos como a máquina universal de ensaio, para determinar as propriedades mecânicas rigidez e resistência à flexão estática entre outras, avaliadas, respectivamente, pelo módulo de elasticidade (MOE) e pelo módulo de ruptura (MOR). Com deformação permanente das amostras.

2.5.2 – Técnicas não-destrutivas

Na avaliação não destrutiva há emprego de uma ou várias técnicas para análise das propriedades tecnológicas das madeiras – química, física ou mecânica – sem comprometer a sua utilização futura.

As técnicas não destrutivas (NDT) são ferramentas utilizadas na caracterização da madeira e na avaliação da durabilidade, apresentam vantagens em relação aos métodos convencionais para a caracterização da madeira, pois, é possível avaliar uma peça sem ter que extrair dela corpos de prova. Um grande

volume pode ser analisado com maior rapidez e precisão, e se torna versátil para se enquadrar numa rotina de linha de produção. Dentre as técnicas enquadram-se a avaliação visual (colorimétrica), testes químicos (infravermelho próximo), técnicas de emissão acústica, vibração (ondas de tensão), emissão ultrassônica, raio-x entre outras (RIBEIRO, 2009).

A utilização de técnicas não destrutivas possibilita a manutenção do material pesquisado ou a coleta de quantitativo reduzido de amostras para obtenção das informações necessárias ao uso comercial de uma espécie (ZERBINI, 2008).

As vantagens dos métodos não destrutivos sobre os métodos tradicionais são significativas, destacando-se: A possibilidade de utilização posterior da peça testada; a rapidez de aplicação do método; a confiabilidade dos valores obtidos; redução das perdas de material; Classificação de peças em classes de qualidade e resistência; detecção de defeitos internos antes do beneficiamento, além das vantagens financeiras proporcionadas pelo conjunto de vantagens citadas (SHIMOYAMA, 2005).

Apesar das limitações existentes, pode-se listar alguns sucessos na pesquisa e desenvolvimento de equipamentos industriais para a realização de análises não destrutivas (AND) sobre madeira. Os métodos e princípios aplicados estão relacionados a natureza, geométrica e localização na cadeia produtiva em que se encontram os materiais a serem testados. Por exemplo, a avaliação de vigas de madeiras já em uso numa construção não poderia ser realizada com um método que se baseie em testes de flexão, o que ainda não seria possível antes de sua instalação (ABRAHÃO, 2005).

Por fim Benjamim (2006) descreve que as avançadas técnicas de avaliação da qualidade da madeira como, por exemplo, a densitometria (por raios-X ou raios-gama), a análise digital de imagens microscópicas e os métodos não-destrutivos de inferência do desempenho mecânico da madeira se constituem em importantes ferramentas auxiliares numa mais detalhada caracterização do material, visando sua utilização como madeira serrada.

2.5.2.1 – Técnica de espectrometria no infravermelho próximo

Baillères e Durand (2000) descrevem que as bandas em espectros de infravermelho de madeira surgem de vibrações de ligações químicas nos componentes. As intensidades de banda dependem sobre a mudança do momento

de dipolo das ligações durante a vibração e assim, as polaridades das bandas. Consequentemente, mudanças de banda refletem íntimo alterações na química do bosque. O espectro infravermelho próximo contém informações sobre os componentes principais dos compostos biológicos. Os grupos funcionais que correspondem a radiação NIR são CH, OH e NH, que representam a espinha dorsal da todos os compostos biológicos. Espectros que ocorrem na região NIR consistem em bandas e combinação das vibrações fundamentais, alongamentos de grupos funcionais observados na região do infravermelho média. Em madeira, devido ao grau de complexidade de sobreposição e banda dos espectros NIR é quase impossível interpretar os dados sem a ajuda de um computador, pela capacidade de lidar com os dados de absorbância de muitos comprimentos de onda, juntamente com métodos estatísticos multivariados, que permitem a interpretação dos espectros. Geralmente o componente ou a propriedade de interesse é medida pelos métodos convencionais ou mesmo métodos padrão e está relacionada com os dados das absorbâncias, das bandas por um modelo estatístico, envolvendo análise de regressão. Isto implica a calibração do sistema antes de sua utilização.

A espectroscopia no infravermelho próximo é uma técnica analítica que consiste basicamente em incidir sobre um material biológico, seja em um pedaço de madeira, uma folha seca ou até mesmo um inseto, um raio de luz em comprimentos de onda na região do infravermelho próximo (2500 a 750 nm), medindo-se depois a quantidade de luz absorvida pelo material. Esta técnica produz um espectro, ou seja, um conjunto de valores de absorbância em diferentes números de onda da região espectral utilizada. Os valores de absorbância refletem as características químicas e estruturais do material, sendo que praticamente qualquer tipo de material, biológico ou não, em qualquer fase física da matéria, pode ser caracterizado na sua resposta espectral (CURTY, 2013).

A espectroscopia no infravermelho mede a absorção de radiação infravermelha pelas ligações químicas de um material. A radiação infravermelha é uma radiação não ionizante na porção invisível do espectro eletromagnético, a qual se estende, em comprimento de onda, de aproximadamente 12.800 cm^{-1} até quase 10 cm^{-1} . Em razão da amplitude, convencionalmente, a região espectral do infravermelho (STANGERLIN, 2012).

As radiações eletromagnéticas na faixa do NIR apresentam pequena absorção pelo material lignocelulósico, permitindo o uso de amostras com quase nenhuma preparação prévia. O método consiste em associar espectros de NIR com as propriedades da madeira determinadas convencionalmente. Desenvolve-se, então, uma curva de calibração usando estatística multivariada (MAGALHÃES et al. 2005). Na calibração a análise de componentes principais fornece informações necessárias para identificar as variáveis mais importantes no espaço das componentes principais. As variáveis que são os chamados de fatores correspondem ao número de componentes principais necessários para descrever o conjunto de dados na regressão dos mínimos quadrados parciais (GOUVÊA et al. 2011).

Embora seja evidente que os espectros NIR contêm informações sobre o produto químico, composição de madeira, é muito menos óbvio que estes mesmos espectros contenham informações sobre as propriedades de resistência da madeira sólida. Também é sabido que as propriedades de resistência da madeira estão relacionadas com a densidade, ângulo microfibrila e inclinação da grã da madeira. Mas, não é intuitivo que os espectros NIR da madeira sólida contenham informações sobre essas propriedades da madeira (STEPHEN et al. 2004).

As propriedades densidade, retratibilidade volumétrica, MOE e MOR podem ser previstas com a utilização do NIRS para madeira de *Pinus caribea* Var. *hondurensis* e *Eucalyptus grandis* (RIBEIRO, 2009).

2.5.2.2 – Colorimetria

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. Esta pode ser alterada com o teor de umidade, com a temperatura, por degradações provocadas pelo ataque de organismos xilófagos ou, ainda, por reações fotoquímicas dos elementos químicos presentes na sua estrutura. Ao se observar uma madeira, a primeira impressão vem do seu aspecto visual, proveniente, basicamente, da sua cor e desenho, por isso é comum a indicação ou o uso em larga escala de uma determinada espécie, levando-se em conta somente estes parâmetros. Através destas características, é possível, também, obter a valorização de espécies pouco conhecidas, fazendo analogias com outras espécies já tradicionais, o que induz as pessoas a usarem termos de

referência como: “padrão mogno”, “padrão cerejeira”, “padrão sucupira”, entre outros (CAMARGOS e GONÇALEZ, 2001).

Billmeyer e Satzman (1981) descrevem a cor de um material é a sensação oriunda do percentual de luz, na região visível do espectro, incidente sobre a retina (olho humano). A região do visível é considerada como sendo o intervalo do espectro eletromagnético que compreende os comprimentos de onda de luz entre 400 a 700 nm.

Para que exista a cor, é necessária a presença de três variáveis importantes: da fonte luminosa, do objeto e do observador. A atribuição de uma determinada cor, apenas, pela análise visual de um objeto é subjetiva, visto que a mesma pode diferenciar de acordo com o observador e a fonte de luminosidade. Para contornar essa subjetividade foram desenvolvidos métodos comparativos e quantitativos de medição de cores (STANGERLIN, 2012).

O padrão de coloração de uma madeira pode variar em tonalidades que vão desde o bege claro até o marrom escuro, quase preto. Dentro dessa variação existem madeiras amareladas, avermelhadas, arroxeadas e alaranjadas, (MORI et al. 2005).

A colorimetria é o ramo da ciência (física ótica e geométrica) que tem por objetivo a medição de cores (STANGERLIN, 2012). E as cores são medidas principalmente pelos instrumentos colorímetros e espectrofotômetros. Os colorímetros são instrumentos utilizados medir cores e funcionam com três a quatro filtros de banda larga que correspondem aos filtros tristímulos (Xa e Xb – vermelho; Y – amarelo/verde; Z – azul) e empregam o iluminante C (média da luz do dia) como fonte luminosa normalizada. Os valores das medidas tricromáticas (X, Y e Z) são obtidos diretamente e expressos em diferentes sistemas colorimétricos (GONÇALEZ, 1993).

Ribeiro (2009) em estudo de caracterização e qualificação de madeira de *Pinus caribea* Var. *hondurensis* e *Eucalyptus grandis*, concluiu que a colorimetria quantitativa, sistema CIELab 1976, é uma técnica precisa e adequada na mensuração da cor.

O método CIELab é suficiente para perceber diferenças entre as diversas cores (ou tom de cores) obtidos através dos tratamentos térmicos. Além disso, o método mostrou-se capaz de separar as coníferas das folhosas, já que os

parâmetros a^* e b^* tenderam a decrescer nas folhosas e assumiram comportamento oposto nas coníferas. Sendo que a análise multivariada de dados permitiu classificar as cores de todas as amostras utilizadas no experimento com relativa facilidade e exatidão, a partir de parâmetros de obtenção rápida (L^* , a^* e b^*) foi possível encontrar no dendrograma gerado, os quatorze grupos identificados pelo olho humano (OLIVEIRA, 2009).

Moya e Calvo-Alvarado (2012) estudando a variação dos parâmetros de cor de madeira de *Tectona grandis* e sua relação com fatores ambientais de diversos sítios, ao comparar a madeira alterar o índice de cor (ΔE^*) em cinco clusters, constataram que o cerne madeira produzida a partir de sítios mais secos e férteis tinham cor mais, marrom-amarelada. A matiz b^* (amarelo) do cerne. Que resultou em correlações significativas, com $R > 0,5$, para $\alpha < 0,05$, entre nove ambientes climáticos e oito variáveis edáficas. E então concluíram que as variáveis ambientais devem ser consideradas como as variáveis causais de primeira ordem para explicar a variação da cor de madeira. Portanto, a matiz b^* (amarelo), mais escura da madeira foi associada com climas secos. Além disso, com solos mais profundos e férteis.

Lukmandaru et al. (2009), em caracterização da cor e da química de cerne de madeira de *Tectona grandis* com listras irregulares de cor preta na ilha de Java, concluíram por inferência que o processo de enegrecimento do cerne pode ser um tipo de mecanismo de defesa, indicado pela quantidade do composto bioativo tectoquinone. A cor preta é produto de compostos inorgânicos e extrativos. Na qualificação da cor foram medidas as coordenadas de cor pelo Sistema CIELab. Os resultados mostraram que a parte das listras negras possui valor de luminosidade (L^*) 12 a 15 unidades a menos do que o valor medido no cerne normal. Além disso, a listras tinham mais matiz vermelho (a^*) e menos matiz amarelo (b^*), tonalidade (h^*) e saturação (C) que a madeira normal.

2.6 – ANÁLISES MULTIVARIADAS DE DADOS

As análises multivariadas de dados são referentes a conjuntos de técnicas estatísticas que simultaneamente analisam múltiplas medidas. Assim Hair et al. (2009) descrevem que qualquer análise simultânea com mais de duas avariáveis

pode ser considerada, a princípio, como multivariada, sendo que muitas técnicas multivariadas são extensão da análise univariada – análises e distribuição de uma única variável – e da análise bivariada – classificação cruzada, análise de variância, correlação e regressões lineares usadas para analisar duas variáveis. Algumas técnicas multivariadas – regressão múltiplas e análise multivariada de variância – fornecem meios de executar simultaneamente em uma única análise aquilo que antes exigiria várias análises univariadas, embora outras técnicas multivariadas são exclusivamente planejadas para tratar com aspectos multivariados, como a análise fatorial, que identifica uma estrutura inerente a um conjunto de variáveis, ou a análise discriminante, que faz distinção entre grupos, baseada em um conjunto de variáveis.

Hair et al. (2009) classificam as técnicas multivariadas em três grupos, com base em julgamentos que o pesquisador deve fazer sobre o objetivo da pesquisa e da natureza dos dados: 1º - as variáveis podem ser divididas em classificações independentes e dependentes com base em alguma teoria? 2º - se podem, quantas variáveis são tratadas como dependentes em uma única análise? 3º - como as variáveis, sejam dependentes ou independentes são medidas? A seleção correta da técnica depende das três respostas. Para a primeira questão, as variáveis podem ser divididas em classificação independentes e dependentes com base em alguma teoria?

Hair et al. (2009) explicam que uma técnica de dependência pode ser definida como aquela na qual uma variável ou um conjunto de variáveis é identificada como dependente, isto é, pode ser prevista ou explicada por outras variáveis conhecidas como variáveis independentes. Um exemplo de técnica de dependência é a análise de regressão múltipla. Uma técnica de interdependência é aquela em que nenhuma variável ou grupo de variáveis é definida como sendo dependente ou independente. O procedimento envolve a análise simultânea de todas as variáveis no conjunto. A fatorial é um exemplo de técnica de interdependência.

Gouvêa et al. (2012) consideram que a técnica de dependência versus interdependência de dados é uma dicotomia, pois, no primeiro caso, é possível identificar uma variável ou um conjunto de variáveis como dependente(s) a ser(em) prevista(s) ou explicada(s) por um conjunto de variáveis tidas como independentes.

Já no segundo caso, as variáveis são analisadas simultaneamente, estando todas em um mesmo patamar na relação. São técnicas interdependentes a análise fatorial, a análise de conglomerados, a análise de correspondência e o escalonamento multidimensional.

Técnicas multivariadas:

- Análise de componentes principais – é parte da análise fatorial – criação de novas variáveis derivadas das variáveis originais. Hair et al. (2009) a descreve como uma abordagem estatística que pode ser usada para analisar interrelações entre grande número de variáveis e explicar essas variáveis em termos de suas dimensões inerentes comuns. O objetivo é encontrar um meio de condensar a informação contida em várias variáveis originais em um único conjunto menor de variáveis estatísticas – fatores – com uma perda mínima de informações. Por fornecer uma estimativa empírica da estrutura das variáveis consideradas, a análise fatorial se torna uma base objetiva para criar escalas múltiplas;

- Regressão por mínimos quadrados parciais ou projeção nas estruturas latentes (PLS) - Hair et al. (2009) conceitua os PLS como uma abordagem alternativa de estimação para modelagem de equações estruturais tradicional. Os resultados são representados como compostos, com base em resultados de análise fatorial, sem tentativa de recriar covariâncias entre itens medidos. Para Picó (2016) a PLS representa a melhor solução, tanto para os problemas de números de variáveis como para os de intercorrelações. As estruturas latentes, mais frequentemente chamadas de variáveis latentes (VLs) ou componentes mínimos quadrados parciais, são direções no espaço dos preditores. A primeira variável latente é a direção caracterizada pela covariância máxima com a variável de resposta selecionada. A informação relacionada com a primeira variável latente é ortogonal à primeira, sendo a direção da variância máxima entre os resíduos dos preditores e os resíduos da resposta. Picó (2016) ainda descreve que o número mais apropriado de variáveis latentes é determinado avaliando-se com uma estratégia de validação apropriada, o erro de previsão correspondente a modelos com crescente complexidade. Os parâmetros geralmente considerados são o desvio padrão do erro de calibração, calculado com os objetos utilizados para a construção do modelo, e o desvio padrão do erro de previsão, calculados com objetos não utilizados para a construção do modelo.

- *Two step cluster* (TSC) (agrupamento de duas etapas) – é um método hierárquico em que algoritmos faz a classificação de variáveis. Para Gouvêa et al. (2012) essa técnica é mais apropriada para amostras com uma ou mais variáveis categóricas e é recomendado para grandes bases de dados. Costa (2017) descreve TSC como um instrumento analítico que privilegia as situações nas quais é necessário lidar conceitualmente e metodologicamente com objetos de estudo de configuração complexa (grandes espaços de análise com diferentes indicadores de diferentes tipos de medição). É um conjunto de critérios que analisa dados multivariados em escala nominal e/ou contínua, até atingir a segmentação dos registros em subgrupos homogêneos. É uma ferramenta exploratória projetada para revelar agrupamentos naturais dentro de uma base de dados que de outra maneira não se mostra aparente. E tem o objetivo bem definido que é o reconhecimento de padrões de subperfis coexistentes num espaço de grande complexidade.

Em geral, na regressão por mínimos quadrados parciais o erro de calibração sempre diminui quando o número de variáveis latentes aumenta, porque o ajuste aumenta – em relação a um superajuste. Inversamente, o erro de previsão geralmente diminui até certa complexidade do modelo e, então aumenta. Isso indica que as variáveis latentes posteriormente introduzidas ainda estão trazendo ruídos (PICÓ, 2016).

CAPÍTULO I: RENDIMENTO DE MADEIRA SERRADA DE PROCEDÊNCIAS DE *Tectona grandis* EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS

1 – INTRODUÇÃO

As indústrias de base florestal modernas, sobretudo as empresas que buscam no mercado de capital recursos para investir na produção tem um controle de processamento aperfeiçoado com monitoramento de cada fase produtiva, a fim de corrigir falhas e assim garantir a eficiência econômica e o retorno aos investimentos.

O monitoramento da fase de desdobro, pelo rendimento de madeira serrada é feito pela aferição constante da razão do volume de toras pelo volume de madeira serrada produzidas. Essa relação é influenciada pelos fatores silviculturais e pelo planejamento e operação na indústria, tais como, conicidade, diâmetro, densidade, escala de produção e porte do empreendimento. Como também tem influência das variáveis envolvidas no processo de conversão da madeira, como o tipo de equipamento utilizado.

Souza et al. (2007) descrevem que normalmente o volume de madeira serrada é quantificado pela contagem do número de tábuas, com dimensões conhecidas e calculando o volume final. Os autores apresentam uma alternativa a contagem e cálculo de volume do produto final, que é a utilização de modelos para estimar o rendimento de madeira serrada, utilizando dados de mensuração com as características dendrométrica das toras a serem beneficiadas.

Wade et al. (1992) consideraram que o aumento de rendimento anual para as indústrias de madeira é resultado da adoção de técnicas e equipamentos da evolução tecnológica, no qual o nível da tecnologia em serrarias de madeira dura pode ser melhor determinado pela eficiência de conversão da matéria-prima em madeira serrada. Assim as informações sobre a eficiência na conversão da madeira dura e os fatores que influenciam o rendimento de madeira serrada devem ajudar no desenvolvimento de métodos mais rentáveis, com ressalva de que decisões de gestão silvicultural podem afetar o rendimento.

Quanto as variáveis que afetam o desempenho de econômico de uma serraria Vital (2008) considera que de modo geral a economia de escala não contempla as indústrias de desdobramento de madeiras, pois, os equipamentos desenvolvidos para as operações utilizados por pequenos empreendimentos são os mesmos usados pelos grandes, que ficam com a difícil tarefa de adequar os equipamentos disponíveis à maior escala de produção, o que demanda por mão de obra qualificada para operar as máquinas. Vital (2008) ao apresentar trabalho de Brand et al. (2002), que comparam a geração de resíduos em serrarias que desdobram coníferas no Brasil e nos Estados Unidos, pondera que a influência dos equipamentos de corte, como a espessura dos dentes das serras de produção de serragem não tem diferença marcante, pois, as duas empregam serras fita no desdobro. Porém para as variáveis treinamento de operários e qualidade da matéria-prima, a quantidade de resíduos gerados no Brasil chega próximo ao dobro da produzida nos EUA.

Batista et al. (2013) ao estudarem o desempenho de uma serraria, consideram que ao atuarem em um mercado cada vez mais competitivo e complexo, os gestores das indústrias madeireiras necessitam de ferramentas e métodos que resultem em soluções satisfatórias e de baixo custo, que auxiliem na tomada de decisões.

Budiaman e Komalasari (2012), estudando colheita de teca na Indonésia descrevem que para a produção de matéria-prima de qualidade e com baixa produção de resíduos, deve-se levar em consideração, a instrução e o treinamento relativos à técnica de abate, a técnica de desdobro de madeira serrada, bem como o conhecimento na escolha e manuseio apropriado dos equipamentos utilizados no desdobro é fundamental para melhorar a habilidade dos operários florestais.

Ayarkwa e Addae-Mensah (1999) avaliaram o processamento de toras de *Tectona grandis*, com pequenos diâmetros, em Ghana, e concluíram que diâmetros de toras maiores que 30 cm geram maiores quantidades de madeira serrada em comparação com o diâmetro com toras com diâmetro menores que 30 cm. O estudo também mostrou que as toras curtas resultam em maiores rendimentos de madeira serrada.

Thulasidas e Bhat (2009) estudaram o rendimento de madeira serrada de teca, em Kerala, Índia, produzidas em sistemas agroflorestais comunitários, de

pequena escala e em floresta comercial, constataram que as florestas comunitárias e úmidas produziram árvores com diâmetro médio de 39,6 cm, que são compatíveis as árvores de melhor qualidade na Índia. Em contrapartida, a média de DAP para teca de floresta comunitária, cultivada em local seco foi de 24 cm. Para esse material a porcentagem de rendimento da madeira serrada foi menor para o local seco (66,8%), enquanto não houve diferença significativa entre os sítios de plantações comunitárias e úmida e de florestal comercial, com taxas de rendimento entre 76,5% e 78,8%, respectivamente. Concluíram que não há diferença na relação do cerne-alburno da teca de plantações comunitárias com as de florestas comerciais. A falta de práticas silviculturais apropriadas na silvicultura das florestas comunitárias resultou na produção de peças com defeitos, afetando negativamente o preço da madeira no mercado.

Assim este capítulo tem por objetivo analisar o volume de madeira serrada e compará-lo com o volume da madeira das seções de toras e com o volume de madeira do fuste das árvores de cada procedência, para determinar o rendimento de madeira serrada. Os resultados dos rendimentos de madeira serrada são subsídios para a gestão da empresa florestal, na aferição da eficiência técnica e da eficiência financeira do empreendimento.

2 – MATERIAL E MÉTODOS

2.1 – GENÓTIPOS E ÁREA DE ESTUDO

Foram avaliadas procedências de árvores de *Tectona grandis*, sendo: cinco materiais clonais, MT-00, MT-01, MT-02, MT-08 e MT-80, procedentes das Ilhas Salomão, Malásia; e um material seminal, MT-SE, com origem em Cáceres/MT/BR. As mudas foram produzidas pela empresa Bioteca, empresa do Grupo TRC Agroflorestal Ltda.

A madeira das procedências foram todas produzidas em fazenda do grupo TRC, localizada no Município de Barra do Bugres, oeste do Estado de Mato Grosso. A coordenada geográfica de referência é S - 14° 54' 29,8" e W - 57° 58' 24,8", com altitudes entre 227 e 250 m, e temperatura média de anual de 24 °C, e precipitação média anual de 1370 mm. Cada área possui plantio puro, plantadas por mudas, em

janeiro de 2006 e colhidas em setembro 2015 – nove anos de idade, em espaçamento de 4 x 3 m. O planejamento dos ensaios para as variáveis dendrométricas e de rendimento em desdobro foi em delineamento inteiramente casualizado (DIC). Com seis tratamentos – as seis procedências de *Tectona grandis*, com 10 repetições, totalizando 60 parcelas.

2.2 – DENDROMETRIA E RENDIMENTO DE MADEIRA SERRADA DE PROCEDÊNCIAS DE *Tectona grandis*

2.2.1 - Variáveis dendrométricas

Os ensaios para obtenção de dados dendrométricos foram realizados na Fazenda Monte Verde. Os seguintes procedimentos foram adotados na colheita das árvores para a coleta de dados das variáveis dendrométricas: foram selecionadas aleatoriamente, 10 árvores por procedência; as árvores selecionadas foram marcadas, por sequência numérica de identificação de tratamentos e de números das parcelas; o abate de árvores foi com motosserra, e fez-se a limpeza dos fustes das árvores abatidas pela retirada dos galhos e ramos, com motosserra; e então os fustes foram tracionados em toras com comprimento de aproximadamente 2,30 m, até a altura comercial.

A cubagem das árvores abatidas foi feita pela: medição da altura total (HT) com trena (Figura 1.1-A); pela medição das circunferências nos pontos, 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da circunferência, em função do comprimento do fuste da árvore e também da circunferência à altura do peito (CAP) – 1,3 m do fuste, medidas com fita métrica (Figura 1.1-B); pela leitura da altura comercial (HC), considerando para a altura comercial o ponto de circunferência de 47,00 cm, mensurada com trena; e pela marcação das seções de toras para o fracionamento do fuste a cada 2,30 m com trena (Figura 1.1-C).

A identificação das seções de toras das árvores foi em cadeia de custódia, com a marcação das toras e de todas peças desdobradas, a partir da árvore que gerou as toras, com giz de cera e com adesivos. Exemplo para a primeira árvore do clone MT-01 e suas 5 toras de 2,30 metros: MT-01-1 desdobradas em toras MT-01-1A, MT-01-1B, MT-01-1C, MT-01-1D e MT-01-1E.



Figura 1.1 – Dendrometria das procedências de *Tectona grandis*. (A) Mensuração de altura comercial; (B) Mensuração da CAP; e (C) Tracionamento e retirada de discos para análises.

A tora seccionada entre 0,10 e 2,4 m do fuste foi utilizada nas análises físicas e mecânicas da madeira e do topo dessa seção foi retirado o disco de 5 cm de espessura, para as análises anatômicas e químicas (Figura 1.1-C).

Para a determinação da área ocupada por cerne foi feita segundo a equação 1.1, conforme Evangelista (2007), com adaptações.

$$CRN = \frac{(\pi \times (d - a)^2)}{40.000} \quad (1.1)$$

Onde:

- CRN = área ocupada por cerne, m²;
- d = diâmetro médio da tora – CAP / π , m;
- a = espessura do alburno, m.

A determinação da área ocupada por alburno e da área seccional média basearam-se nas equações 1.2 e 1.3, segundo Evangelista (2007), com adaptações.

$$ALB = AS_M - CRN \quad (1.2)$$

$$AS_M = \frac{(\pi \times d^2)}{40.000} \quad (1.3)$$

Onde:

- ALB = área ocupada por alburno, m²;
- AS_M = área seccional média, m² - equação 1.3;
- CRN = área ocupada por cerne, m² - equação 1.1.

A determinação da percentagem de alburno utilizou-se a equação 1.4, a percentagem de cerne pela equação 1.5, e a relação cerne/alburno pela equação 1.6, de metodologia utilizada por Evangelista (2007), com adaptações.

$$\%ALB = \frac{ALB}{AS_M} \times 100 \quad (1.4)$$

$$\%CRN = 100 - \%ALB \quad (1.5)$$

$$\frac{CRN}{ALB} = \frac{\%CRN}{\%ALB} \quad (1.6)$$

Onde:

- ALB = área ocupada por alburno, m² - equação 1.2;
- AS_M = área seccional média, m² - equação 1.3;
- %ALB = percentagem de alburno, %;
- %CRN = percentagem de cerne, %;
- CRN / ALB = relação cerne-alburno.

A conicidade da árvore foi determinada pela equação 1.7, e a percentagem de conicidade pela equação 1.8, de metodologia usada por Evangelista (2007), com adaptações.

$$C = \frac{d_1 - d_2}{l} \quad (1.7)$$

$$C\% = \frac{d_1 - d_2}{d_2} \times 100 \quad (1.8)$$

Onde:

- C = conicidade, cm/m;
- C% = porcentagem de conicidade, %;
- d₁ = diâmetro da extremidade inferior da árvore, m;
- d₂ = diâmetro da extremidade superior da árvore, m;
- l = comprimento de cada árvore, m.

O volume das toras com e sem casca foi feito pelo método de Smalian (1937), com adaptações e calculadas em função dos valores das circunferências, para as porcentagens da altura do fuste (0%, 25%, 50%, 75% e 100%), ou de suas circunferências nas extremidades das seções do fuste e pelos valores da altura total da árvore ou do comprimento das seções do fuste da árvore. Com as equações 1.9 e 1.10 foram calculados os volumes totais do fuste por árvore e os volumes individuais das seções dos fustes, respectivamente. A equação 1.11 foi utilizada para calcular os volumes comerciais do fuste das árvores, com as metodologias usadas por Diogo (2014) e por Vital (2008), respectivamente. Antes do desdobro na serraria, as toras foram novamente medidas para a determinação do volume individual sem casca (equação 1.10).

$$V_T = \frac{\pi}{8} \times l [d_0^2 + d_{100}^2 + 2(d_{25}^2 + d_{50}^2 + d_{75}^2)] \quad (1.9)$$

$$V_i = \frac{\pi}{8} (d_0^2 + d_{100}^2) \times l \quad (1.10)$$

$$V_C = \sum V_i \quad (1.11)$$

Onde:

- V_T = volume total da árvore, com casca ou sem casca, m³;
- V_i = volume individual das seções da árvore, com casca ou sem casca, m³;
- V_C = volume comercial da árvore, com casca ou sem casca, m³;
- l = comprimento de cada árvore ou seção do fuste, m;
- d = diâmetro, com casca ou sem casca, nas diferentes porcentagens das seções de toras.

2.2.2 – Rendimento em desdobro

A determinação do rendimento de desdobro das madeiras das toras e dos resíduos foram realizados na Indústria da empresa Floresteca S/A, localizada no Município de Cáceres, Estado de Mato Grosso.

A coleta de dados para os parâmetros de rendimento de desdobro de madeira serrada foi conforme os seguintes procedimentos: pelo desdobro das toras para produção de blocos, em engenho de serras fita geminadas (Figura 1.2-A e B), pelo desdobro das quatro faces laterais das toras em pranchas, no engenho de serras circulares horizontais, e na resserragem das pranchas, produzindo sarrafos, em refiladoras, por serra circulares, com a retirada das costaneiras (Figura 1.2-C).

Para a determinação dos volumes dos blocos e dos sarrafos todas as peças produzidas foram cubadas, obtendo-se a dimensão da largura, da altura e do comprimento de cada peça, em metro. Para a diferenciação as peças produzidas receberam a mesma numeração das árvores e das seções do fuste.





Figura 1.2 – Rendimento da madeira das procedências de *Tectona grandis* na serraria. (A) Desdobro das toras em serras fita geminadas; (B) Madeira desdobrada em blocos a partir das toras; (C) Madeira desdobrada em sarrafos a partir das quatro faces laterais das toras.

Das toras desdobradas em engenho de serras na obtenção dos blocos e sarrafos, mediu-se o comprimento, a largura e a espessura, para a cubagem individual da peça, e somou-se os valores de todas as peças de cada árvore ($\sum v_{bt}$), determinando-se o volume de madeiras serradas (Equação 1.12), por metodologia adaptada de Evangelista (2007).

$$VMS = \sum v_{bt} \quad (1.12)$$

Onde:

- VMS = volume de madeira serrada, por árvore, m³;
- $\sum v_{bt}$ = somatório dos volumes dos blocos e das tábuas gerados, por árvore, m³.

O volume dos resíduos sólidos de madeira serrada foi o produto da subtração do volume comercial da árvore sem casca pelo volume da madeira serrada (equação 1.13).

$$VRS = VCASC - VMS \quad (1.13)$$

Onde:

- VRS = volume de resíduos sólidos de madeira serrada, m³;
- VCASC = volume comercial da árvore, sem casca, m³ - equação 1.10;
- VMS = volume de madeira serrada, por árvore, m³ - equação 1.12.

O rendimento volumétrico total das árvores sem casca (RTASC) e o rendimento comercial das árvores sem casca (RCASC) foi determinado pelo produto do volume de madeira serrada (VMS), pelo volume total das árvores sem casca (VTASC) ou pelo volume comercial das árvores sem casca (VCASC) (equação 1.14).

$$\text{RTASC ou RCASC} = \frac{\text{VMS}}{\text{VTASC OU VCASC}} \times 100 \quad (1.14)$$

Onde:

- RTASC = rendimento total da árvore, sem casa, m³;
- RCASC = rendimento comercial da árvore, sem casa, m³;
- VTASC = volume total da árvore, sem casca, m³ - equação 1.9;
- VCASC = volume comercial da árvore, sem casca, m³ - equação 1.11;
- VMS = volume de madeira serrada, por árvore, m³ - equação 1.12.

2.3 – ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise e processamento dos dados das variáveis dendrométricas e do rendimento do desdobro de madeira serrada foram feitos com o programa SPSS 22, com a exploração dos dados para busca de *outliers* (valores extremos). Após a retirada dos dados fora do intervalo de 5% de significância, fez-se os testes de normalidade de Kolmogorov-Smirnov – para população com número de observações maiores que 50, e de Shapiro-Wilk – para população com número de observações menores que 50. Com a confirmação da distribuição normal dos dados, fez-se a análise de variância pelo teste F. Nos casos de significância estatística menor que 0,05 ($\alpha \leq 0,05$), foi aplicada a diferença mínima significativa para a comparação múltipla das médias pelo teste de Tukey, ao nível de significância de 5%.

Na avaliação das relações entre as variáveis dendrométricas e de rendimento de madeira serrada, foram determinados os coeficientes de correlação linear de Pearson, também com o programa de estatística SPSS, versão 22, em nível de significância estatística de 5%.

Para as variáveis analisadas pela correlação de Pearson foi aplicada a técnica de análise multivariada de dados *two step cluster* (agrupamento de duas etapas), com objetivo de avaliar a importância de cada variável, pela classificação de diferentes tipos de variáveis que partilham as mesmas características, ou seja, apresentam ou não o mesmo perfil, usando o programa de estatística SPSS, versão 22.

A avaliação de dados complexos e multivariados e com diferentes medições e escalas é uma tarefa complexa e com possibilidade de erros de interpretação de resultados sem o uso de um método eficiente de análise. A técnica *two step cluster* é apropriada para essa incumbência, pois, trabalha com conjunto de dados grandes usando algoritmo estruturado em duas etapas – 1º agrupando as variáveis em pequenos subgrupos e no 2º reagrupando os subgrupos e gerando os *clusters* – que faz o reconhecimento de padrões nos dados possibilitando a interpretação precisa dos resultados com base em estatística.

Neste trabalho a técnica foi aplicada para classificar um conjunto de dados formados por 10 variáveis contínuas (dados com distribuição normal) DAP, HT, %CRN, %ALB, C, VTASC, VCASC, VMS, RTASC, RCASC, mais uma variável categoria (dados assumem uma distribuição multinomial) procedências de *Tectona grandis*, com objetivo de fornecer informações para a correta tomada de decisão de qual ou quais são as procedências mais relevantes e quais variáveis contribuem para a seleção do material mais rentável na produção de madeira serrada.

3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 – VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS

De acordo com os dados da análise de variância, pelo teste F (Tabela 1.1), há diferença significativa entre as médias das seis procedências avaliadas em função das variáveis dendrométricas diâmetro à altura do peito (DAP), altura total da árvore (HT), altura comercial da árvore (HC), área ocupada por cerne (CRN), área ocupada por alburno (ALB), porcentagem de cerne (%CRN), porcentagem de alburno (%ALB), e conicidade (C), cm.m^{-1} .

As médias de 0,28 m para o diâmetro à altura do peito (DAP), 20,43 m para a altura total da árvore (HT), 1,79 cm.m⁻¹ para a conicidade (C), 43,48% para porcentagem de cerne (%CRN) e 56,52% para porcentagem de alburno (%ALB) são compatíveis com os resultados obtidos na literatura, para povoamentos com a mesma idade e espaçamentos semelhantes.

Da comparação entre os valores médios das porcentagens de cerne (43,48%) e alburno (56,52%), para árvores com diâmetro à altura do peito (DAP) médio de 0,28 m (Tabela 1.1), pode-se inferir que a proporção de madeira juvenil ainda é elevada no povoamento; os dados das características anatômicas e das propriedades físicas – do capítulo II – vão confirmar essa relação. Considerando a informação de Moya et al. (2014) que o cerne de árvores de *Tectona grandis* começa a se formar entre quatro e seis anos ou quando o diâmetro da árvore é de aproximadamente 0,06 a 0,10 m, a porcentagem de cerne para as árvores com nove anos, deste estudo é aceitável. Os clones MT-02 e MT-08 possuem menores valores médios para respectivamente porcentagem de alburno (%ALB) e conicidade (C).

Tabela 1.1 – Análise de variância e da estatística descritiva para as variáveis dendrométricas, em função de seis procedências de *Tectona grandis* com nove anos de idade.

Análise de Variância e Estatística Descritiva						
Fonte de Variação	DAP (m)	HT (m)	HC (m)	%CRN (%)	%ALB (%)	C (cm.m⁻¹)
F_{cal}	13,062 **	38,901 **	26,574 **	3,471 **	3,471 **	10,589 **
Média	0,28	20,43	10,99	43,48	56,52	1,79
“σ”	0,02	1,82	2,30	8,12	8,12	0,21
Mínimo	0,22	14,70	5,50	29,14	28,46	1,41
Máximo	0,31	23,20	14,70	71,54	70,86	2,38
CV (%)	7,00	9,00	21,00	19,00	14,00	12,00

DAP: diâmetro à altura do peito; HT: altura total da árvore; HC: altura comercial da árvore; %CRN: porcentagem de cerne; %ALB: porcentagem de alburno; C: conicidade; σ : desvio padrão; CV: coeficiente de variação; **: significativo ao nível de 1% de significância ($\alpha < 0,01$).

As árvores de todas as procedências têm valores maior que 1 para conicidade, ou seja, seus fustes tendem à forma cônica, com características

desfavoráveis no desdobro, pois, influenciam negativamente o rendimento de madeira serrada, além de produzir peças com menor resistência à flexão.

Viquez e Pérez (2005) estudaram o efeito da desrama no desenvolvimento, rendimento e propriedades da madeira de *Tectona grandis*, com idade de 6,1 anos, na Costa Rica, e chegaram aos seguintes resultados: 1,07 na relação $\frac{DAP}{H}$, 1,69 $\text{cm}\cdot\text{m}^{-1}$ de conicidade (C), 0,17 m^3 de volume da árvore, 0,034 m^3 de volume do cerne, e 0,096 m^3 de volume do alburno, para as árvores controle (sem desrama); e 1,03 na relação $\frac{dap}{h}$, 1,57 $\text{cm}\cdot\text{m}^{-1}$ de conicidade (C), 0,13 m^3 de volume da árvore, 0,019 m^3 de volume do cerne (23,45%), e 0,081 m^3 de volume do alburno (76,55%), para árvores com desrama até a altura de 5 metros. Constatou-se também que os regimes intensos de desrama afetaram negativamente os valores das variáveis dendrométricas, que por sua vez influenciam no rendimento e na qualidade da madeira produzida. Dessa forma, na adoção de práticas silviculturais como desramas e desbastes, é necessário o adequado conhecimento das intensidades a serem adotadas, com objetivo de buscar uma maior capacidade produtiva do povoamento, e assim conseguir a maximização da produção de volume de madeira por árvore por hectare.

Figueiredo et al. (2005) analisando o diâmetro à altura do peito e o fator de forma para *Tectona grandis*, variedade Tennasseruim, procedentes de Myanmar e plantados nos Municípios de Rio Branco e Acrelândia-AC, com idades entre 2,54 e 9,5 anos, concluíram que as árvores mais novas têm formas mais cilíndricas, fator de forma de 0,61. Enquanto as árvores mais velhas têm formas mais cônicas com fator de forma de 0,48. Assim, as árvores de maiores portes – maiores alturas total (HT) e diâmetro à altura do peito (DAP) – apresentam maior conicidade (C).

Vendruscolo et al. (2016) estudando o efeito do espaçamento do plantio na forma do fuste das árvores de *Tectona grandis* com 15 anos de idade, plantados em Cáceres-MT, concluíram que há uma clara diferença do aumento do diâmetro conforme o acréscimo do espaçamento, onde quanto maior for o espaçamento maior será a conicidade da árvore. No entanto, observaram que essa diferença tende a diminuir à medida que aumenta a altura da árvore. Assim, os espaçamentos menores favorecem a produção de árvores mais cilíndricas em relação aos espaçamentos maiores.

Com os dados das comparações múltiplas entre as médias das procedências (Tabela 1.2), observa-se que as médias dos valores do diâmetro à altura do peito (DAP) e porcentagem de cerne (%CRN) dos clones MT-00, MT-01, MT-02 e MT-08 são estatisticamente iguais. Para altura total da árvore (HT) MT-00 e MT-08 são estatisticamente iguais. Os clones MT-00, MT-01 e MT-08 são estatisticamente iguais e com os maiores valores médios para a altura comercial da árvore (HC).

Tabela 1.2 – Resumo das médias e do teste de Tukey, para as variáveis dendrométricas, em função de seis procedências de *Tectona grandis* com nove anos de idade.

Procedências	DAP (m)	HT (m)	HC (m)	%CRN (%)	%ALB (%)	C (cm.m ⁻¹)
MT-SE	0,26 b	20,15 c	10,47 b	41,39 b	58,61 a	1,73 bc
MT-00	0,29 a	21,84 ab	13,55 a	42,77 ab	57,23 ab	1,71 bc
MT-01	0,29 a	20,92 bc	12,04 ab	42,06 ab	57,94 ab	1,88 ab
MT-02	0,28 a	20,70 bc	10,48 b	51,78 a	48,22 b	1,80 b
MT-08	0,28 a	21,97 a	12,17 ab	43,32 ab	56,68 ab	1,56 c
MT-80	0,25 b	17,19 d	7,46 c	39,20 b	60,80 a	2,03 a

DAP: diâmetro à altura do peito; HT: altura total da árvore; HC: altura comercial da árvore; %CRN: porcentagem de cerne; %ALB: porcentagem de alburno; C: conicidade. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, nas colunas, para o teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Leite et al. (2011), em estudo de afilamento de cerne de *Tectona grandis* com idades entre 3 e 12 anos, obtiveram porcentagem de alburno (%ALB) e cerne (%CRN) em função do aumento do diâmetro à altura do peito (DAP) da árvore variando entre 11,4% e 56,4% no cerne e entre 36,4% e 63,9% no alburno, com os valores no cerne crescendo e no alburno decrescendo com o aumento do diâmetro à altura do peito (DAP) das árvores. Essa constatação foi verificada neste estudo, em que quanto menor é a quantidade de alburno, maior será a quantidade de cerne na madeira das árvores (Tabela 1.2). Pérez-Cordero e Kanninem (2003) afirmam que, com o aumento da idade e dos espaçamentos, aumenta o volume de cerne, enquanto a área transversal do cerne diminui com o aumento da altura das árvores.

Eles também afirmam que sítios mais secos produzem mais volume que sítios mais úmidos, mesmo comparando árvores com a mesma idade e tamanho.

Para a quantificação da porcentagem de cerne (%CRN) têm-se que os valores percentuais, com exceção do clone MT-02, são menores que os valores percentuais de alburno (%ALB), variando entre 39,20% e 51,78% (Tabela 1.2), com o valor máximo de 71,54% dentro da população estudada (Tabela 1.1). Gonçalves et al. (2010) descreveram que na utilização de madeira de qualidade, a quantificação do cerne e alburno é extremamente importante, uma vez que maiores proporções de cerne, por exemplo, dificultam o processo de penetração de compostos químicos, devido às suas características anatômicas. Então deve-se dar preferência para o uso desse material como produtos serrados. A madeira com maior proporção de alburno é mais indicada quando se pretende realizar o tratamento preservativo.

Madi et al. (2014), em estudo da distribuição diamétrica de um povoamento de *Tectona grandis*, de origem seminal com 12 anos de idade, obtiveram valor médio do diâmetro à altura do peito (DAP) de 25,75 cm, com valor mínimo de 11,52 cm e máximo de 46,79 cm. Flórez et al. (2014) caracterizando a madeira jovem de *Tectona grandis*, com 13 anos, plantadas em Minas Gerais, encontraram porcentagens de alburno (%ALB) e de cerne (%CRN) de respectivamente 48% e 51% estes autores consideraram que os percentuais são altos, para cerne, mesmo se comparados a material com maiores idades.

Tewari e Mariswamy (2013) avaliaram a casca, o cerne e o alburno de *Tectona grandis* com idades entre 11 e 36 anos, em estudo realizado em Karnataka, Índia, afirmam que o percentual de cerne (%CRN) variou entre 37,05% e 56,33% e o de alburno (%ALB) variou entre 12,95% e 23,04%, para árvores com valor médio do diâmetro à altura do peito (DAP) de 0,15 m e volume médio com casca de 0,14 m³; estes pesquisadores também concluíram que a porcentagem de cerne aumenta com o aumento do diâmetro à altura do peito (DAP), enquanto a proporção de alburno diminui. Varghese et al. (2000), em estudo da variação do crescimento da madeira de nove povoamentos de *Tectona grandis*, com 60 anos, na Índia, obtiveram porcentagem de alburno variando entre 2,73% e 14,03%, para os respectivos diâmetro à altura do peito (DAP) de 0,62 m e 0,31 m, confirmando a tendência de que quanto maior a idade e o diâmetro à altura do peito (DAP) da

árvore, maior será a porcentagem de cerne e conseqüentemente menor será a porcentagem de alburno.

3.2 – RENDIMENTO EM DESDOBRO

A análise de variância mostrou que entre as procedências de *Tectona grandis* há diferenças significativas para as médias das variáveis de rendimento (Tabela 1.3).

Os valores médios dos volumes e rendimentos das seis procedências foram de 0,60 m³ para o volume total da árvore sem casca (VTASC), 0,39 m³ para o volume comercial da árvore sem casca (VCASC), de 0,14 e 0,25 m³, respectivamente para o volume de madeira serrada (VMS) e para o volume de resíduo de madeira serrada (VRS). O rendimento total da árvore sem casca (RTASC) foi de 64,66% e de 37,43% para o rendimento comercial da árvore sem casca (RCASC).

Os altos valores dos coeficientes de variação experimental (CV), maiores que 0,25, para as variáveis de rendimento de madeira serrada reflete a variação fenogenotípica entre as procedências avaliadas.

Tabela 1.3 – Resumo da análise de variância e da estatística descritiva para as variáveis de rendimento de desdobro de madeira serrada, em função de seis procedências de *Tectona grandis* com nove anos de idade.

Análise de Variância e Estatística Descritiva						
Fonte de Variação	VTASC (m³)	VCASC (m³)	VMS (m³)	VRS (m³)	RTASC (%)	RCASC (%)
F _{cal}	18,840 **	26,860 **	18,000 **	11,309 **	4,784 **	4,194 **
Média	0,60	0,39	0,14	0,25	64,66	37,43
“σ”	0,13	0,11	0,03	0,09	9,25	9,18
Mínimo	0,35	0,20	0,08	0,08	46,33	22,27
Máximo	0,84	0,60	0,20	0,43	84,97	65,04
CV (%)	22,00	28,00	21,00	36,00	14,00	25,00

VTASC: volume total da árvore sem casca; VCASC: volume comercial da árvore sem casca; VMS: volume de madeira serrada; VRS: volume de resíduo de madeira serrada; RTASC: rendimento total da árvore sem casca; RCASC:

rendimento comercial da árvore sem casca; σ : desvio padrão; CV: coeficiente de variação; **: significativo ao nível de 1% de significância ($\alpha < 0,01$).

Observando-se a Tabela 1.4 verifica-se que os clones MT-00, MT-01, MT-02 e MT-08 apresentam as maiores médias para as variáveis de rendimento em desdobro, com destaque para o clone MT-00, que possui o maior valor médio para o volume comercial da árvore sem casca (VCASC) com 0,51 m³, para o volume de madeira serrada (VMS) 0,19 m³, para rendimento total da árvore sem casca (RTASC) com 69,98%. O clone MT-80 possui o maior valor médio para rendimento comercial da árvore sem casca (RCASC) com 43,61%, porém, com o menor valor do volume de resíduo de madeira serrada (VRS), com 0,14 m³ (Tabela 1.4), possivelmente devido ao mais alto valor da conicidade (C) dos fustes desse tratamento, 2,03.

Considerando os maiores valores absolutos o clone MT-00 se destaca como o material que possui os maiores valores médios de volume total da árvore sem casca (VTASC), de volume comercial da árvore sem casca (VCASC), de volume de madeira serrada (VMS) e de rendimento total da árvore sem casca (RTASC), sendo terceiro material com maior rendimento comercial da árvore sem casca (RCASC).

Tabela 1.4 – Resumo das médias e do teste de Tukey, para as variáveis de rendimento de desdobro de madeira serrada, em função de seis procedências de *Tectona grandis*, com nove anos de idade.

Procedências	VTASC (m ³)	VCASC (m ³)	VMS (m ³)	VRS (m ³)	RTASC (%)	RCASC (%)
MT-SE	0,54 bc	0,36 c	0,15 b	0,22 bc	64,69 a	43,03 a
MT-00	0,71 a	0,51 a	0,19 a	0,31 a	69,98 a	39,20 ab
MT-01	0,71 a	0,47 ab	0,14 b	0,33 a	65,43 a	30,30 b
MT-02	0,62 ab	0,36 c	0,13 b	0,25 ab	65,62 a	34,22 ab
MT-08	0,62 ab	0,42 bc	0,15 b	0,28 ab	67,81 a	34,40 ab
MT-80	0,41 c	0,23 d	0,10 c	0,14 c	53,40 b	43,61 a

VTASC: volume total da árvore sem casca; VCASC: volume comercial da árvore sem casca; VMS: volume de madeira serrada; VRS: volume de resíduo de madeira serrada; RTASC: rendimento total da árvore sem casca; RCASC: rendimento comercial da árvore sem casca. As médias seguidas pela mesma

letra não diferem estatisticamente entre si, nas colunas, para o teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Para as variáveis de rendimento de madeira serrada, as árvores com procedências seminais têm bons resultados frente às árvores com procedências clonais, com as maiores médias e estatisticamente e iguais aos clones MT-00, MT-01 e MT-02 e MT-08, para o parâmetro rendimento total da árvore sem casca (RTASC), e estatisticamente igual ao clone MT-00, MT-02, MT-08 e MT-80, com os maiores valores médios para a variável rendimento comercial da árvore sem casca (RCASC). Assim apesar da constatação de que os materiais clonais possuem diferença significativa para a produção de volume de madeira, essa vantagem não foi transferida para o rendimento de madeira serrada, provavelmente em função de variáveis relacionadas as máquinas e equipamentos na operação de desdobro e a qualidade da madeira da procedência seminal, que é a terceira com menor conicidade.

Vieira et al. (2008) estudando o desempenho de *Tectona grandis* com sete anos, em plantio 3 x 4, plantados em Rondônia, obtiveram as médias de 0,23 m para o diâmetro à altura do peito (DAP) e 0,21 m³ para o volume total da árvore sem casca (VTASC), para as variáveis dendrométricas. Flórez et al. (2014) chegaram a resultados de 0,204 m de diâmetro à altura do peito (DAP), 0,16 m³ para o volume da árvore com casca, e 0,13 m³ para o volume da árvore sem casca, estudando *Tectona grandis* com 13 anos. Silva et al. (2014) em estudo de crescimento em uma plantação de *Tectona grandis*, em Alta Floresta/MT, analisando equações para testar a estimativa de volume individual, em função da idade, obtiveram 0,16 m³ para árvores com nove anos de idade e com diâmetro à altura do peito (DAP) de 0,17 m. Chaves (2013) estimando o padrão de crescimento em um povoamento de *Tectona grandis* na região de Indiavaí/MT/BR, obteve valores de 0,18 m³ de volume individual, 0,18 m de diâmetro à altura do peito (DAP) e altura dominante de 16,93 m, para árvores com 9 anos de idade. O valor médio de 0,39 m³ para o volume comercial da árvore sem casca (VCASC), obtido para as procedências deste estudo é muito maior que os obtidos por Vieira et al. (2008) por Silva et al. (2014) e por Chaves (2013).

Budiaman e Komalasari (2012) estudando resíduos de colheita e produção de madeira de *Tectona grandis* com idades entre 20 e 30 anos, plantadas em

florestas comunitárias na Indonésia, chegaram a valores de até 77,7% da utilização dos fustes das árvores para a produção de toras, sendo que até 28,3% da árvore foi desperdiçada, na forma de galhos, tronco superior e tocos. Ou seja, de cada m³ da árvore abatida 0,72 m³ fora convertida em toras e que 0,28 m³ fora convertido em resíduos de colheita. Na transformação das toras em madeira serrada em blocos, a quantidade de resíduos chegou a 41,3%, em sua maior quantidade na forma de costaneiras. Das toras com diâmetro médio de 38,3 cm foram produzidas peças com diâmetro entre 19,5 e 57 cm e com comprimento entre 110 e 210 cm, desdobradas no mesmo local da colheita com motosserra, a mesma usada no abate da árvore. Os autores também observaram que o desperdício gerado no desdobro faz parte do padrão Indonésio de produção dos blocos, e que satisfaz as exigências da indústria moveleira local, por esse tipo específico de corte.

O valor médio do rendimento comercial da árvore sem casca (RCASC) de 37,43%, produz 62,57% de resíduos sólidos de madeira serrada (VRS), que é um valor bem maior que o obtido pelos autores, apesar da alta tecnologia empregada do desdobro das toras das árvores. Quando se avalia o rendimento total da árvore sem casca (RTASC), com porcentual médio de 64,66% temos um porcentual de resíduo sólido de colheita com valor de 35,34%, que é 1,25 vezes maior que o obtido por Budiaman e Komalasari (2012). Essa diferença é produto da maior quantidade de lenho desperdiçado na parte do fuste com diâmetro à altura do peito (DAP) inferior a 0,15 m, que produz blocos com madeira de qualidade inferior a exigida pelo mercado, por conter maior quantidade de alburno são atualmente rejeitadas pelas indústrias consumidoras da madeira de *Tectona grandis*.

O grande volume de resíduos de madeira produzidos na fase de colheita e no desdobro de madeira serrada não compromete a viabilidade do empreendimento devido à localização da indústria, que favorece a comercialização dos resíduos como biomassa para as empresas agrícolas que armazenam grãos, que usam esse material na secagem de grãos de arroz, milho e soja, e para as olarias que queimam as cerâmicas com esse material.

Tanto para as variáveis dendrométricas como as variáveis de rendimento de madeira serrada para as árvores com procedências seminais, têm bons resultados frente as árvores com procedências clonais, sendo igual estatisticamente as

maiores médias dos clones para as variáveis, porcentagem de cerne, rendimento total da árvore sem casca e rendimento comercial da árvore sem casca.

3.3 – CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS E AS VARIÁVEIS DE RENDIMENTO DE DESDOBRO DE MADEIRA SERRADA

Na Tabela 1.5 tem-se a matriz de correlação linear de Pearson entre as variáveis dendrométricas e as variáveis de rendimento de desdobro de madeira serrada, com comparação bivariada, em função de seis procedências de *Tectona grandis*.

De forma geral observa-se que o diâmetro à altura do peito (DAP), a altura total da árvore (HT), o volume total da árvore sem casca (VTASC), o volume comercial da árvore sem casca (VCASC), o volume de madeira serrada (VMS), e o rendimento total da árvore sem casca (RTASC) apresentam entre si correlação significativa e positiva.

O diâmetro à altura do peito (DAP) tem correlação muito forte como o volume total da árvore sem casca (VTASC) (0,92**), forte correlação com o volume comercial da árvore sem casca (VCASC) (0,78**), correlação moderada com a altura total da árvore (HT) (0,63**), fraca correlação com o volume de madeira serrada (VMS) (0,41**), e correlação moderada e inversa com o rendimento comercial da árvore sem casca (RCASC) (-0,54**). A altura total da árvore (HT) tem forte correlação com o volume total da árvore sem casca (VTASC) e com o volume comercial da árvore sem casca (VCASC), com respectivamente 0,77** e 0,78**, que refletem diretamente no rendimento de madeira serrada, porém, a correlação entre a altura total da árvore (HT) e o rendimento total da árvore sem casca (RTASC) é fraca (0,49**) e entre a altura total da árvore (HT) e o rendimento comercial da árvore sem casca (RCASC) é fraca e inversa (-0,38**).

Sanquetta et al. (2015) ajustando equações hipsométricas para estimar a altura total de indivíduos jovens de teca, com idades entre quatro e cinco anos, em Redenção-PA-BR, observaram uma relação direta entre o diâmetro à altura do peito (DAP) e a altura total da árvore (HT), considerando indivíduos com diâmetro variando entre 2,20 e 22,20 cm e altura entre 1,40 e 17,1 m, com alto coeficiente de correlação de Pearson (0,94*) entre as duas variáveis.

Tabela 1.5 – Correlação de Pearson, entre as variáveis dendrométricas e as variáveis de rendimento de desdobro de madeira serrada, em função de seis procedências de *Tectona grandis* com nove anos de idade.

Correlações de Pearson										
Variável	DAP (m ³)	HT (m)	%CRN (%)	%ALB (%)	C (cm.m ⁻¹)	VTASC (m ³)	VCASC (m ³)	VMS (m ³)	RTASC (%)	RCASC (%)
DAP (m ³)	1	0,63**	0,32*	0,32*	0,03 ^{ns}	0,92**	0,78**	0,41**	0,29*	-0,54**
HT (m)	0,63**	1	0,24 ^{ns}	-0,24 ^{ns}	-0,63**	0,77**	0,78**	0,57**	0,49**	-0,38**
%CRN (%)	0,32*	0,24 ^{ns}	1	-1,00**	-0,08 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,22 ^{ns}	-0,21 ^{ns}
%ALB (%)	-0,32*	-0,24 ^{ns}	-1,00**	1	0,08 ^{ns}	-0,23 ^{ns}	-0,23 ^{ns}	-0,14 ^{ns}	-0,22 ^{ns}	0,21 ^{ns}
C (cm.m ⁻¹)	0,03 ^{ns}	-0,63**	-0,08 ^{ns}	0,08 ^{ns}	1	-0,08 ^{ns}	-0,28*	-0,28*	-0,36**	0,11 ^{ns}
VTASC (m ³)	0,92**	0,77**	0,23 ^{ns}	-0,23 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	1	0,85**	0,48**	0,30*	-0,54**
VCASC (m ³)	0,78**	0,78**	0,23 ^{ns}	-0,23 ^{ns}	-0,29*	0,85**	1	0,70**	0,75**	-0,57**
VMS (m ³)	0,41**	0,57**	0,14 ^{ns}	-0,14 ^{ns}	-0,28*	0,48**	0,70**	1	0,49**	-0,00**
RTASC (%)	0,29*	0,49**	0,22 ^{ns}	-0,22 ^{ns}	-0,36**	0,30*	0,75**	0,49**	1	-0,39**
RCASC (%)	-0,54**	-0,38**	-0,20 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,11 ^{ns}	-0,54**	-0,57**	-0,00**	-0,39**	1

DAP: diâmetro à altura do peito; HT: altura total da árvore; %CRN: porcentagem de cerne; %ALB: porcentagem de alburno; C: conicidade; VTASC: volume total da árvore sem casca; VCASC: volume comercial da árvore sem casca; VMS: volume de madeira serrada; VRS: volume de resíduo de madeira serrada; RTASC: rendimento total da árvore sem casca; RCASC: rendimento comercial da árvore sem casca; **: significativo ao nível de 1% de significância ($\alpha < 0,01$); *: significativo ao nível de 5% de significância ($0,01 \leq \alpha < 0,05$); ns: não foi significativo ($\alpha \geq 0,05$).

A conicidade (C) tem correlação significativa e inversa, sendo moderada com a altura total da árvore (HT) (-0,63**) e fraca com o rendimento total da árvore sem casca (RTASC) (-0,36**). Essas correlações são indesejáveis para o planejamento silvicultural que tem por objetivo a rentabilidade na produção de

madeira, pois, quanto menores forem as alturas totais das árvores (HT), menores serão os volumes de madeira produzidas e conseqüentemente menores serão também os rendimentos de madeira serrada. Gonçalves et al (2010) avaliando parâmetros dendrométricos em híbridos de *Eucalyptus* também obtiveram resultados com correlação inversa, porém, muito forte entre a conicidade (C) e a altura total da árvore (HT) (-0,90**) e forte correlação entre a conicidade (C) e a relação entre cerne e alburno (0,85**).

O maior destaque entre as correlações bivariadas é entre a porcentagem de cerne (%CRN) e a porcentagem de alburno (%ALB), que é, significativa, negativa e perfeita (-1,00). Constata-se que as variáveis volume total da árvore sem casca tem correlação muito forte com diâmetro à altura do peito (DAP), tem forte correlação com a altura total da árvore e com o volume comercial da árvore sem casca, bem como o volume comercial da árvore sem casca correlaciona-se fortemente com o volume de madeira serrada e com o rendimento da total árvore sem casca. Assim, quanto maiores forem os valores do diâmetro à altura do peito (DAP) e da altura total da árvore (HT), maiores serão os valores do volume total da árvore sem casca (VTASC), do volume comercial da árvore sem casca (VCASC), do volume de madeira serrada (VMS), do volume de resíduo de madeira serrada (VRS) e do rendimento total da árvore sem casca (RTASC), com significância de $\alpha < 0,01$.

O rendimento comercial da árvore sem casca (RCASC) apresentou correlação inversa e significativa com as variáveis diâmetro à altura do peito (DAP) (-0,54**), volume total da árvore sem casca (VTASC) (-0,54**), volume comercial da árvore sem casca (VCASC) (-0,57), altura total da árvore (HT) (-0,38**), rendimento total da árvore sem casca (RTASC) (-0,39**). Ou seja, quanto maior for o valor do rendimento comercial da árvore sem casca (RCASC), menores são os valores dessas seis variáveis.

Assim, há significância estatística ($\alpha \leq 0,05$), nas correlações positivas entre as variáveis dendrométricas diâmetro à altura do peito (DAP) e altura total (HT) com as variáveis de rendimento de madeira serrada, volume total da árvore sem casca (VTASC), volume comercial da árvore sem casca (VCASC), volume de madeira serrada (VMS), volume de resíduo de madeira serrada (VRS) e rendimento total da árvore sem casca (VTASC). Porém, a variável rendimento comercial da árvore sem

casca (RCASC) correlacionou-se negativamente ao diâmetro à altura do peito (DAP), altura total (HT), volume total da árvore sem casca (VTASC), volume comercial da árvore sem casca (VCASC), volume de madeira serrada (VMS), volume de resíduo de madeira serrada (VRS) e rendimento total da árvore sem casca (RTASC).

3.4 – CLASSIFICAÇÃO DE IMPORTÂNCIA ENTRE AS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS E AS VARIÁVEIS DE RENDIMENTO DE DESDOBRO DE MADEIRA SERRADA NA QUALIFICAÇÃO DAS PROCEDÊNCIAS

A Figura 1.3-A apresenta o resumo do modelo preditor, com o resultado da formação de dois *clusters* ou agrupamentos de dados para as 11 entradas ou variáveis analisadas. A Figura 1.3-B o gráfico de tamanho dos *clusters* confirma que os dados resultaram em dois *clusters* e apresenta a frequência relativa de cada *cluster*. O *cluster 1* agrupa 21,1% da variável categórica (procedências) relacionada ao rendimento de madeira serrada e o *cluster 2* agrupa 78,9% da variável categórica. Na Figura 1.3-C o gráfico apresenta a qualidade do modelo preditor dos *clusters*, que é qualificado como de alta qualidade.

Os dados das variáveis de rendimento de madeira serrada mais os dados da variável procedências de *Tectona grandis* com nove anos classificaram-se em dois grupos homogêneos, dois *clusters*, assim pelo agrupamento em padrão de dados foi possível distinguir dois níveis diferentes, ou dois subperfis. Costa (2017) explica que o *two step cluster* faz a divisão dos elementos pertencentes a um mesmo grupo de forma que os elementos dentro dele sejam similares entre si, em relação a um grupo de variáveis selecionadas, e que os elementos em grupos diferentes são heterogêneos em relação a essas mesmas características.

Na Figura 1.4-A o gráfico de importância geral (perfil geral), apresenta na abcissa (coordenada x) a importância de entrada para as variáveis e na ordenada (coordenada Y) a lista de variáveis. A variável com maior importância ao conjunto de dados foi o volume comercial da árvore sem casca (VCASC), seguida da altura total (HT), do volume total da árvore sem casca (VTASC), e do diâmetro à altura do peito (DAP).

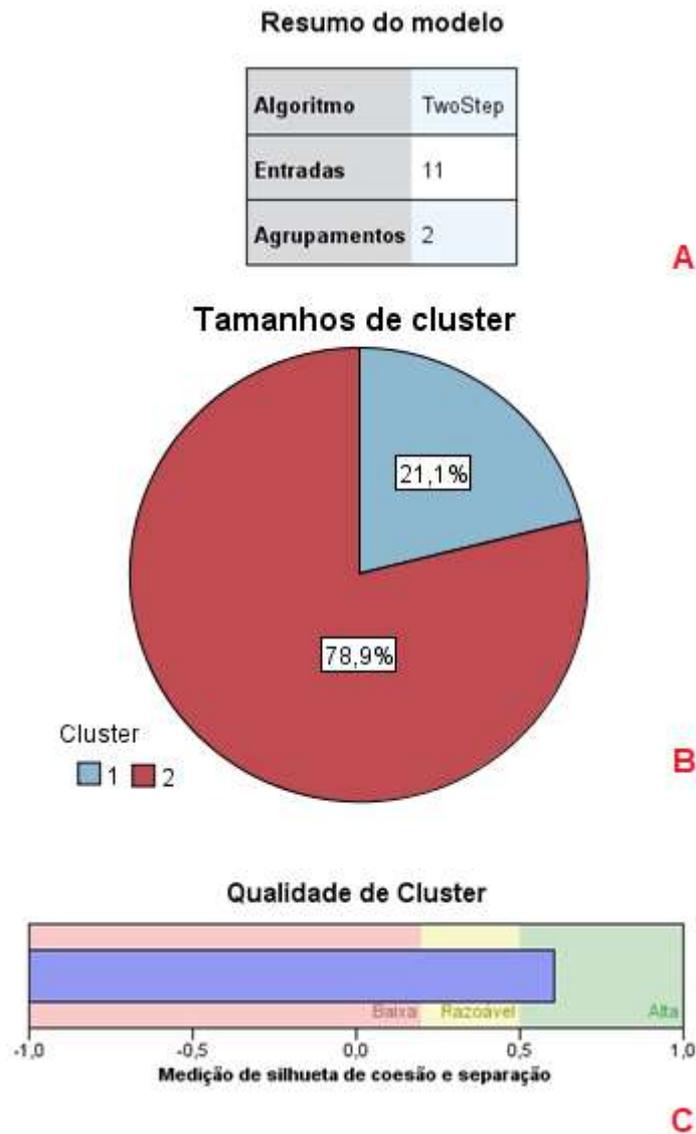
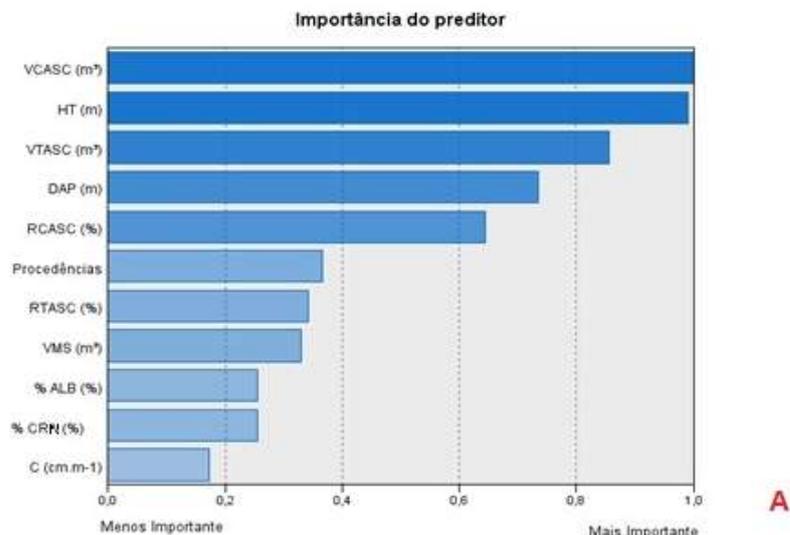


Figura 1.3 – Resumo do modelo preditor (A). Tamanhos de Cluster (B). E Qualidade de Cluster (C) – *Output, two step cluster.*

Na Figura 1.4-B tem-se os agrupamentos, com as respectivas classificações de importância das variáveis dentro de cada *cluster*. No *cluster* 1 a variável mais importante é o volume comercial da árvore sem casca (VCASC), seguido do volume total da árvore sem casca (VTASC), do rendimento total da árvore sem casca (RTASC) e do diâmetro à altura do peito (DAP). No *cluster* 2 altura total (HT), seguida do volume comercial da árvore sem casca (VCASC), do volume total da

árvore sem casca (VTASC), e do diâmetro à altura do peito (DAP) influenciam na seleção das procedências de *Tectona grandis* com nove anos de idade.



Agrupamentos

Cluster	2	1
Tamanho	78,9%	21,1%
Entradas	HT	VCASC
	VCASC	VTASC
	VTASC	RTASC
	DAP	DAP
	RCASC	Procedências
	VMS	HT
	RTASC	RCASC
	C	ALB
	ALB	CRN
	CRN	VMS
	Procedências	C

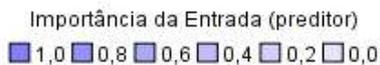


Figura 1.4 – Importância geral das variáveis dentro do modelo preditor (A). Importância das variáveis por *cluster* no modelo preditor (B) – *Output, two step cluster*.

Quanto a seleção das procedências as Figuras 1.4-C-A e 1.4-C-B, do Apêndice B.2 apresentam a procedência clonal MT-80 como a mais relevante para o *cluster* 1 e a procedência clonal MT-08 para o *cluster* 2 para a importância geral

(perfil geral). Para a importância dentro de cada *cluster* o clone MT-80 continua como o mais importante para o *cluster* 1 e o clone MT-08 para o *cluster* 2, considerando o conjunto de dados analisados.

Assim pode-se afirmar, com 95% de probabilidade estatística, que a procedência clonal MT-08 é a mais importante, considerando as variáveis dendrométricas e as variáveis de rendimento de desdobro, quanto ao rendimento de madeira serrada estudadas.

As condições de desdobro avaliadas neste estudo refere-se a variáveis inerentes a madeira, e com a classificação de importância dessas variáveis é possível recomendar com segurança estatística que, para a maximização do rendimento de madeira serrada das procedências, deve-se dar atenção a procedimentos silviculturais, que favorecem a produção e a eficiência do volume comercial da árvore sem casca (VCASC), do volume total da árvore sem casca (VTASC) e do diâmetro à altura do peito (DAP). Os fatores relacionados às condições operacionais na serraria – tipos de dentes, tensões das lâminas, qualidade das toras e treinamento de operários – não foram avaliados.

4 – CONCLUSÃO

Para as avaliações do rendimento de madeira das procedências *Tectona grandis*, com nove anos de idade, conclui-se que:

- A forma das árvores de todas as procedências é cônica, por possuírem valores de conicidade maior que 1.
- Há significância estatística ($\alpha \leq 0,05$), nas correlações positivas entre as variáveis dendrométricas diâmetro à altura do peito e altura total com as variáveis de rendimento de madeira serrada, volume total da árvore sem casca, volume comercial da árvore sem casca, volume de madeira serrada, volume de resíduo de serraria e rendimento total da árvore sem casca. Porém, a variável rendimento comercial da árvore sem casca correlacionou-se negativamente diâmetro à altura do peito, altura total, volume total da árvore sem casca, volume comercial da árvore sem casca, volume de madeira serrada, volume de resíduo de serraria e rendimento total da árvore sem casca.

- O valor do rendimento de resíduos sólidos de serraria de 62,57% é considerado um valor alto, apesar da alta tecnologia utilizada no desdobro das toras das árvores.
- Das avaliações da madeira das seis procedências, constatou-se que as médias das procedências MT-00, MT-01, MT-02 e MT-08, para as variáveis do rendimento de desdobro de madeira serrada são estatisticamente iguais entre si, porém, maiores e estatisticamente diferentes das médias das procedências MT-SE e MT-80 para a maioria das variáveis associadas a maximização da produção de volume de madeira.
- A técnica de análise multivariada de dados *two step cluster* fez a classificação escalonável que revelou dois cluster (agrupamentos) com base nos dados das variáveis dendrométricas e das variáveis de rendimento de desdobro, com os quais foi possível determinar que o clone MT-08 é o mais importante quanto ao rendimento de madeira serrada.

CAPÍTULO II: EFEITO DAS PROCEDÊNCIAS SOBRE AS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DA MADEIRA DE *Tectona grandis*

1 – INTRODUÇÃO

A madeira é usada como material na construção de habitações e de infraestrutura desde os primórdios da civilização humana, devido ao custo e a facilidade de utilização, se comparado a materiais como metais e minerais. Hoje o avanço tecnológico confirma as qualidades da madeira e a sua equivalência a material como aço e concreto, em características de resistência, de ambiência e de segurança.

Assim frente a grande diversidade de espécies e de suas especificidades de constituintes e adaptações ao meio ambiente, faz-se necessário estudos para dar a adequada utilização da madeira em função de suas características de constituição, com utilização de técnicas de análises de material. O avanço tecnológico vem incorporando moderníssimas ferramentas analíticas, na busca de redução de tempo e custo. Porém, as técnicas tradicionais ainda são referências e fornecem dados bases para comparação com os resultados obtidos com as novas técnicas.

As propriedades anatômicas, físicas, químicas e mecânicas são fundamentais na seleção de materiais para múltiplos usos. Caixeta et al. (2003) estudando propriedades e classificação da madeira aplicadas à seleção de genótipos de *Eucalyptus*, para definir o potencial para uso múltiplo de novos clones, constataram que recentemente alguns pesquisadores no Brasil procuraram investigar as propriedades da madeira, por meio de técnicas que possibilitem a avaliação de um conjunto das características, tais como densidade básica, teor de lignina e elementos anatômicos, simultaneamente. Entretanto, propriedades como resistência mecânica e retratibilidade da madeira, que são consideradas importantes para vários usos, não foram consideradas nas análises. Como o uso da madeira de eucalipto está se tornando cada vez mais diversificado, essas características devem ser incluídas em pesquisas que envolvam a seleção de material a sua utilização na fabricação de produtos sólidos.

Kedharnath et al. (1963) consideram que a seleção de árvores superiores de *Tectona grandis* baseia-se em critérios como crescimento em altura e diâmetro, fuste reto, livre de grã reversa, copa bem desenvolvida, com folhagem grande e ramos relativamente pequenos, e resistência ao ataque de desfolhadores. Estas são características óbvias e desejáveis a cada árvore de uma floresta com teca. No entanto, além destas características as árvores também devem ser capazes de produzir a madeira com resistência, estabilidade, durabilidade superior à média, conferindo a madeira de teca qualidade e aparência.

Pinto (2007) estudando propriedades e características da madeira de *Tectona grandis* em função da idade observou, baixa anisotropia, determinada a partir de baixos coeficientes de retração radial e tangencial. A densidade aparente, para árvores com a idade de 10 anos correlacionou-se significativamente com a resistência a compressão, com o módulo de elasticidade, com a flexão e com resistência a tração, classificando-a como madeira adequada ao desdobro, com uso da madeira juvenil na produção de móveis. A densidade média aos 30 anos qualifica a madeira com predominância de lenho adulto para a produção de peças estruturais.

Floréz et al. (2014) em caracterização de madeira jovem de *Tectona grandis*, plantada no Brasil, chegaram a resultados que demonstram que, embora seja de madeira jovem, as características da madeira plantada no Brasil assemelham-se a madeira de teca de indivíduos adultos, considerando os locais de plantio e a origem da espécie. O valor médio da densidade de base está dentro da gama encontrada por outros autores em plantações de teca em várias localidades onde esta espécie é cultivada. Os valores de contrações, considerado baixo, corroboram a adequação desta madeira de forma independente da idade da árvore para o tipo de aplicações que requerem uma elevada estabilidade dimensional. Os valores das propriedades mecânicas foram considerados similares as da madeira madura, citadas por outros autores, principalmente para rigidez de madeira, MOE em flexão, cujo valor foi elevado, considerando a idade do material estudado.

Este capítulo tem por objetivo avaliar as características anatômicas, físicas, químicas e mecânicas da madeira dos clones de *Tectona grandis* por técnicas convencionais de análises, para identificar se as procedências, possuem características tecnológicas adequadas a indústria de base florestal.

2 – MATERIAL E MÉTODOS

2.1 – MATERIAL DE ESTUDO

Foram analisadas as madeiras de *Tectona grandis* de cinco clones MT-00, MT-01, MT-02, MT-08, MT-80 e mais a madeira de árvores de origem seminal – MT-SE.

As amostras das parcelas para os ensaios de anatomia e química foram retiradas dos discos do topo da primeira seção das toras dos fustes (Figura 2.1-A). As amostras para os ensaios físicos e mecânicos foram retiradas dos blocos de madeira da primeira seção de tora, entre 0,10 e 2,3 m do fuste, em porção correspondente a 45 cm abaixo e 45 cm acima do diâmetro à altura do peito (DAP) das árvores (Figura 2.1-B e Figura 2.1-C).

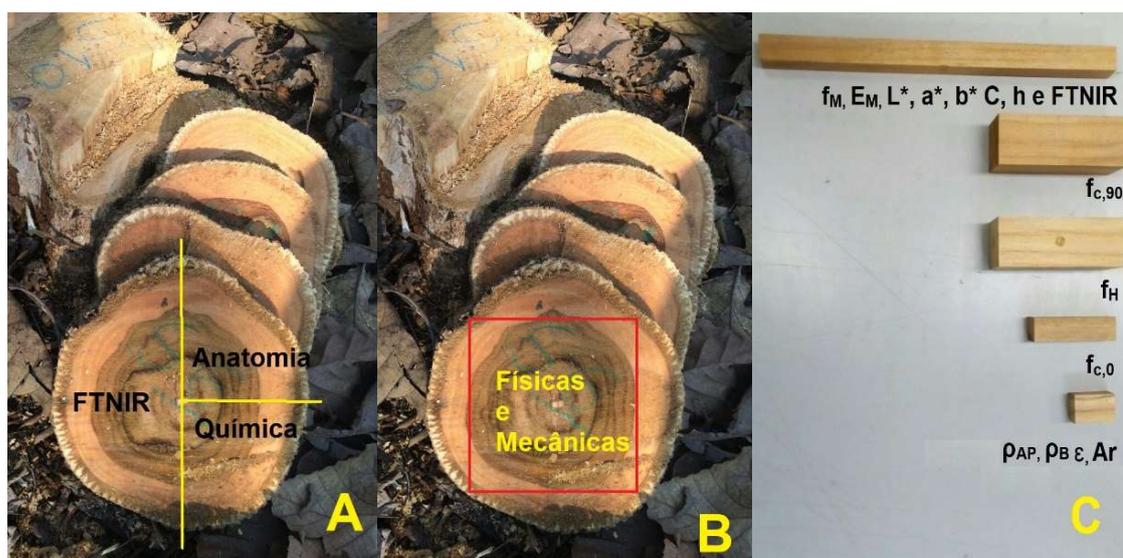


Figura 2.1 – Amostragem dos clones de *Tectona grandis*. (A) Secções de retirada de corpos de prova para caracterização anatômica e química. (B) Secções para retirada dos corpos de prova para caracterização físicas e mecânicas. (C) Corpos de prova para caracterização física, mecânica, organoléptica e FTNIR.

2.2 – CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA DE PROCEDÊNCIAS DE *Tectona grandis*

2.2.1 – Características Anatômicas

As características anatômicas avaliadas foram anatomia por microscopia, com caracterização de dimensões de elementos de vasos e de dimensões de fibras e anatomia por difração de raios-X, para a estimativa do ângulo microfibrilar de celulose (MFA).

O planejamento dos ensaios para a caracterização anatômica, por técnicas convencionais foram em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com seis tratamentos (os cinco clones e mais as árvores produzidas a partir de material seminal de *Tectona grandis*) e cinco repetições, 30 parcelas. Sendo três amostras por parcela (cerne, região intermediária e alburno), totalizando 90 amostras. Com desdobramento dos graus de liberdade dos tratamentos em esquema fatorial 6 x 3, onde o primeiro fator (fator 1) foram as procedências, os clones mais o material seminal, em 6 níveis (MT-00, MT-01, MT-02, MT-08, MT-80 e MT-SE) e o segundo fator (fator 2) foram as camadas do perfil radial dos discos, em três níveis (cerne, intermediária e alburno), sendo a única propriedade em que as três camadas do perfil radial foram analisadas.

2.2.1.1 – Microscopia na avaliação de caracteres anatômicos

Para a individualização das células, com parte dos discos de madeira sólida foram feitos palitos, com 15 mm de espessura e 50 mm de altura, para a maceração e confecção de três lâminas temporárias, por parcela (camadas do perfil radial - cerne, intermediária e alburno), totalizando 90 lâminas ou amostras, para a caracterização microscópica do lenho (Figura 2.2-A), pela metodologia de Johansen (1940).

Na caracterização microscópica a terminologia, as contagens e as mensurações seguiram recomendações da COPANT (1969), da COPANT (1971) e de Coradin e Muñiz (1992). As análises também seguiram as orientações de IAWA *Committee* (1989), com adaptações de metodologias de Benjamin (2006), Zerbini (2008) e Ribeiro et al. (2011).

As medições dos caracteres anatômicos foram realizadas com microscópio de luz e ocular micrométrica Olympus BH2, com câmera DP25, marca Olympus, fabricada no Japão, com lentes DPlan – 4, 10 e 40, marca Olympus, e com coleta de imagens digitais, cinco imagens por lâmina, totalizando 450 imagens, este estudo foi realizado no Laboratório de Produtos Florestais – LPF, do Serviço Florestal Brasileiro (Figura 2.2-B).

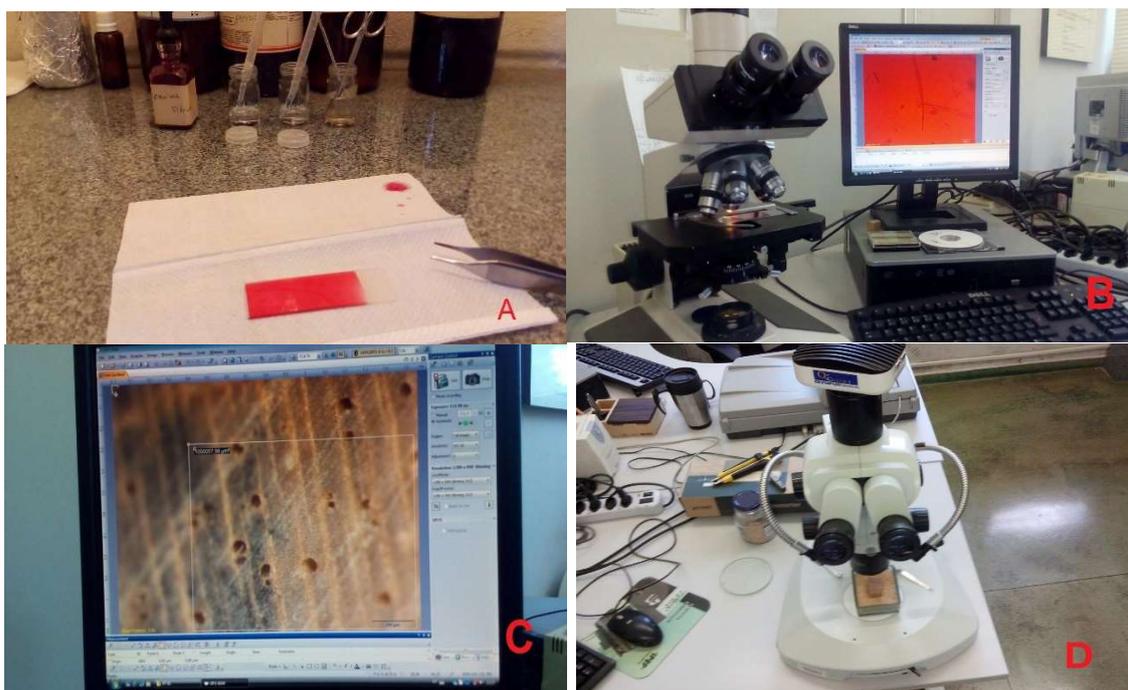


Figura 2.2 – Caracterização microscópica do lenho de *Tectona grandis*. Confeção de lâminas temporárias a partir de macerado (A). Medições e fotografias dos caracteres anatômicos, com o programa Olympus DP2 - BSW (B). Quadrilátero para contagem da frequência de vasos (C). E lupa Olympus (D).

As seguintes variáveis foram analisadas na caracterização microscópica. Fibras: comprimento da fibra (CF), μm , com lente de 4x; largura da fibra (LF), μm , com lente de 40x; espessura das paredes da fibra (EPF), μm , com lente de 40x; e diâmetro do lume (DL), μm , com lente de 40x. A espessura das paredes da fibra foi determinada pela diferença entre a largura da fibra e o diâmetro do lume, dividida por dois. Vasos: comprimento de elemento de vaso (CEV), μm , com lente de 10x. As medições das variáveis diâmetro tangencial do lume (DT), μm e frequência de vasos (FV), n.mm^{-2} , foram com as amostras sólidas – em um quarto dos discos, utilizando o estéreo microscópio - lupa Olympus SZX7, com câmera Olympus DP25, e com objetivas parfocais de 1x, oculares de 10x e *zoom* de 5,6x, com ampliação total de 56x. A determinação da frequência de vasos foi pela contagem do número de vasos em um polígono quadrilátero com 1 mm^2 . O valor de cada variável é a média de 10 leituras. Os dados das variáveis microscópicas foram mensurados com o programa Olympus DP2 - BSW.

2.2.1.2 – Anatomia por difração de raios-X para estimativa do ângulo microfibrilar

Para a estimativa do ângulo microfibrilar de celulose (MFA) utilizou-se 1/8 (um oitavo) de cada disco de madeira que foram desdobrados com lâminas de aço em plainas e cutelos para formar maravalhas, com distinção de material para amostras, em função das procedências e das camadas do perfil radial do lenho, cerne, intermediária e alburno. Cada camada do perfil da amostra foi moída em moinho Wiley, e depois peneirada em peneira para análise granulométrica de 100 mesh (Figura 2.3-A). O pó da madeira que passou da peneira foi acondicionado em microtubos identificados em função dos tratamentos, procedências e perfil radial (Figura 2.3-B), até a montagem das lâminas de análise (Figura 2.3-C).

As análises das amostras para obtenção do espectro apresentado no difratograma, onde os picos representam os cristais contidos na parede celular das fibras (Figura 2.3-F), foram no equipamento Ultima IV – *X-Ray Diffractometer* marca Rigaku, fabricada no Japão (Figura 2.3-D e Figura 2.3-E), com processamento de dados nos programas *Standard Measurement* e JADE 9, para obtenção do valor de 2θ (ângulo de difração) para 100% da intensidade de difração do pico de cada amostra. Os parâmetros de análise no equipamento de difração de raios-X (DRX) foram: o intervalo de varredura de 2θ entre 15 e 30°; a velocidade de varredura de 5° min⁻¹.; e o passo – intervalo entre registros – de 0,05°. Essas análises foram feitas no Laboratório de Difração de Raios-X, do Instituto de Geociências da UnB.

Com o valor do ponto máximo do pico, do conjunto de pontos do difratograma, formado pelos valores dos ângulos de difração e das intensidades de difração, para o intervalo de 15° a 30°, foram estimados o ângulo microfibrilar, determinado com a equação 2.1, de Cave (1966), com adaptações, para obtenção do ângulo microfibrilar de celulose (MFA). Essa fórmula tem como base o valor de 2θ . O modelo de Cave (1966) também foi utilizado por Hein (2011), para estimativa do ângulo microfibrilar de celulose (MFA), de *Eucalyptus*

$$\text{MFA} = 0,6 \times 2\theta \quad (2.1)$$

Onde:

- MFA = ângulo microfibrilar estimado, ° (graus); e
- 2θ = ângulo de difração do feixe de raios-X, em relação a normal, ° (graus).

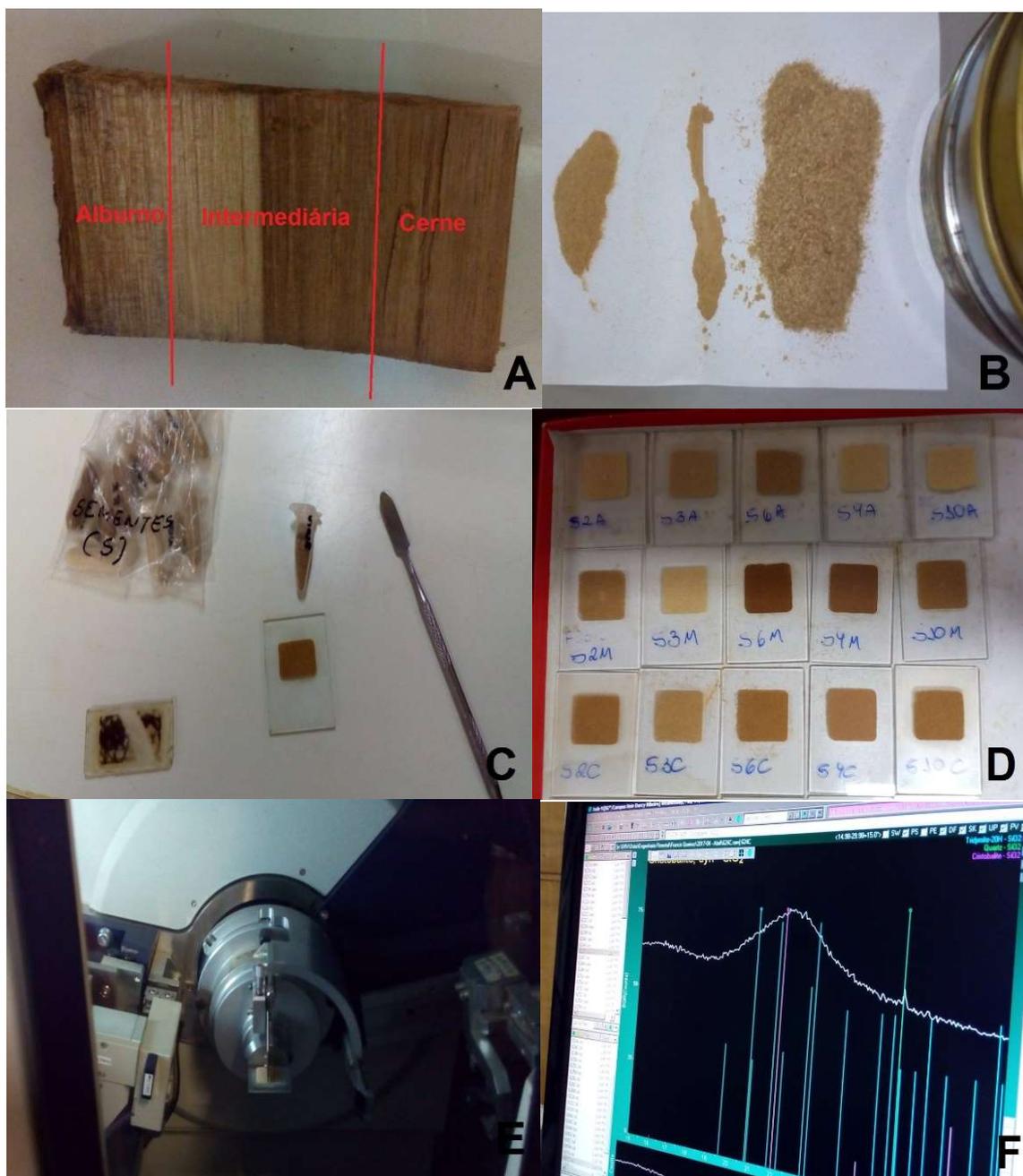


Figura 2.3 – Análise por DRX - amostra da madeira de *Tectona grandis* (A), amostra da madeira moída (B), madeira moída acondicionada em microtubo, sendo montada na lâmina de análise (C), lâminas montadas para análise (D), análise da amostra no difratômetro de raios-X (E) e difratograma processado com o Software JADE 9 (F).

2.2.2 – Propriedades químicas

2.2.2.1 – Componentes químicos

Os componentes químicos foram analisados em amostras de 30 árvores de *Tectona grandis*, com seis tratamentos (procedências) e com cinco repetições, com delineamento inteiramente casualizado (DIC). As amostras foram retiradas de um

quarto ($\frac{1}{4}$) dos discos, com cinco centímetros de espessura, do topo da primeira secção do fuste de cada árvore. Os um quarto dos discos, sem casca, foram transformados em cavacos e em seguida reduzidos a pó, em moinho de facas tipo Willey, para compor três amostras, para cada parcela, totalizando 90 amostras.

As metodologias e normas utilizadas para a determinação dos constituintes: extrativos, cinzas sem extrativos e lignina (Figura 2.4), são as mesmas adotadas por Moreira (2012), e foram determinadas no Laboratório de Produtos Florestais – LPF, do Serviço Florestal Brasileiro.

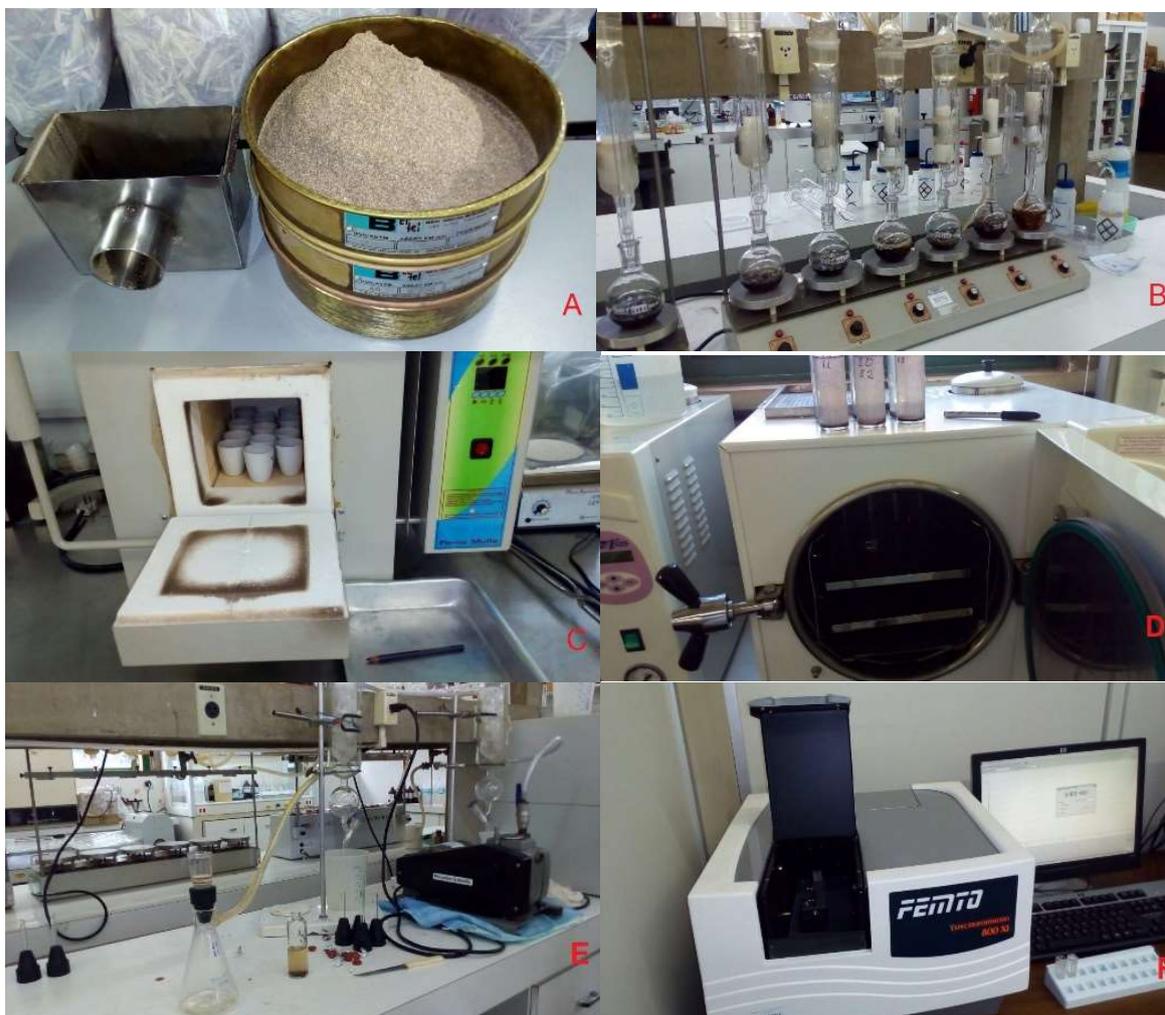


Figura 2.4 – Constituintes químicos: preparação de amostras (A); teor de extrativos (B); teor de cinzas, sem extrativos (C); hidrólise ácida para separar lignina (D); filtragem da lignina insolúvel (E); leitura de absorbância para determinação do teor de lignina solúvel (F).

2.2.2.2 – Extrativos

A metodologia para determinação de extrativos seguiu as orientações da TAPPI 204 om-88, com adaptações. O cálculo do teor de extrativos em Etanol:Tolueno (1:2) foi conforme a Equação 2.2 da metodologia de Moreira (2012).

$$EX = \frac{m_2 - m_1}{m_u} \times 100 \quad (2.2)$$

Onde:

- EX = extrativos (etanol:tolueno), %;
- m_u = massa da amostra descontada a umidade, g;
- m_1 = 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.

2.2.2.3 – Cinzas sem extrativos

Para a determinação de cinzas sem extrativos foi utilizada a norma TAPPI T211 om-93. O cálculo do teor de cinzas foi determinado conforme a Equação 2.3, usada por Moreira (2012).

$$CZ_{525^\circ} = \frac{m_1 - m_0}{m} \times 100 \quad (2.3)$$

Onde:

- CZ_{525° = cinzas sem extrativos, em porcentual, %;
- m = massa da amostra a 0 % de umidade, g;
- m_0 = massa do cadinho, g;
- m_1 = massa do cadinho + amostra calcinada a 525 °C, g.

2.2.2.4 – Lignina

Para realizar as operações de isolamento de ligninas ácidas (Ligninas Klason), as amostras foram submetidas à limpeza inicial com etanol:tolueno, com limpeza com etanol e posteriormente com água quente, para extração de extrativos, conforme norma TAPPI 204 om-88, utilizada por Moreira (2012).

2.2.2.4a – Lignina insolúvel

A determinação da lignina insolúvel foi pela Equação 2.4, utilizada por Moreira (2012).

$$L_I = \frac{m_2 - m_1}{m_u} \times 100 \quad (2.4)$$

Onde:

- L_I = lignina insolúvel, em porcentual, %;
- m_u = massa da amostra descontada a umidade, g;
- m_1 = massa do cadinho filtrante, g;
- m_2 = massa do cadinho filtrante + lignina insolúvel descontadas as cinzas livre de extrativos; g.

2.2.2.4b – Lignina solúvel

O teor de lignina solúvel foi determinado pela Equação 2.5, usada por Moreira (2012).

$$L_S = \frac{\frac{A}{100} \times F \times \frac{87}{1000}}{m_u} \times 100 \quad (2.5)$$

Onde:

- L_S = lignina solúvel, em porcentual, %;
- m_u = massa da amostra descontada a umidade;
- A = absorvância, lida em espectrofotômetro;
- F = fator de diluição.

2.2.2.4c – Lignina total

A lignina total é o somatório do teor de lignina insolúvel e do teor de lignina solúvel, conforme a Equação 2.6.

$$L = L_S + L_I \quad (2.6)$$

Onde:

- L = lignina total, %;
- L_S = lignina insolúvel em porcentual, %;

- L_s = lignina solúvel em porcentual, %.

2.2.2.5 – Holocelulose

A holocelulose livre de extrativos, fora calculada por diferença, onde se subtrai de 100%, os percentuais de lignina total e de cinzas livres de extrativos, conforme a Equação 2.7.

$$HOL = 100 - L - CZ_{525^\circ} \quad (2.7)$$

Onde:

- HOL = holocelulose, %;
- L = lignina total, %;
- CZ_{525° = cinzas sem extrativos em porcentual, %;

2.2.3 – Propriedades físicas

2.2.3.1 – Ensaio físicos

As dimensões e quantidades dos corpos de prova para os ensaios das propriedades físicas foram em conformidade com a norma NBR 7190 (1997), considerando as seis procedências, 30 árvores, cinco repetições e duas amostras por árvore (camadas do perfil radial – cerne e intermediária), em DIC, com arranjo fatorial 6 x 2, sendo, o fator 1, as seis procedências e o fator 2, as duas camadas do perfil radial. Totalizando 60 amostras. Para as propriedades físicas e mecânicas não foi possível confeccionar os corpos de prova com as dimensões requeridas pelas normas para a camada alburno, devido ao modelo de desdobro na serraria, que produziu sarrafos com altura e larguras inferiores a 30 mm.

Da tora seccionada entre 0,10 e 2,40 m do fuste foram retirados os corpos de prova, com dimensões 5,0 x 2,0 x 3,0 cm, com 5,0 cm de comprimento (axial), 2,0 cm de largura (tangencial) e 3,0 cm de altura (radial). As dimensões nos sentidos, axial, tangencial e radial dos corpos de prova foram medidas com paquímetro digital (Figura 2.5-C). E a massa de cada corpo de prova foi mensurada em balança analítica (Figura 2.5-D).

A sequência dos ensaios físicos foi pela determinação da densidade aparente, com a secagem da madeira (Figura 2.5-A), pela saturação das amostras

em água destilada (Figura 2.5-B), seguidas da determinação da densidade básica e da determinação das variáveis relacionadas as variações dimensionais da madeira de teca.



Figura 2.5 – Ensaio das propriedades físicas da madeira de seis procedências de *Tectona grandis*, com nove anos de idade: secagem da madeira (A); saturação dos corpos de prova em água (B); medidas das dimensões com paquímetro (C); e mensuração da massa em balança analítica (D).

2.2.3.2 – Densidade aparente

Os cálculos analíticos utilizados para obtenção da densidade aparente foram em conformidade com a Equação (2.8).

$$\rho_{AP} = \frac{m}{v} \quad (2.8)$$

Onde:

- ρ_{AP} = densidade aparente, kg.m^{-3} ;
- m = massa a 12% de umidade, kg;
- v = volume a 12% de umidade, m^3 .

2.2.3.3 – Densidade básica

A densidade básica foi calculada conforme a Equação 2.9.

$$\rho_B = \frac{m_s}{V_{sat}} \quad (2.9)$$

Onde:

- densidade básica (ρ_B), kg.m^{-3} ;
- m_s = massa seca a 0% de umidade, kg;
- V_{sat} = volume saturado, m^3 .

2.2.3.4 – Variação dimensional da madeira

Foram avaliados os inchamentos lineares, as retrações lineares nos sentidos longitudinal, tangencial e radial, bem como a variação volumétrica. Com os dados das retrações foi calculado o coeficiente de anisotropia de retração de cada procedência.

A estabilidade dimensional da madeira é caracterizada pelas propriedades de retração e de inchamento considerando a madeira, como um material ortótropo, com direções preferenciais 1, 2 e 3, correspondentes às direções axial, radial e tangencial, respectivamente.

As deformações específicas de retração (ϵ_r) e de inchamento (ϵ_i) são consideradas como índices de estabilidade dimensional e foram determinadas, para cada uma das direções, sendo: a retração axial, a retração radial, retração tangencial, inchamento axial, o inchamento radial e o inchamento tangencial, e em função das suas respectivas dimensões da madeira saturada e seca, foram calculadas com as equações 2.10, 2.11, 2.12, 2.13, 2.14 e 2.15, conforme a norma NBR 7190 (1997).

$$\epsilon_{r,1} = \left(\frac{l_{1,sat} - l_{1,seca}}{l_{1,sat}} \right) \times 100 \quad (2.10)$$

$$\epsilon_{r,2} = \left(\frac{l_{2,sat} - l_{2,seca}}{l_{2,sat}} \right) \times 100 \quad (2.11)$$

$$\epsilon_{r,3} = \left(\frac{l_{3,sat} - l_{3,seca}}{l_{3,sat}} \right) \times 100 \quad (2.12)$$

$$\varepsilon_{i,1} = \left(\frac{l_{1,sat} - l_{1,seca}}{l_{1,seca}} \right) \times 100 \quad (2.13)$$

$$\varepsilon_{i,2} = \left(\frac{l_{2,sat} - l_{2,seca}}{l_{2,seca}} \right) \times 100 \quad (2.14)$$

$$\varepsilon_{i,3} = \left(\frac{l_{3,sat} - l_{3,seca}}{l_{3,seca}} \right) \times 100 \quad (2.15)$$

Onde:

- ε_r = retração, %;
- ε_i = inchamento, %;
- L = dimensão das direções preferenciais, m.

A variação volumétrica foi determinada em função das dimensões dos corpos de prova nos estados saturado e seco, e calculado pela Equação 2.16.

$$\Delta V = \left(\frac{v_{sat} - v_{seca}}{v_{seca}} \right) \times 100 \quad (2.16)$$

$$V_{sat} = l_{1sat} \times l_{2sat} \times l_{3sat} \quad (2.17)$$

$$V_{seca} = l_{1seca} \times l_{2seca} \times l_{3seca} \quad (2.18)$$

Onde:

- Δv = variação volumétrica, %;
- V_{sat} = volume saturado, cm^3 - Equação 2.17;
- V_{seca} = volume seco, cm^3 - Equação 2.18.

Considerando que a madeira incha e retrai desigualmente em função dos sentidos anatômicos tangencial, radial e longitudinal, tem-se um desbalanceamento entre as retrações e os inchamentos o qual denomina-se anisotropia dimensional, que é determinado pelo fator ou coeficiente anisotrópico, conforme equação 2.19 descrita por Moreschi (2014).

$$A_r \text{ ou } A_i = \frac{\varepsilon_{i3} \text{ ou } \varepsilon_{r3}}{\varepsilon_{i2} \text{ ou } \varepsilon_{r2}} \quad (2.19)$$

- A_r = anisotropia dimensional de retração, (a_r); ou
- A_i = anisotropia dimensional de inchamento, (a_i);
- ε_{i3} ou ε_{r3} = inchamento ou retração tangencial, %;
- ε_{i2} ou ε_{r2} = inchamento ou retração radial, %.

2.2.4 – Propriedades mecânicas

2.2.4.1 – Variáveis das propriedades mecânicas

A caracterização das propriedades mecânicas da madeira de teca foi conforme a norma ASTM D143 – 94 (2000). Foram analisados os seis tratamentos, com cinco repetições, com duas amostras, por parcelas, para cada posição do perfil radial (cerne e intermediária), em DIC, com desdobramento do grau de liberdade em fatorial 6 x 2, fator 1 (as seis procedências) e fator 2 (as duas camadas do perfil radial). Totalizando 60 amostras, por ensaio.

Os corpos de prova das caracterizações foram retirados das toras seccionados entre 0,10 e 2,4 m do fuste, e foram climatizados para alcançarem a condição padrão de umidade de 12%.



Figura 2.6 – Ensaio mecânicos da madeira das seis procedências de *Tectona grandis*: resistência à compressão paralela às fibras (A); resistência à compressão normal às fibras (B); flexão estática (C); e dureza Janka (D).

Os ensaios de caracterizações mecânicas foram realizados no Laboratório de Tecnologia da Madeira, do Departamento de Engenharia Florestal, da UnB, com a máquina universal de ensaios da EMIC, linha DL, com 300 kN de capacidade máxima. E com os dados processados no programa TESC, versão 3.04.

2.2.4.2 – Resistência à compressão paralela às fibras

A resistência à compressão paralela às fibras ($f_{wc,0}$ ou $f_{c,0}$) é dada pela máxima tensão de compressão que pode atuar em um corpo de prova. Conforme a norma padrão ASTM D143 – 94 (2000).

A resistência à compressão paralela às fibras foi determinada pela Equação 2.20.

$$f_{C,0} = \frac{f_{c0,máx}}{a} \quad (2.20)$$

Onde:

- $f_{c,0}$ = resistência à compressão paralela às fibras, N.mm⁻² ou MPa;
- $f_{c0,máx}$ = máxima força de compressão, aplicada ao corpo de prova durante o ensaio, N;
- a = área inicial da seção transversal comprimida, mm².

A execução do ensaio foi em corpos de prova com medidas de 25 x 25 x 100 mm, sentidos radial, tangencial e longitudinal, usando célula de carga de 300 kN, com velocidade de ensaio de 0,003 mm.mm (comprimento no sentido axial (mm) X 0,003 (mm) = comprimento nominal do espécime por minuto) e com a carga aplicada na face transversal (sentido axial).

2.2.4.3 – Resistência à compressão normal (perpendicular às fibras)

A resistência à compressão normal ou perpendicular às fibras ($f_{wc,90}$ ou f_{c90}) é o valor convencional determinado pela deformação específica residual de 2‰, obtida em um ensaio de compressão uniforme em corpos de prova prismáticos. A

obtenção da resistência à compressão normal foi conforme procedimentos de norma padrão ASTM D143 – 94 (2000).

A resistência convencional à compressão normal às fibras f_{c90} , é dada pela Equação (2.21).

$$f_{c, 90} = \frac{f_{c,90,lp}}{a} \quad (2.21)$$

Onde:

- ($f_{wc,90}$ ou $f_{c,90}$) = compressão normal às fibras; N.mm⁻² ou MPa;
- $f_{c,90,lp}$ = força no limite proporcional de elasticidade da compressão, aplicada ao corpo de prova durante o ensaio, N;
- a = área inicial da seção transversal comprimida, mm².

A execução do ensaio foi em corpos de prova com medidas de 50 x 50 x 150 mm, sentidos radial, tangencial e longitudinal; com distribuidor de carga de 56,20 mm; usando célula de carga de 300 kN; com a velocidade de ensaio de 0,305 mm.min⁻¹; e com a carga aplicada na face tangencial (sentido radial).

2.2.4.4 – Flexão estática

A resistência da madeira à flexão ou módulo de ruptura (f_{wM} ou f_M) é um valor convencional, dado pela máxima tensão que pode atuar em um corpo de prova no ensaio de flexão simples, calculado com a hipótese da madeira ser um material elástico. Os ensaios de flexão foram de acordo com os procedimentos padrão ASTM D143 – 94 (2000).

Na realização do ensaio, os corpos de prova das caracterizações foram com dimensões de 25 x 25 x 410 mm, sentidos radial, tangencial e longitudinal, reduzidos, considerando à condição padrão de umidade de 12%; usando a célula de carga de 300 kN; com a velocidade de ensaio de 1,3 mm.min⁻¹; e com a carga aplicada na face tangencial (sentido radial).

A resistência da madeira à flexão estática é dada pela Equação 2.22.

$$f_M = \frac{M_{m\acute{a}x}}{W_e} \quad (2.22)$$

Onde:

- f_M - módulo de ruptura, $N.mm^{-2}$ ou MPa;
- $M_{máx.}$ = máximo momento aplicado ao corpo de prova, Nm;
- W_e = módulo de resistência elástico da seção transversal do corpo de prova, dado por $(b \times h^2 / 6)$, m^3 .

A rigidez da madeira à flexão estática foi caracterizada pelo módulo de elasticidade determinado no trecho linear do diagrama carga x deslocamento. Para esta finalidade o módulo de elasticidade deve ser determinado pela inclinação da reta secante à curva carga x deslocamento no meio do vão, definida pelos pontos ($F_{10\%}; v_{10\%}$) e ($F_{50\%}; v_{50\%}$) correspondentes, respectivamente, a 10% e 50% da carga máxima de ensaio, estimada em um corpo de prova gêmeo, e dado pela Equação 2.23.

$$E_M = \frac{(f_{M,10\%} - f_{M,50\%}) l^3}{(v_{,10\%} - v_{,50\%}) 4 b \times h^3} \quad (2.23)$$

Onde:

- E_M = módulo de elasticidade, $N.mm^{-2}$ ou MPa;
- $f_{M,10\%}$ e $f_{M,50\%}$ = cargas correspondentes a 10% e 50% da carga máxima, aplicada ao corpo de prova, em Newtons (N), representadas pelos pontos do diagrama de carregamento;
- $v_{,10\%}$ e $v_{,50\%}$ = deslocamentos no meio do vão correspondentes a 10% e 50% da carga máxima, mm;
- b e h = correspondem, respectivamente, à largura e à altura da seção transversal do corpo de prova, mm.

2.2.4.5 – Dureza

A dureza Janka da madeira (f_{WH} ou f_H) foi determinada convencionalmente pela tensão atuante em uma das faces de um corpo de prova prismático, produz a penetração de uma semiesfera de aço com área diametral de 1 cm^2 , com procedimentos de padrão ASTM D143 – 94 (2000). O cálculo da dureza foi pela Equação 2.24.

$$f_H = \frac{F_{\text{máx}}}{A_{\text{seção diametral}}} \quad (2.25)$$

Onde:

- f_{wH} ou f_H = dureza da madeira, MPa;
- $F_{\text{máx}}$ = máxima força aplicada ao corpo de prova necessária à penetração de uma semiesfera de seção diametral com 1 cm² de área na profundidade igual ao seu raio, N;
- $A_{\text{seção diametral}}$ = área da seção diametral da esfera, igual a 100 mm² = 1 cm².

O ensaio de dureza foi em corpos de prova com medidas de 50 x 50 x 150 mm, sentidos radial, tangencial e longitudinal, usando célula de carga de 300 kN, com a velocidade de ensaio de 6 mm.min⁻¹, com duas cargas aplicadas na face tangencial (sentido radial), duas cargas aplicadas na face radial (sentido tangencial) e uma carga aplicada em cada face transversal (sentido axial), obtidas com a máquina universal de ensaio, utilizando sensor acoplado ao dispositivo de dureza.

2.2.5 – Propriedades organolépticas por colorimetria – CIELab – Cor da madeira

Metodologia para determinação da cor da madeira dos clones de teca foi obtida pela técnica de colorimetria, sistema CIELab (1976), usado para descrever matematicamente as cores, o mesmo sistema adotado por Camargos e Gonzalez (2001), no qual é mensurada a curva espectral ou espectrométrica com o aparelho espectrofotômetro, que mede a refletância da luz sobre a amostra.

O aparelho utilizado no ensaio para medir as cores dos corpos de prova foi o espectrofotômetro portátil COLOR Eye XTH – Gretag Macbeth, de refletância difusa no intervalo visível do espectro eletromagnético, com iluminante D65 e com ângulo de 10° (Figura 2.7-A), do Laboratório de Tecnologia da Madeira do Departamento de Engenharia Florestal da Faculdade de Tecnologia da UnB. As variáveis cromáticas avaliadas foram: L* claridade (preto = 0 e branco = 100); a* coordenada no eixo vermelho (+) – verde (-); b* coordenada no eixo amarelo (+) – azul (-); C saturação, croma (intensidade de cor – pura ou misturada); e h* tonalidade (ângulo de tinta - cor). As medidas foram feitas na face tangencial, sendo três leituras no cerne e três leituras no alburno, totalizando 180 leituras, na região espectral entre 360 e 750 nm. O espectrofotômetro acoplado a um computador,

com o software Color iControl processou automaticamente os dados de cada variável (Figura 2.7-B).

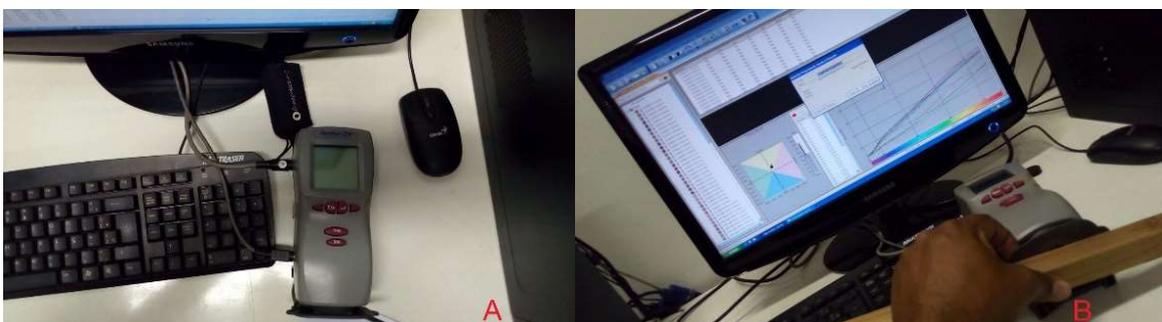


Figura 2.7 – Equipamento espectrofotômetro portátil COLOR Eye XTH – Gretag Macbeth (A) e Panorâmica de coleta de espectros da amostra de madeira de *Tectona grandis* no espectrofotômetro, com visualização de dados e gráficos processados no *Software* Color iControl (B).

Os dados das radiações foram exportados do iControl para o programa Excel, da Microsoft, onde foram organizados conforme o delineamento experimental, e então, foram transferidos para análises estatística no programa SPSS, da IBM, para obtenção das médias de cada variável, que formam grupos de cores, para as suas classificações, conforme a tabela de cores de Camargos e Gonzalez (2001). Pelo enquadramento em grupo, em função das médias obtidas por variável cromática, determina-se a cor de cada procedência da madeira de *Tectona grandis*.

2.3 – ANÁLISE ESTATÍSTICA

A estatística dos dados começou pela análise exploratória, para busca de dados *outlier* (valores extremos). Após a retirada dos dados fora do intervalo de 5% de significância, fez-se os testes de normalidade de Kolmogorov-Smirnov – para população com número de observações maiores que 50, e de Shapiro-Wilk – para população com número de observações menores que 50. Com a confirmação da distribuição normal dos dados, fez-se a análise de variância pelo teste F, com DIC e com desdobramento de grau de liberdade em esquema fatorial, para as variáveis das propriedades anatômicas, físicas e mecânicas, com processamento de dados no programa SPSS, versão 22.

Nos casos de significância estatística menor que 5% ($\alpha \leq 0,05$), foi aplicada a comparação múltipla das médias, pelo teste de Tukey, ao nível de significância de 5%. As variáveis das propriedades avaliadas em esquema fatorial foram analisadas com o programa SPSS 22.

Na avaliação das relações entre as variáveis analisadas por técnicas convencionais, foram determinados os coeficientes de correlação linear de Pearson, com o programa de estatística SPSS, versão 22, com nível de significância estatística de 5%.

Com objetivo de avaliar a importância das variáveis analisadas pela correlação de Pearson, na qualificação e seleção das procedências foi aplicada a técnica de análise multivariada de dados *two step cluster* (agrupamento de duas etapas), para a classificação das procedências, usando o programa de estatística SPSS, versão 22. As variáveis analisadas com a técnica *two step cluster* foram: MFA, CF, EPF, ρ_B , ϵ_3 , f_{C0} , f_M , E_M , EX, L, classificadas como variável contínua – possui distribuição normal – e as procedências, classificadas como variáveis categoria – assume distribuição multinomial.

3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 – CARACTERÍSTICAS ANATÔMICAS

3.1.1 – Microscopia na avaliação de caracteres anatômicos

A Tabela 2.1 mostra a análise de variância e a estatística descritiva dos caracteres anatômicos das seis procedências e do perfil radial da madeira de *Tectona grandis* determinados pela técnica de microscopia. Observa-se que para o fator 1 (procedências), houve diferença significativa ao nível de 1% de significância entre as médias dos tratamentos, para os caracteres de comprimento do elemento de vaso (CEV), diâmetro tangencial do lume (DT), frequência de vasos (FV), comprimento da fibra (CF), diâmetro do lume (DL), espessura das paredes da fibra (EPF) e largura da fibra (LF). Para o fator 2 (camadas do perfil radial), há diferença significativa entre as médias dos tratamentos, cerne, intermediária e alburno, para os caracteres anatômicos de CEV, DT, CF, DL e LF. Quanto a interação entre o fator 1 (procedências) com o fator 2 (camadas do perfil radial) para os caracteres

anatômicos EPF, CF e LF, em pelo menos uma das médias há diferença significativa entre os 2 fatores.

Tabela 2.1 – Resumo da análise de variância e da estatística descritiva, para os caracteres anatômicos, das seis procedências com as camadas do perfil radial de *Tectona grandis* com nove anos de idade, em esquema fatorial 6 x 3.

Análise de Variância e Estatística Descritiva								
Fonte de Variação	GL	CEV (μm)	DT (μm)	FV (n.mm ⁻²)	CF (μm)	DL (μm)	EPF (μm)	LF (μm)
F calculado								
P	5	4,84**	21,12**	21,40**	9,25**	13,22**	13,83**	10,27**
PR	2	35,79**	16,28**	1,49 ^{ns}	78,14**	9,34**	3,19 ^{ns}	11,56**
P X PR	10	1,07 ^{ns}	1,46 ^{ns}	1,17 ^{ns}	2,09*	1,73 ^{ns}	3,12**	2,49*
Média		319,96	104,35	17,00	992,76	17,73	4,32	26,37
“σ”		31,28	30,16	6,25	131,96	2,31	2,99	0,57
Mínimo		239,00	45,73	7,00	631,21	10,00	3,03	21,90
Máximo		383,96	178,81	37,00	1301,78	24,97	5,95	32,10
CV (%)		10,00	28,00	36,00	13,00	13,00	69,00	2,00

CEV: comprimento do elemento de vaso; DT: diâmetro tangencial do lume; FV: frequência de vasos; CF: comprimento da fibra; DL: diâmetro do lume; EPF: espessura das paredes da fibra; LF: largura da fibra; P: procedência; PR: perfil radial; GL: grau de liberdade; σ : desvio padrão; CV: coeficiente de variação; **: significativo ao nível de 1% de significância ($\alpha < 0,01$); *: significativo ao nível de 5% de significância ($0,01 \leq \alpha < 0,05$); ns: não significativo ($\alpha \geq 0,05$).

Para a caracterização da madeira de teca, as médias gerais dos caracteres anatômicos foram: 319,96 μm para o comprimento do elemento de vaso (CEV); 104,35 μm para o diâmetro tangencial do lume (DT); para a frequência de vasos (FV) no número médio por mm^2 foi de 17; 992,76 μm (0,99 mm) para comprimento da fibra (CF); 17,73 μm para diâmetro do lume (DL); 4,32 μm para espessura das paredes da fibra (EPF) e 26,37 μm para largura da fibra (LF). Os valores máximos e mínimos são respectivamente: 239,00 μm e 383,96 μm para comprimento do elemento de vaso (CEV); 178,81 μm e 45,73 μm para diâmetro tangencial do lume (DT); 631,21 μm e 1301,78 μm para o comprimento da fibra (CF); 10,00 μm e 24,97 μm para o diâmetro do lume (DL); 3,03 μm e 5,95 μm para a espessura das paredes

da fibra (EPF); e 21,90 μm e 32,10 μm para a largura da fibra (LF). A contagem máxima e mínima de vasos por mm^2 foi respectivamente de 37 e 7 unidades.

Considerando a classificação de Coradin e Muñiz (1992) com normas e procedimentos em estudos de anatomia de madeira de angiosperma, para o comprimento de fibras, o valor médio geral de 992,76 μm enquadra-se como fibras curtas com comprimento da fibra (CF) entre 900 e 1600 μm . Em função da espessura das suas paredes, as fibras são classificadas como fibras de parede delgadas a espessas, lume com no máximo três vezes o dobro da espessura da parede (2,04X). O diâmetro tangencial do lume (DT) é classificado entre pequenos, menor que 100 μm (para o valor mínimo mensurado de 45,73 μm) a médios, para vasos entre 100 e 200 μm (para o valor máximo mensurado de 178,81 μm). Para a frequência de vasos por mm^2 , em função do valor médio (17 unidades por mm^2) é classificado como, poucos vasos por mm^2 distribuídos em porosidade difusa e em anéis semiporosos demarcados por faixas de parênquima marginal como arranjos radiais, agrupamento solitários e múltiplos, e com conteúdo, obstruídos por substâncias brancas e tilos.

Kedharnath et al. (1963), em avaliação da variação do caractere comprimento de fibra (CF), na madeira de *Tectona grandis* com 60 anos de idade, em duas regiões da Índia, Madras (ao sul) e Bombay (ao oeste), em Burma (hoje Myanmar), chegaram a valores médios de 972,8 μm a 1302,0 μm , na Índia e de 976,8 μm a 1341,8 μm , em Myanmar. Lima et al. (2011a) em estudo das dimensões anatômicas de *Tectona grandis*, com idade de 31 anos, em função do espaçamento e da posição radial da tora, obtiveram 344,00 μm para comprimento de elemento de vaso (CEV), 1007,00 μm para comprimento de fibras (CF), e 5,08 μm para espessura das paredes da fibra (CEV). Constatou-se também que, não houve interação significativa dos caracteres anatômicos, em função do espaçamento com a sua posição radial.

Chagas et al. (2014), em estudo de propriedade da madeira de *Tectona grandis*, plantadas em Santo Antônio do Leverger/MT com diferentes idades 4, 6 e 12 anos, com classe diamétrica entre 9 e 13 cm, produziram resultados com valores médios de: comprimento da fibra (CF) de 940,0 μm para teca com 4 anos, crescendo para 1120,0 μm para teca com 6 anos e decrescendo para 930 μm para teca com 12 anos; espessura da parede da fibra (EPF) com 4,32 μm para teca com

4 anos, crescendo para 4,79 μm para teca com 6 anos e decrescendo para 4,51 μm para teca com 12 anos; diâmetro do lume (DL) com valores entre 11,28 μm aos 6 anos e 15,7 μm aos 4 anos; e largura da fibra (LF) com médias entre 20,87 μm aos 6 anos e 24,35 μm aos 4 anos; diâmetro tangencial do lume (DT) com 121,08 μm , para madeira com 6 anos e 168,08 μm , para madeira com 12 anos; na frequência de vasos (FV) obtiveram 7 unidades por mm^2 , para madeira com 6 anos e 5 unidades por mm^2 para madeira com 12 anos de idade, ambas estatisticamente iguais entre si ao nível de significância de 5% de erro. Os autores concluíram que as idades das árvores não influenciaram nos valores das características anatômicas testadas.

Os valores médios das variáveis anatômicas obtidos neste estudo para a madeira das procedências testadas estão em conformidade com os resultados de Chagas et al. (2014) que estudaram a madeira de *Tectona grandis* com idade de até 13 anos. Porém são menores que os valores obtidos por Kedharnath et al. (1963) e por Lima et al. (2011a), avaliando madeira com idade de respectivamente 60 e 31 anos.

Conforme observa-se na Tabela 2.2 as procedências de *Tectona grandis*, afetaram significativamente os valores médios dos caracteres anatômicos avaliados. Para o comprimento do elemento de vaso (CEV), o tratamento com o maior valor médio foi o MT-01, que também possui o maior valor de média para diâmetro do lume (DL), 20,13 μm . Para o comprimento do elemento de vaso (CEV) as médias das MT-SE, e dos clones MT-00 e MT-02 não diferem estatisticamente entre si, e são estatisticamente diferentes dos clones MT-08 e MT-80. Para o diâmetro tangencial do lume (DT) o tratamento com as maiores médias foram o produzido a partir de sementes, com 135,19 μm e o MT-80, com 116,63 μm , ambos estatisticamente iguais.

Para a espessura das paredes da fibra (EPF), o tratamento com maior média foi o MT-80, 4,94 μm . O tratamento com a maior média para o comprimento da fibra (CF) foi o MT-80, 1121,98 μm . As médias dos tratamentos MT-SE e dos clones MT-01 e MT-02 tem os maiores valores e são estatisticamente iguais entre si para o caractere diâmetro do lume (DL). Para a largura da fibra (LF), as maiores médias são para as MT-SE e para o clone MT-01 e estas são estatisticamente iguais (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 - Resumo das médias e do teste de Tukey, do fator 1 (procedências) e do fator 2 (camadas do perfil radial), para os caracteres anatômicos das procedências de *Tectona grandis* com nove anos de idade.

Médias dos Caracteres Anatômicos							
Fator 1 (procedências)							
Procedências	CEV (μm)	DT (μm)	FV (n.mm ⁻²)	CF (μm)	DL (μm)	EPF (μm)	LF (μm)
MT-SE	322,42 ab	135,19 a	17 ab	1002,16 b	18,91 ab	4,51 b	27,94 a
MT-00	321,69 ab	72,43 c	24 a	921,29 c	16,43 c	4,41 bc	25,25 bc
MT-01	339,98 a	83,95 c	14 cd	994,55 b	20,13 a	3,81 d	27,75 a
MT 02	321,27 ab	113,66 b	10 d	1010,38 b	18,61 ab	4,12 cd	26,85 bc
MT-08	315,97 b	107,18 b	21 ab	943,61 bc	17,74 cd	4,09 cd	25,91 bc
MT-80	305,48 b	116,63 ab	17 bc	1121,98 a	14,63 d	4,94 a	24,51 c

Médias dos Caracteres Anatômicos							
Fator 2 (camadas do perfil radial)							
Perfil Radial	CEV (μm)	DT (μm)	FV (n.mm ⁻²)	CF (μm)	DL (μm)	EPF (μm)	LF (μm)
Cerne	296,68 c	89,25 c	19 a	859,81 c	16,86 b	4,19 a	25,24 b
Intermediária	323,45 b	105,50 b	17 a	0988,95 b	17,75 b	4,44 a	26,63 a
Alburno	343,80 a	117,84 a	16 a	1110,45 a	19,03 a	4,21 a	27,46 a

CEV: comprimento do elemento de vaso; DT: diâmetro tangencial do lume; FV: frequência de vasos; CF: comprimento da fibra; DL: diâmetro do lume; EPF: espessura das paredes da fibra; LF: largura da fibra. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, nas colunas, para o teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Os maiores valores do diâmetro tangencial do lume (DT) são para as procedências MT-SE e MT-80, com 135,19 μm e 116,63 μm , enquanto os menores valores do diâmetro tangencial do lume (DT) são para os clones MT-00 e MT-01, ambos estatisticamente iguais, com valores de respectivamente 72,43 μm e 83,95 μm . Para a frequência de vasos (FV) o tratamento MT-02 é o que possui a menor contagem de vasos, 10 unidades por mm². Burger e Richter (1991) descrevem que os vasos devido à sua grande dimensão e às paredes delgadas, são estruturas fracas, daí a sua dimensão, abundância e distribuição influenciaram na resistência

da madeira. O lenho com anéis porosos, que é uma característica anatômica presente na madeira de *Tectona grandis*, é menos resistente. Então, quanto menor forem as dimensões, abundância e distribuição maior será a resistência da madeira a determinados esforços.

Amodei (2011) em avaliação da qualidade da madeira de *Tectona grandis*, com 11 anos, por análises anatômicas, chegou a resultados médios de comprimento de fibra (CF) de 793 μm próximo a medula e de 1285 μm próximo ao câmbio. Para o caractere espessura das paredes da fibra (EPF) obteve-se o valor médio 3,76 μm próximo a medula e 5,5 μm próximo ao câmbio. Com a constatação da variação do comprimento da fibra (CF) e da espessura das paredes da fibra (EPF) mostrou tendência de crescimento no sentido medula para câmbio. Em consideração a idade do povoamento estudado por Amodei (2011) os valores obtidos neste estudo estão bem próximos a exemplo da média do comprimento de fibra próximo a medula (793 μm) é 7,68% menor que o 859,81% (Tabela 2.2).

Ainda na Tabela 2.2 ao analisar os caracteres anatômicos influenciados pelas camadas do perfil radial, verificou-se que o alburno é a posição com as maiores médias para os caracteres anatômicos, comprimento do elemento de vaso (CEV) com 343,80 μm , comprimento da fibra (CF) com 1110,45 μm e diâmetro do lume (DL) com 19,03 μm . As médias da largura da fibra (LF), para as camadas intermediária e alburno, 26,63 μm e 27,46 μm respectivamente, são as maiores e estatisticamente iguais entre si.

Com exceção para espessura das paredes da fibra (EPF) e frequência de vasos (FV), os valores médios dos caracteres anatômicos têm a tendência de crescimento no sentido do cerne para o alburno. Para os valores médios da espessura das paredes da fibra (EPF), quanto menor a diferença entre a largura da fibra (LF) e o diâmetro do lume (DL), menores serão os valores da espessura das paredes da fibra (EPF), conforme constatado na Tabela 2.2. No entanto não houve diferença estatística ao nível de 0,05 de significância entre estes.

Lima et al. (2011a) em estudo das dimensões anatômicas da madeira de *Tectona grandis*, com 31 anos de idade, em função da posição radial e do espaçamento, chegaram a resultados da frequência de vasos (FV) igual a 9,19 unidades por mm^2 no cerne, 7,55 unidades por mm^2 na camada intermediária e 8,09 unidades por mm^2 no alburno. Para o diâmetro tangencial do lume (DT)

obtiveram 141, 163 e 180 μm respectivamente no cerne, na camada intermediária e no albúrnio, com tendência dos valores deste estudo, que é crescente da medula para a casca. Os valores da frequência de vasos (FV) obtidos por Lima et al. (2011a) é muito menor que os obtidos neste estudo, observou-se também divergência quanto a tendência de decréscimo do número de vasos no sentido medula-casca deste ensaio, que para os autores têm a tendência de decrescerem da medula para a camada intermediária e de crescerem da camada intermediária para a casca, com a constatação de que o aumento dos valores da frequência de vasos (FV) no sentido da medula para a casca, depende mais da posição radial, que da idade e concluíram que a frequência de vasos, são maiores na medula, já os valores do diâmetro de vasos são menores nessa posição.

Os dados dos caracteres anatômicos deste trabalho com tendência de crescimento de valores no sentido medula-casca, indicam que a madeira ainda está em transição entre lenho de madeira juvenil e lenho de madeira adulta. Tomazello Filho (1985) explica que a tendência natural é de acréscimo e decréscimo dos valores dos caracteres anatômicos. Segundo o autor de modo geral, as fibras próximas à medula apresentam menor comprimento, largura, espessura da parede e diâmetro do lúmen, e com o aumento da idade das árvores, as células cambiais passam a produzir elementos com maiores dimensões, até atingirem a estabilização em idades mais avançadas.

Na análise das interações do fator 1 com o fator 2 estudou-se o desdobramento dos graus de liberdade do fator 1 – procedências – dentro de cada nível do fator 2 – camadas do perfil radial. Para a variável comprimento de fibras (CF) todas as procedências produziram efeito significativo dentro de cada camada do perfil radial, com tendência de valores médios crescendo no sentido na medula para a casca (Figura 2.8-A).

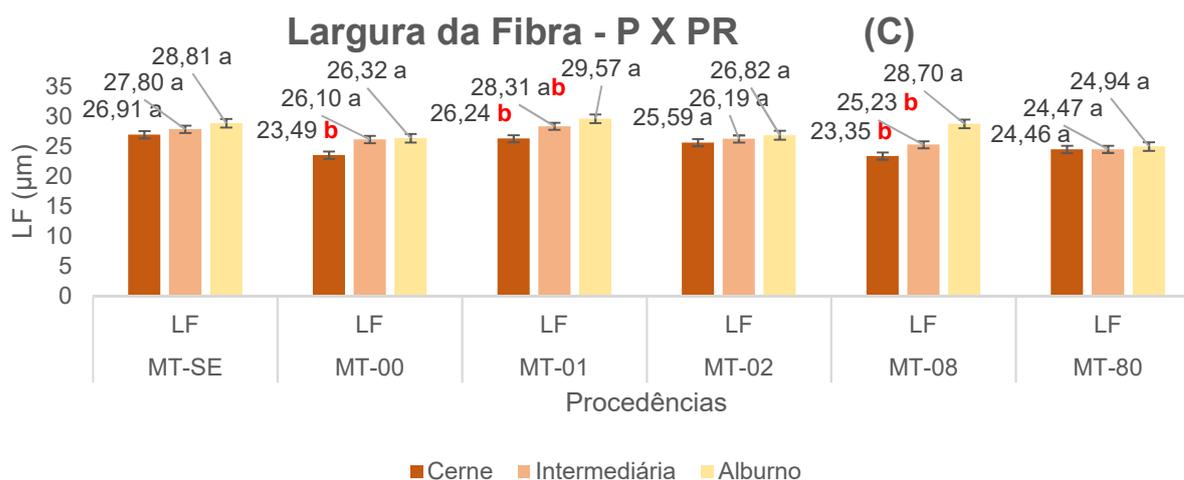
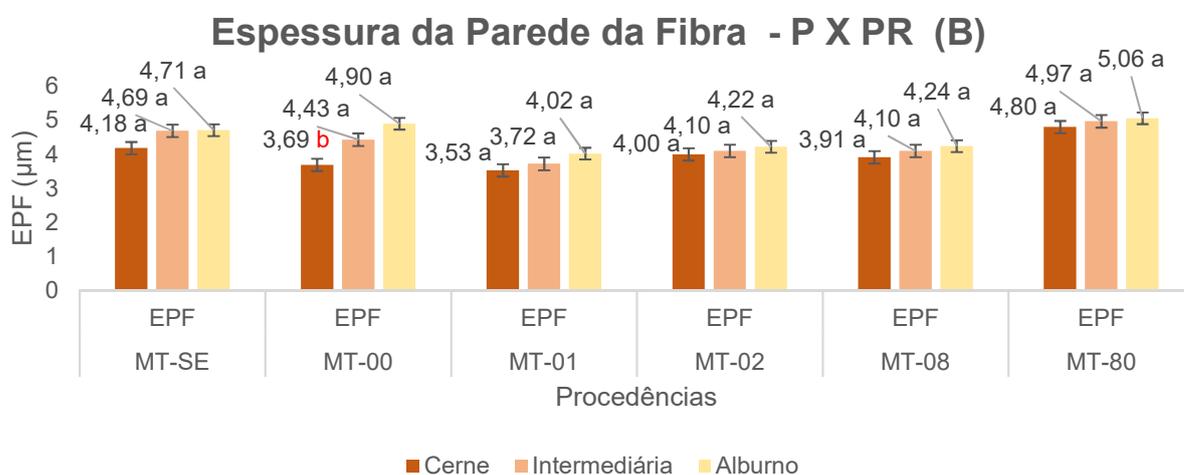
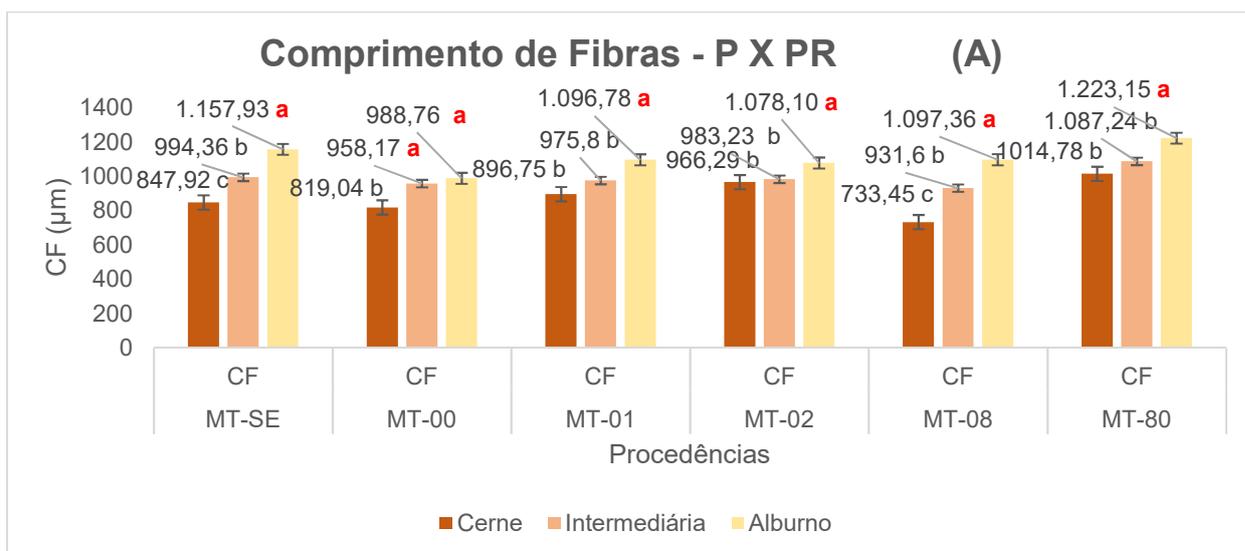


Figura 2.8 - Interação do Fator 1 – (procedências) com o Fator 2 – (camadas do perfil radial), para o caractere anatômico comprimento de fibra (CF) (A); espessura da parede da fibra (EPF) (B); largura da fibra (LF) (C), para madeiras de *Tectona grandis* com nove anos de idade. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, nas colunas, para teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Na espessura da parede da fibra (EPF) apenas a procedência MT-00 produziu efeito dentro de cada camada do perfil radial, com a menor média na camada cerne (Figura 2.8-B).

As procedências MT-00, MT-01 e MT-08 afetaram significativamente os valores médios da largura da fibra (LF) em cada camada do perfil radial, onde também se observa que as médias cresceram do cerne para o alburno (Figura 2.8-C).

3.1.2 – Difração de raios-X para estimativa do ângulo microfibrilar de celulose

Os valores médios estimados do ângulo microfibrilar de celulose (MFA) foram avaliados em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial. Considerou-se a variação das médias do ângulo microfibrilar de celulose (MFA), para as três camadas do perfil radial – fator 2, para as madeiras das procedências de *Tectona grandis* – fator 1, bem como para as médias da interação entre esses dois fatores, não havendo diferença significativa ao nível de significância de 5% (Tabela 2.3).

O valor médio geral estimado do ângulo microfibrilar de celulose foi de 13,303°, com valor mínimo de 13,080° e máximo de 13,530° (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 – Análise de variância e estatística descritiva do ângulo microfibrilar de celulose (MFA) das seis procedências com as camadas do perfil radial de *Tectona grandis* com nove anos de idade, em esquema fatorial 6 x 3.

Análise de Variância e Estatística Descritiva			
Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio	F Calculado
		MFA (°)	
Procedências (P)	5	00,005	0,47 ^{ns}
Perfil Radial (PR)	2	00,002	0,17 ^{ns}
P X PR	10	00,007	0,69 ^{ns}
Erro	71	00,011	-
Média		13,303	-
Desvio Padrão		00,098	-
Mínimo		13,080	-
Máximo		13,530	-
Coefficiente de Variação (%)		0,700	-

GL: grau de liberdade; P: Procedência; PR: Perfil Radial; ns: não significativo ($\alpha \geq 0,05$).

Krisdianto (2008) em estudo da variação do ângulo microfibrilar de celulose (MFA) da madeira de teca comum e de super teca – nomenclatura usada para teca de rápido crescimento, ambas com sete anos de idade, de florestal experimental plantada em Kalimantan, Indonésia, medidas com microscópio, obteve resultados com diferença significativa entre valores médios da teca comum (24,0 a 25,2° para o cerne, 22,3 a 23,0° para a porção intermediária, e 21,1 a 21,5° para o alburno) com os valores médios da super teca (25,2 a 26,1° para o cerne, 22,3 a 23,0° para a porção intermediária, e 21,1 a 21,5° para o alburno).

Tabela 2.4 – Resumo de médias e do teste de Tukey do fator 1 (procedências) e do fator 2 (camadas do perfil radial) para a ultraestrutura anatômica MFA (°), em função das seis procedências de *Tectona grandis* com nove anos de idade.

Médias do Caractere Anatômico - MFA (°)	
Fator 1 (procedências) / Níveis	
MT-SE	13,29 a
MT-00	13,27 a
MT-01	13,30 a
MT-02	13,33 a
MT-08	13,32 a
MT-80	13,30 a
Fator 2 (camadas do perfil radial) / Níveis	
Cerne	13,31 a
Intermediária	13,31 a
Alburno	13,29 a

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, na coluna, para teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Bhat et al. (2001) em caracterização de madeira de *Tectona grandis* com 63 anos, de três diferentes locais de Kerala, Índia, com árvores de rápido crescimento (descritas como material com fenótipos superiores) e com árvores de crescimento lento, obtiveram diferenças significativas para os valores do ângulo microfibrilar de celulose (MFA), determinados por microscopia, em função do perfil radial: árvores com crescimento rápido, cerne com 10° e alburno com 15°; e árvores com

crescimento lento, cerne com 10,1° e alburno com 16°. Quando fez a comparação do ângulo microfibrilar de celulose (MFA), com as localizações, os resultados foram: árvores com crescimento rápido, médias entre 11 e 14° e árvores com crescimento lento, médias entre 13 e 14°. Sem diferença significativa entre os crescimentos e com diferença significativa para as localizações.

O valor médio geral do ângulo microfibrilar de celulose (MFA) 22,5° obtido por Krisdianto (2008) é 1,65 vezes maior que o valor médio geral deste estudo, 13,303°, e 1,38 vezes maior que o maior valor médio determinado por Bhat et al. (2001), 16°. Krisdianto (2008) obteve a tendência decrescente dos valores da medula para a casca, que é a mesma tendência obtida neste trabalho, porém divergente da obtida por Bhat et al. (2001). O natural é que o ângulo microfibrilar de celulose (MFA) seja maior no alburno, o que confere à madeira maior elasticidade, atribuindo a árvore maior rigidez, permitindo às árvores jovens flexionar em intempéries, sem quebrar. O ângulo microfibrilar de celulose (MFA) menor da porção intermediária para a medula reflete em maior módulo de ruptura – maior resistência, para que a árvore suporte o peso e as tensões de compressão (peso do caule e da copa).

Segundo Burger e Richter (1991) a estrutura submicroscópica da parede celular reflete na resistência mecânica, pois, quanto mais vertical for a orientação das microfibrilas de celulose, maior será a resistência à tração. Quanto mais horizontal for o seu grau de inclinação, maior será a resistência a esforços de compressão. Assim os valores médios do ângulo microfibrilar de celulose (MFA) deste ensaio decrescendo da medula para a casca, indicam que a madeira de *Tectona grandis* das procedências testadas ainda estão na transição do lenho juvenil para o lenho adulto, pois, quanto menor for o ângulo microfibrilar de celulose (MFA), mais rígida a madeira será.

A técnica de difração de raios-X analisadas com o pó da madeira de *Tectona grandis* para estimar os valores dos ângulos microfibrilares de celulose (MFA) dos tratamentos, tal qual aplicada por Hein (2011) para a estimativa do ângulo microfibrilar de celulose (MFA), em lâminas de madeira de *Eucalyptus*, mostrou-se adequada e com resultados similares aos valores dos ângulos microfibrilar de celulose (MFA) determinados por técnica de microscopia ótica de ensaios de Bhat et al. (2001).

Da interpretação do difratograma (Figura 2.9), observa-se que o material lignocelulósico das amostras, possui poucos planos atômicos cristalinos. O intervalo de leitura de 2θ no difratômetro, foi definido entre 15° e 30° , produzindo difratograma com bandas de amorfismo, na região entre 15 e 19° e entre 27 e 30° .

Com os poucos picos de difração bem definidos, o valor do ângulo 2θ foi de $22,15^\circ$, para 100% da intensidade de difração no pico. Observa-se também dois picos cristalinos, identificados como os minerais, tridimita e quartzo, que são duas formas cristalinas de sílica (SiO_2), contidos no pó da madeira de *Tectona grandis*. Kjaer et al. (1999) constataram em estudo do teor de sílica e de cálcio no cerne de cinco procedências da madeira de *Tectona grandis* com 17 anos de idade, que o teor médio de sílica variou entre 0,27% e 0,66%.

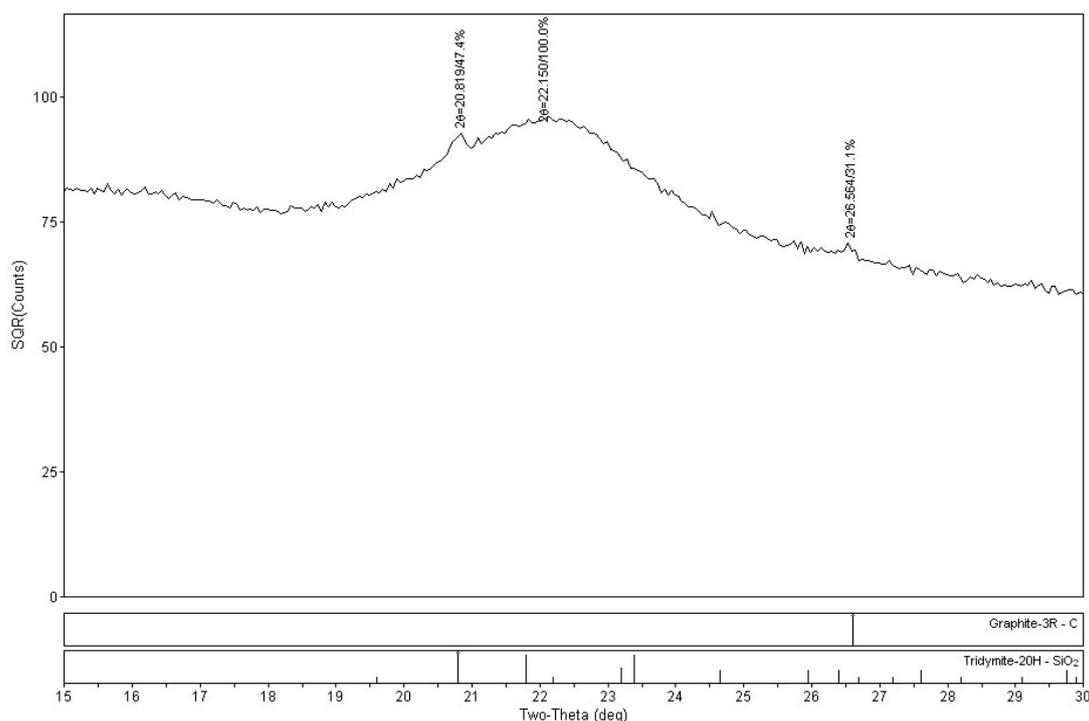


Figura 2.9 – Difratograma, em função da intensidade de difração e do ângulo de difração (2θ), dos raios-X para madeira de *Tectona grandis* com 9 anos de idade.

Para a transição entre lenho juvenil e lenho adulto, Ramos et al. (2011) em avaliação da variação radial de elementos anatômicos de *Eucalyptus grandis* com a idade de transição, constataram que o comprimento das fibras (CF) e o ângulo microfibrilar (MFA) foram aqueles que melhor indicaram a presença da zona de

transição entre os lenhos juvenil e adulto dada as suas variações significativas no perfil radiais das toras das árvores, com aumento de valores do comprimento da fibra (CF) e da espessura das paredes da fibra (EPF), na direção medula-casca, enquanto que o ângulo microfibrilar de celulose (MFA) apresentou uma redução de valores, e concluindo que a transição ocorreu entre o 5º e o 11º ano. Com os dados das características anatômicas deste estudo, apesar da constatação de que os comprimentos do elemento de vasos (CEV), seguem em crescimento, que as espessuras das paredes das fibras (EPF) seguiram crescendo até o 5º ano (com contagem das camadas de crescimento, pelas faixas do parênquima marginal, com anéis porosos, por macroscopia – lente conta-fios) e decresceram até o 9º ano e que os valores médios dos ângulos microfibrilares de celulose (MFA) também decresceram no sentido medula-casca, ainda não é possível determinar se a madeira das árvores de *Tectona grandis* com 9 anos deste estudo já fez a transição de lenho juvenil para lenho adulto.

3.2 – PROPRIEDADES QUÍMICAS

3.2.1 – Componentes químicos

As seis procedências de *Tectona grandis* produziram diferenças significativas ao nível de 1% de significância nas médias dos componentes fundamentais, holocelulose, lignina e no componente acidental extrativos. Porém, as médias de cinzas_{525°} sem extrativos não variaram significativamente em função das procedências (Tabela 2.5).

Os valores médios observados para os componentes químicos foram: 4,62% para o teor de extrativos (EX); 0,62% para os valores de cinzas_{525°} sem extrativos (CZ_{525°}); 31,89% para o teor de lignina (L); e 67,49% para o teor de holocelulose (HOL) (Tabela 2.5). Esses valores estão conforme os valores apresentados por Klock et al. (2005) para a composição média contida em madeira de folhosas, ou seja: 3 ± 2% para extrativos, 0,2 a 0,5% para cinzas, 20 ± 4% para lignina, 47 ± 2% para celulose e 30 ± 5% para polioses (hemicelulose).

Tabela 2.5 – Resumo da análise de variância e da estatística descritiva para os percentuais dos componentes químicos, em função de seis procedências de *Tectona grandis* com nove anos de idade.

Análise de Variância e Estatística Descritiva				
Fonte de Variação	EX (%)	CZ_{525°} (%)	L (%)	HOL (%)
F Cal	5,38 **	2,59 ns	29,71 **	23,09 **
Média	4,62	0,62	31,89	67,49
“σ”	1,07	0,13	0,99	1,06
Mínimo **	3,14	0,44	30,35	65,60
Máximo	7,65	0,96	33,78	69,04
CV (%)	23,00	21,00	3,00	2,00

EX: extrativos; L: lignina; HOL: holocelulose; CZ_{525°}: cinzas_{525°} sem extrativos; GL: grau de liberdade; σ : desvio padrão; CV: coeficiente de variação; **: significativo ao nível de 1% de significância ($\alpha < 0,01$); ns: não foi significativo ($\alpha \geq 0,05$).

Nas comparações múltiplas (Tabela 2.6), os valores médios do teor de extrativos (EX) das procedências MT-02 (6,17%) e MT-08 (4,44%) são iguais estatisticamente ($\alpha < 0,01$). As procedências MT-SE e MT-80 são iguais estatisticamente e possuem as maiores médias para o teor de lignina (L), respectivamente de 33,31 e 32,93%. Para o teor de holocelulose (HOL) as médias das procedências MT-00, MT-01, MT-02 e MT-08 são iguais estatisticamente e maiores que as médias de MT-SE e MT-80.

Tabela 2.6 – Resumo das médias e do teste de Tukey, para os percentuais dos componentes químicos, em função de seis procedências de *Tectona grandis* com nove anos de idade.

Médias e Teste de Tukey				
Procedências	EX (%)	CZ_{525°} (%)	L (%)	HOL (%)
MT-SE	4,24 b	0,74 a	33,31 a	65,96 b
MT-00	4,44 ab	0,63 a	31,03 b	68,62 a
MT-01	3,90 b	0,59 a	31,15 b	68,37 a
MT-02	6,17 a	0,52 a	31,51 b	68,03 a
MT-08	4,47 ab	0,70 a	31,26 b	68,00 a
MT-80	4,20 b	0,55 a	32,93 a	66,50 b

EX: extrativos; L: lignina; HOL: holocelulose; CZ_{525°}: cinzas_{525°} sem extrativos. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, nas colunas, para teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Chagas et al. (2014) analisando as propriedades da madeira de *Tectona grandis*, com idades de quatro, seis e 12 anos, plantadas em Santo Antônio do Leverger-MT, verificaram valores médios da composição química de: 4,76% para extrativos (EX), 31,23% para teor de lignina (L) e 64,01% para holocelulose (HOL) em árvores com 12 anos de idade. Os autores concluíram que madeiras com a mesma classe diamétrica (0,09 a 0,13 m), independentemente da idade, apresentam propriedades tecnológicas similares. Eles afirmaram também que altos teores de lignina (L) são indesejáveis na indústria de celulose, entretanto, pode ser vantajoso para outros fins, como o energético.

Ferreira et al. (2015) analisando compostos acidentais na madeira de *Tectona grandis* com 13 anos de idade plantadas em Alta Floresta-MT, obtiveram valor médio de teor de extrativos em água quente de 9,66%, 3,45% em água fria e com teor de cinzas (CZ_{525°}) de 1,26%. Para Premrasmi e Dietrichs (1967) o conhecimento da distribuição de extrativos ajuda a prever as propriedades da madeira, assim a química da madeira pode auxiliar a produção de florestas de *Tectona grandis* com alta qualidade.

Da Silva et al. (2015) estudando a qualidade da madeira de *Tectona grandis* em desbastes, encontraram valores médios de teor de cinzas (CZ_{525°}) de 0,61% para árvores com 4,67 anos e 0,57% para árvores com 7,67 anos. Constataram que não há diferença significativa desse material inorgânico em função das posições ao longo do fuste das árvores. Neste estudo o teor médio de cinzas sem extrativos (CZ_{525°}) é de 0,62%, com o valor máximo de 0,96% para MT-SE (Tabela 2.5). Esses valores que são compatíveis com os valores de Da Silva et al. (2015) e de Moya et al. (2010).

Moya et al. (2010) estudando a composição química do cerne de árvores de *Tectona grandis* com 13 anos, em condições de rápido crescimento, obtiveram os seguintes valores: 13,67% de extrativos (EX); 0,78% de cinzas (CZ_{525°}); 30,91% de lignina (L); e 59,65% de holocelulose (HOL). Pérez (2012), em caracterização tecnológica de madeira jovem de *Tectona grandis* com 13 anos de idade, obteve valores médios de componentes químicos de 57,94% de holocelulose (HOL), 32,47% de lignina (L), 8,94% de extrativos (EX) e 0,64% de cinzas (CZ_{525°}).

Lukmandaru e Takahashi (2009) estudando a química da madeira de *Tectona grandis* em Java, encontraram os maiores valores médios de extrativos (EX) de 5,30% para árvores com oito anos, de 7,01% para árvores com 30 anos e de 8,40% para árvores com 51 anos.

Lourenço et al. (2015) caracterizando lignina em cerne de *Tectona grandis* com 70 anos de plantação no Timor Leste, analisados por pirólise rápida analítica (PY-GC/MS/FID), também encontraram elevados teores de lignina (L) de 37,3% no cerne e de 35,4% no alburno, constatando pequena diferença de composição entre os monômeros GS (núcleos guaiacílicos e siringílicos), entre alburno e cerne. Tal qual os resultados de Pérez (2012) com teor de lignina (L) de 32,47%, a porcentagem de 31,89% deste estudo (Tabela 2.5) é acima do valor de referência para essa macromolécula.

Os valores médios obtidos neste estudo, atestam que os constituintes químicos da madeira das procedências testadas estão em conformidade com os resultados de trabalhos de Chagas et al. (2014), Ferreira et al. (2015), Da Silva et al. (2015) Moya et al. (2010) e de Pérez (2012) estudando *Tectona grandis* com idade de até 13 anos. Considerando que houveram divergências. Como as dos valores dos teores de extrativos (EX) de Ferreira et al. (2015), de Lukmandaru e Takahashi (2009) e de Pérez (2012), que são maiores que o valor médio deste estudo (4,62%). Ou, aos valores do teor de holocelulose (HOL) de Moya et al. (2010) e de Pérez (2012), que são menores que a média obtida neste estudo (67,49%) da Tabela 2.5. Porém, os valores médios deste trabalho são menores que o valor do teor de extrativos (EX) de Lukmandaru e Takahashi (2009) para árvores com respectivos 30 e com 51 anos, e também menores que o valor do teor de Lignina (L) obtidos por Lourenço et al. (2015) analisando árvores com 70 anos.

3.3 – PROPRIEDADES FÍSICAS

3.3.1 – Densidade aparente e densidade básica

Na Tabela 2.7 estão apresentados os valores de estatística descritiva, bem como os valores do quadrado médio da análise de variância, com as suas respectivas significâncias estatísticas pelo teste de F, para DIC, em esquema fatorial 6 x 2 que resultaram em diferença significativa entre as médias das variáveis

densidade aparente (ρ_{AP}) e densidade básica (ρ_B), em função das seis procedências de *Tectona grandis* (fator 1). Para as camadas do perfil radial (fator 2) e para a interação do fator 1 com o fator 2 não há diferença estatística entre as médias.

Tabela 2.7 – Resumo da análise de variância e da estatística descritiva para a propriedade física densidade, em função de seis procedências (fator 1) e das camadas do perfil radial (fator 2) da madeira de *Tectona grandis* com nove anos de idade, em esquema fatorial 6 x 2.

Análise de Variância e Estatística Descritiva			
Fonte de Variação	GL	ρ_{AP} (kg.m⁻³)	ρ_B (kg.m⁻³)
F Calculado			
Procedências (P)	5	5,33 **	5,48 **
Perfil Radial (PR)	1	0,00 ns	0,01 ns
P X PR	5	0,20 ns	0,25 ns
Média		533,57	451,87
Desvio Padrão		52,27	46,69
Mínimo		451,02	377,98
Máximo		667,50	583,11
CV (%)		10,00	10,00

ρ_{AP} : densidade aparente; ρ_B : densidade básica; GL: grau de liberdade; CV: coeficiente de variação; **: significativo ao nível de 1% de significância ($\alpha < 0,01$); ns: não significativo ($\alpha \geq 0,05$).

Conforme Melo et al. (1990) o valor médio da densidade básica (ρ_B) de 451,87 kg.m⁻³ para a madeira de teca a classifica como madeira leve (≤ 500 kg.m⁻³). Para a densidade aparente (ρ_{AP}), com teor de umidade de 12%, o valor médio é de 533,57 kg.m⁻³, atribuindo a esta a classificação da madeira como média (Tabela 2.7).

Os valores médios das propriedades físicas densidade aparente (ρ_{AP}) e densidade básica (ρ_B), em função das procedências de *Tectona grandis* (fator 1) estão na Tabela 2.8, com as suas respectivas comparações entre médias, pelo teste de Tukey.

O clone MT-80 possui os maiores valores médios absolutos para densidade aparente, 572,60 kg.m⁻³, e para densidade básica, 488,55 kg.m⁻³, apesar de ambos serem estatisticamente iguais aos clones MT-SE, MT-02, MT-08 (Tabela 2.8).

Tabela 2.8 – Resumo das médias e do teste de Tukey, para as propriedades físicas, densidade, em função de seis procedências (fator 1) e das camadas do perfil radial (fator 2) da madeira de *Tectona grandis* com nove anos de idade.

Médias e Teste de Tukey

Procedências	ρ_{AP} (kg.m ⁻³)	ρ_B (kg.m ⁻³)
Fator 1 (procedências) / Níveis		
MT-SE	569,78 a	484,56 a
MT-00	497,08 b	420,11 b
MT-01	490,11 b	410,27 b
MT-02	519,25 ab	439,47 ab
MT-08	530,25 ab	451,19 ab
MT-80	572,60 a	488,55 a
Fator 2 (camadas do perfil radial) / Níveis		
Cerne	529,74 a	448,52 a
Intermediária	529,72 a	449,40 a

ρ_{AP} : densidade aparente; ρ_B : densidade básica. As médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem estatisticamente entre si, para teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Em função das camadas do perfil radial, o cerne é a que possui o maior valor médio absoluto para densidade aparente, 529,74 kg.m⁻³, porém, para densidade básica (ρ_B) a camada intermediária é a que possui o maior valor médio absoluto 449,40 kg.m⁻³, sendo, ambas iguais estatisticamente ($\alpha \geq 0,05$). Os valores de densidade básica (ρ_B) estão abaixo dos obtidos por outros autores estudando a madeira de *Tectona grandis* com idades de até 18 anos (Tabela 2.8).

Lima et al. (2011b) avaliando a madeira de *Tectona grandis* com 32 anos, em plantio localizado na floresta estadual de Pederneiras-SP, em função do espaçamento e da posição radial no fuste, utilizando a NBR 7190 (1997), obtiveram média de 640 kg.m⁻³ para densidade aparente (ρ_{AP}), os autores concluíram que os valores dessa variável têm tendências de aumento no sentido medula-casca, e também constatando que a partir da posição intermediária os valores apresentaram tendência de estabilização, ou seja, de menor valor médio encontrado no cerne.

Gutiérrez et al. (2008), em estudo das propriedades físico-mecânicas de *Tectona grandis* com 18 anos de floresta em Balzar, Equador, utilizando a norma D

143-94, encontraram o valor médio de 520 kg.m^{-3} para densidade básica (ρ_B) e classificaram a madeira como madeira de densidade média. Bhat et al. (2001) estudando propriedades de madeira de juvenil *Tectona grandis* com idades entre 20 e 25 anos chegaram a valores médios de densidade básica de 560 kg.m^{-3} para madeira de crescimento rápido e de 570 kg.m^{-3} para madeira de crescimento lento, em Kerala, Índia.

Flórez et al. (2014) caracterizando madeira de *Tectona grandis*, com idade de 13 anos plantadas em Vazante-MG-BR usando a norma ASTM D 143-94, obtiveram os seguintes valores médios de densidade: 530 kg.m^{-3} para densidade básica (ρ_B) e 540 kg.m^{-3} para densidade aparente (ρ_{AP}).

Motta (2011), em estudo da propriedade tecnológica da madeira de *Tectona grandis* com 15 anos de idade, de floresta localizada em Vale do Rio Doce-MG-BR, constataram os valores médios de 540 kg.m^{-3} para densidade básica (ρ_B) e 620 kg.m^{-3} para densidade aparente (ρ_{AP}).

Moreno e Roque (2006), em estudo das propriedades físicas da madeira de *Tectona grandis*, com oito anos de idade provenientes de Cochabamba-Bolívia, obtiveram os seguintes valores médios para as propriedades físicas: densidade básica (ρ_B) de $500,0 \text{ kg.m}^{-3}$ e densidade aparente (ρ_{AP}) de $540,0 \text{ kg.m}^{-3}$, utilizando as normas ASTM D 2395 (1995) e D 5536 (1999).

Paes et al. (2015) caracterizando a madeira juvenil de *Tectona grandis*, com idades entre seis e sete anos, plantadas em Guarapari-ES-BR, utilizando a norma NBR 7190 (1997), obtiveram os valores médios de densidade básica (ρ_B) de 450 kg.m^{-3} . A densidade básica obtida por Paes et al. (2015) é semelhante a deste trabalho, porém, as duas médias são muito menores que as obtidas por Lima et al. (2011b), Gutiérrez et al. (2008), Flórez et al. (2014), Motta (2011) e por Moreno e Roque (2006), considerando as idades das árvores estudadas entre 8 e 32 anos.

3.3.2 – Variação dimensional da madeira

Na Tabela 2.9 têm-se os valores do F calculado, da análise de variância, bem como os valores da estatística descritiva para as seis procedências de *Tectona grandis* (fator 1) e para as camadas do perfil radial (fator 2), em esquema fatorial 6×2 , onde pode-se observar que as médias das variações dimensionais, retração (ϵ_r), inchamento (ϵ_i), anisotropia dimensional de retração (A_r), em função das procedências não diferenciaram estatisticamente entre si pelo teste de F a 0,05 de

significância estatística. Para variação volumétrica (ΔV) há diferença entre as médias das procedências ao nível de 5% de significância.

Para as camadas do perfil radial e para a interação entre as procedências e as camadas do perfil radial, não houve diferença significativa para os valores das variações dimensionais da madeira.

Tabela 2.9 – Resumo da análise de variância e da estatística descritiva para as propriedades físicas: inchamento, retração, variação volumétrica e anisotropia dimensional de retração, em função de seis procedências (fator 1) e das camadas do perfil radial (fator 2) de *Tectona grandis* com nove anos de idade.

Análise de Variância e Estatística Descritiva									
Fonte de Variação	GL	(ϵ_{r1}) (%)	(ϵ_{r2}) (%)	(ϵ_{r3}) (%)	(ϵ_{i1}) (%)	(ϵ_{i2}) (%)	(ϵ_{i3}) (%)	ΔV (%)	A_r
F Calculado									
P	5	0,76 ^{ns}	1,65 ^{ns}	1,02 ^{ns}	1,05 ^{ns}	1,67 ^{ns}	1,12 ^{ns}	2,53 [*]	0,84 ^{ns}
PR	1	0,23 ^{ns}	0,40 ^{ns}	1,37 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,37 ^{ns}	1,11 ^{ns}	0,56 ^{ns}	2,35 ^{ns}
P X PR	5	1,30 ^{ns}	0,25 ^{ns}	0,34 ^{ns}	1,30 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0,37 ^{ns}	0,35 ^{ns}	0,54 ^{ns}
Média	-	0,75	3,30	4,26	0,74	3,43	4,48	8,99	1,34
“ σ ”	-	0,14	0,93	0,93	0,12	0,99	1,02	1,20	0,54
Mínimo	-	0,40	1,14	2,23	0,48	1,16	2,29	6,83	0,46
Máximo	-	1,15	5,55	6,70	1,03	5,88	7,20	11,64	2,39
CV (%)	-	19,00	28,00	22,00	16,00	29,00	23,00	10,00	40,00

ϵ_{r1} : retração axial; ϵ_{r2} : retração radial; ϵ_{r3} : retração tangencial; ϵ_{i1} : inchamento axial; ϵ_{i2} : inchamento radial; ϵ_{i3} : inchamento tangencial; ΔV : variação volumétrica; A_r : anisotropia dimensional de retração; GL: grau de liberdade; P: procedências; PR: perfil radial; σ : desvio padrão; CV: coeficiente de variação; *: significativo ao nível de 5% de significância ($0,01 \geq \alpha < 0,05$); ns: não foi significativo ($\alpha \geq 0,05$).

Os valores médios encontrados para as variações dimensionais da madeira das procedências de *Tectona grandis* foram, 0,75% para retração axial (ϵ_{r1}), 3,30% para retração radial (ϵ_{r2}), 4,26% para retração tangencial (ϵ_{r3}), 0,74% para inchamento axial (ϵ_{i1}), 3,43% para inchamento radial (ϵ_{i2}), 4,48% para inchamento tangencial (ϵ_{i3}), 8,99% para variação volumétrica (ΔV) e 1,34 para anisotropia dimensional de retração (A_r) (Tabela 2.9).

Para a variação volumétrica (ΔV) a procedência MT-01 é a que possui o maior valor médio 9,74%, porém, é estatisticamente igual as procedências MT-00,

MT-02, MT-08 e MT-80 (Tabela 2.10), Arruda (2013) encontrou média bem menor, 5,84% para madeira de teca com 8 anos de idade. Valores altos para a variação volumétrica (ΔV) afetam a qualidade do lenho, pois, a variação nas dimensões da madeira em função da umidade, no estado seco e em condição de saturação, favorece o aparecimento de defeitos de secagem como, fissuras, fendas e rachaduras.

O coeficiente ou fator anisotrópico de retração (A_r) é uma medida que qualifica a madeira quanto a estabilidade dimensional. Na Tabela 2.9 a média geral para o coeficiente anisotrópico de retração é de 1,34, variando entre 0,46 e 2,39 respectivos valores mínimos e máximos. Esses valores qualificam a madeira das procedências testadas quanto ao fator anisotrópico entre madeira como de excelente estabilidade (fatores entre 1,2 e 1,5) e madeira com baixa estabilidade (fatores $> 2,0$), de classes descritas por Moreschi (2014).

Tabela 2.10 – Resumo dos valores médios e do teste de Tukey, para as propriedades de variação dimensional, em função de seis procedências (fator 1) e das camadas do perfil radial (fator 2) da madeira de *Tectona grandis*, com nove anos de idade.

Médias e Teste de Tukey								
Procedências	(ϵ_{r1})	(ϵ_{r2})	(ϵ_{r3})	(ϵ_{i1})	(ϵ_{i2})	(ϵ_{i3})	ΔV	A_r
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
Fator 1 (procedências) / Níveis								
MT-SE	0,75 a	2,60 a	4,14 a	0,75 a	2,68 a	4,33 a	8,06 b	1,48 a
MT-00	0,78 a	3,07 a	4,52 a	0,79 a	3,18 a	4,74 a	8,93 ab	1,37 a
MT-01	0,73 a	3,68 a	4,68 a	0,70 a	3,87 a	5,01 a	9,74 a	1,57 a
MT-02	0,69 a	3,66 a	4,49 a	0,70 a	3,81 a	4,71 a	9,45 ab	1,23 a
MT-08	0,76 a	3,53 a	3,77 a	0,76 a	3,66 a	3,93 a	8,55 ab	1,18 a
MT-80	0,77 a	3,52 a	3,95 a	0,78 a	3,66 a	4,13 a	8,77 ab	1,20 a
Fator 2 (camadas do perfil radial) / Níveis								
Cerne	0,76 a	3,25 a	4,43 a	0,76 a	3,38 a	4,64 a	9,03 a	1,45 a
Intermediária	0,74 a	3,43 a	4,08 a	0,74 a	3,56 a	4,30 a	8,79 a	1,22 a

ϵ_{r1} : retração axial; ϵ_{r2} : retração radial; ϵ_{r3} : retração tangencial; ϵ_{i1} : inchamento axial; ϵ_{i2} : inchamento radial; ϵ_{i3} : inchamento tangencial; ΔV : variação volumétrica; A_r : anisotropia dimensional de retração. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, nas colunas, para teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Em caracterização da variação dimensional da madeira juvenil de *Tectona grandis* com idades entre seis e sete anos Paes et al. (2015) obtiveram valores médios para retração radial (ϵ_{r2}) de 2,73%, para retração tangencial (ϵ_{r3}) de 6,17%, para variação volumétrica (ΔV) de 9,83% e para o coeficiente de anisotropia de retração (A_r) 2,26.

Moreno e Roque (2006) em estudo das propriedades físicas da madeira de *Tectona grandis* com oito anos de idade, utilizando as normas ASTM D 2395 (1995) e D 5536 (1999), conseguiram os seguintes valores médios para as variações das dimensões: retração axial (ϵ_{r1}) de 0,12%; retração radial (ϵ_{r2}) de 1,28%; ϵ_{r3} de 2,91%; variação volumétrica (ΔV) de 4,35% e anisotropia dimensional de retração (A_r) de 2,31.

Anda et al. (2014) em avaliação da madeira de *Tectona grandis*, de floresta plantada em Campeche-México, quanto a propriedades físicas de variação dimensional, usando a norma alemã DIN (2000), obtiveram os seguintes valores médios: inchamento radial (ϵ_{i2}) de 0,13%; inchamento tangencial (ϵ_{i3}) de 0,26%; retração radial (ϵ_{r2}) de 0,76%; retração tangencial (ϵ_{r3}) de 1,82%; e anisotropia dimensional de retração (A_r) de 2,4, para árvores com nove anos de idade.

Flórez et al. (2014) caracterizando madeira de *Tectona grandis* com idade de 13 anos, plantadas em Vazante-MG, com a norma ASTM D 143-94, obtiveram os seguintes valores médios: para retração radial (ϵ_{r2}) de 2,40%, para retração tangencial (ϵ_{r3}) de 4,21%, para variação volumétrica (ΔV) de 6,84% e coeficiente de anisotropia de retração (A_r) de 1,82.

Motta (2011) estudando as propriedades da madeira de *Tectona grandis* com 15 anos de idade, encontrou os seguintes valores médios: retração axial (ϵ_{r1}) de 0,29%; retração radial de (ϵ_{r2}) 2,06%; retração tangencial de (ϵ_{r3}) 4,09%; 6,33% para variação volumétrica (ΔV) e 2,02 para o coeficiente de anisotropia de retração (A_r).

Em estudo da madeira de *Tectona grandis* com idade de 18 anos, de floresta em Balzar-Ecuador Gutiérrez et al. (2008) utilizando a norma ASTM D 143-94, obtiveram os seguintes resultados para variação dimensional da madeira: 0,49% para retração axial (ϵ_{r1}); 2,06% para retração radial (ϵ_{r2}); 5,22% para retração tangencial (ϵ_{r3}); 7,7% para a variação volumétrica (ΔV); e 2,63 para o coeficiente

de anisotropia de retração (A_r), atribuindo classificação a madeira quanto a contração volumétrica (ΔV), como de contração muito baixa. Quanto ao coeficiente de anisotropia (A_r) eles a qualificaram como madeira de alta instabilidade.

Os valores médios para a variação dimensional de retração dos estudos de Paes et al. (2015), de Moreno e Roque (2006), de Anda et al. (2014), de Motta (2011) e de Gutiérrez et al. (2008) são muito menores que os valores de retração para todas as direções avaliadas, mesmo considerando que árvores com lenho juvenil tendem a apresentar maior retração, principalmente no sentido axial. As médias da variação volumétrica (ΔV) deste estudo é maior que as encontradas por esses mesmos autores. Em comparação ao valor médio do coeficiente de anisotropia de retração (A_r) deste estudo (1,34) é muito menor que os aqui comparados considerando as diversas procedências e idades.

3.4 – PROPRIEDADES MECÂNICAS

3.4.1 – Variáveis das propriedades mecânicas

O resumo da análise de variância, a estatística descritiva e os coeficientes de variação dos valores das propriedades mecânicas, em função das seis procedências de *Tectona grandis* com nove anos de idade (fator 1) e das camadas do perfil radial, cerne e intermediária (fator 2), em esquema fatorial 6 x 2, estão apresentados na Tabela 2.11.

Observando-se a Tabela 2.11, houve efeito das diferentes procedências nas variáveis das propriedades mecânicas de compressão perpendicular as fibras ($f_{c,90}$) e módulo de ruptura em flexão estática (f_M). As médias das variáveis compressão paralela as fibras ($f_{c,0}$), dureza (f_H) e módulo de elasticidade em flexão estática (E_M) não diferiram estatisticamente entre si, em função das procedências. Para as camadas do perfil radial (fator 2) apenas as médias de compressão paralela as fibras ($f_{c,0}$) diferenciaram entre si significativamente. Para a interação entre as procedências e as camadas do perfil radial não houve diferença significativa ($\alpha \geq 0,05$).

Tabela 2.11 – Resumo da análise de variância e da estatística descritiva para as propriedades mecânicas, em função de seis procedências (fator 1) e das camadas do perfil radial (fator 2) da madeira de *Tectona grandis* com nove anos de idade, em esquema fatorial 6 x 2.

Análise de Variância e Estatística Descritiva						
Fonte de Variação	GL	$f_{c,0}$ (MPa)	$f_{c,90}$ (MPa)	f_H (MPa)	f_M (MPa)	E_M (MPa)
F Calculado						
P	5	3,29 ^{ns}	2,28 [*]	1,86 ^{ns}	3,26 [*]	1,26 ^{ns}
PR	1	27,27 [*]	2,90 ^{ns}	0,87 ^{ns}	0,69 ^{ns}	1,36 ^{ns}
P X PR	5	0,66 ^{ns}	1,85 ^{ns}	0,47 ^{ns}	1,52 ^{ns}	0,56 ^{ns}
Média	-	39,61	8,32	34,92	91,86	9.241,02
“σ”	-	2,57	1,43	6,60	7,21	798,42
Mínimo	-	34,26	5,55	24,35	76,75	7.658,72
Máximo	-	45,39	12,31	50,99	113,51	11.344,77
CV (%)	-	6,00	17,00	19,00	8,00	9,00

$f_{c,0}$: compressão paralela as fibras; $f_{c,90}$: compressão perpendicular as fibras; f_H : dureza; f_M : módulo de ruptura, em flexão estática; E_M : módulo de elasticidade, em flexão estática; GL: grau de liberdade; P: procedências; PR: perfil radial; σ : desvio padrão; CV: coeficiente de variação; *: significativo ao nível de 5% de significância ($0,01 \geq \alpha < 0,05$); ns: não foi significativo ($\alpha \geq 0,05$).

A média da compressão paralela as fibras ($f_{c,0}$) foi igual a 39,61 MPa e variaram entre 34,26 e 45,39 MPa, para os valores mínimos e máximos. Na compressão perpendicular as fibras ($f_{c,90}$) a média foi igual a 8,32 MPa e variaram entre 5,55 e 12,31 MPa. A dureza (f_H) a média foi de 34,92 MPa e variaram de 24,35 e 50,99 MPa. O módulo de ruptura em flexão estática (f_M) tem valor médio de 91,86 MPa, variando de 76,75 e 113,51 MPa. E o valor médio do módulo de elasticidade em flexão estática (E_M) foi igual a 9.241,02 MPa e variou entre 7.658,72 e 11.344,77 MPa (Tabelas 2.11).

Na Tabela 2.12, as médias da compressão perpendicular as fibras ($f_{c,90}$) produziram efeito significativo nas médias das seis procedências, onde a média de MT-SE é diferente da média do clone MT-00, porém, as médias dos clones MT-01, MT-02, MT-08 e MT-80 são estatisticamente iguais. Para o perfil radial (Fator 2) observa-se que os valores médios da compressão paralela as fibras ($f_{c,0}$) crescem no sentido medula-casca, com 38,05 MPa para o cerne e 41,26 MPa para a camada

intermediária. Para o módulo de ruptura em flexão estática (f_M) em função das procedências (fator 1) MT-SE possui o maior valor médio 103,73 MPa, por também possuir os maiores valores para densidades aparente e básicas (Tabela 2.8).

Tabela 2.12 – Resumo das médias e do teste de Tukey, para as propriedades mecânicas, em função de seis procedências (fator 1), e das camadas do perfil radial (fator 2), da madeira de *Tectona grandis* com nove anos de idade.

Médias e Teste de Tukey					
Fator 1 (procedências) / Níveis					
Procedências	$f_{c,0}$ (MPa)	$f_{c,90}$ (MPa)	f_H (MPa)	f_M (MPa)	E_M (MPa)
MT-SE	40,81 a	8,96 a	34,34 a	103,73 a	9.142,32 a
MT-00	39,80 a	6,90 b	31,72 a	92,98 b	9.216,17 a
MT-01	30,13 a	8,25 ab	28,52 a	90,42 b	8.923,91 a
MT-02	39,26 a	8,10 ab	33,93 a	89,73 b	9.204,66 a
MT-08	41,83 a	7,91 ab	32,41 a	92,92 b	9.772,58 a
MT-80	38,87 a	8,43 ab	31,04 a	86,43 b	8.890,78 a
Fator 2 (camadas do perfil radial) / Níveis					
Cerne	38,05 b	8,39 a	32,55 a	91,37 a	8.976,67 a
Intermediária	41,26 a	7,77 a	31,32 a	92,80 a	9.296,86 a

$f_{c,0}$: compressão paralela as fibras; $f_{c,90}$: compressão perpendicular as fibras; f_H : dureza; f_M : módulo de ruptura, em flexão estática; E_M : módulo de elasticidade, em flexão estática. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, nas colunas, para teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Moreno e Roque (2006) em estudo das propriedades mecânicas da madeira de *Tectona grandis* com oito anos de idade plantados na Bolívia, obtiveram os seguintes valores médios para as propriedades mecânicas, usando a norma ASTM D 143 (1993): 94,47 MPa para o módulo de ruptura em flexão estática (f_M); 10.324,82 MPa para o módulo de elasticidade em flexão estática (E_M); 45,16 MPa para a compressão paralela as fibras ($f_{c,0}$); 6,95 MPa para a compressão perpendicular as fibras ($f_{c,90}$); e 37,88 MPa para a dureza (f_H). As médias obtidas por estes autores estão próximas as médias deste estudo, com médias pouco

maiores para o módulo de ruptura em flexão estática (f_M) e para compressão paralela as fibras ($f_{C,0}$).

Em análise das variáveis das propriedades mecânicas da madeira de *Tectona grandis* com 11 anos de plantio comercial localizado em Michoacán-México, usando a metodologia COPANT 465 (1972) Antonio et al. (2017) obtiveram aos seguintes valores médios: 32,22 MPa para compressão paralela as fibras ($f_{C,0}$); 4,07 MPa para compressão perpendicular as fibras ($f_{C,90}$); e 56,06 MPa para dureza (f_H). Flórez et al. (2014) estudando as variáveis das propriedades mecânicas da madeira de *Tectona grandis* com 13 anos plantadas em Vazante-MG-BR, obtiveram os seguintes valores médios, compressão paralela as fibras ($f_{C,0}$) de 47 MPa e módulo de elasticidade em flexão estática (E_M) de 13.046 MPa, usando a norma ASTM D 143 (1994). Os resultados de Antonio et al. (2017) e de Flórez et al. (2014) para árvores com até 13 anos de idade são muito maiores que os resultados deste estudo indicando que, possivelmente a partir do 11º ano de idade as árvores de *Tectona grandis* em condições de rápido já finalizaram a transição para lenho adulto. Essa possibilidade depende de confirmação de dados de variáveis anatômicas para serem validadas.

Valero et al. (2005) em análise das propriedades mecânicas da madeira de *Tectona grandis* com 20 anos de idade em Barinas-Venezuela, conseguiram os valores médios de 52,24 MPa para compressão paralela as fibras ($f_{C,0}$); 11,10 Mpa para compressão perpendicular as fibras ($f_{C,90}$); e 100,50 MPa para o módulo de ruptura em flexão estática (f_M), usando a norma ASTM D 143.

Bhat et al. (2001) em estudo as propriedades mecânicas da madeira de *Tectona grandis* com idades entre 20 e 25 anos em Kerala-Índia, tiveram os seguintes resultados: para madeira juvenil de crescimento rápido, módulo de ruptura em flexão estática (f_M) de 98,3 MPa e módulo de elasticidade em flexão estática (E_M) de 12.695 MPa; para madeira juvenil de crescimento lento, módulo de ruptura em flexão estática (f_M) de 114 MPa e módulo de elasticidade em flexão estática (E_M) de 14.460 MPa; na madeira adulta de crescimento rápido o módulo de ruptura em flexão estática (f_M) foi de 124,2 MPa e módulo de elasticidade em flexão estática (E_M) foi de 15.746 MPa; e na madeira adulta de crescimento lento o módulo de ruptura, em flexão estática (f_M) foi de 134,6 MPa e módulo de elasticidade, em flexão estática (E_M) foi de 16.220 MPa.

Hardiyanto e Prayitno (2008) avaliando as propriedades mecânicas de *Tectona grandis* com idade entre 20 e 30 anos, de cinco procedências em Java, Indonésia, usando a norma DIN 3129 (1975), obtiveram as seguintes médias, na comunidade de South East Sulawesi: compressão paralela as fibras ($f_{c,0}$) de 58,4 MPa; módulo de ruptura em flexão estática (f_M) de 119,4 MPa; e módulo de elasticidade em flexão estática (E_M) de 11.537,8 MPa. E constataram que a posição radial não influenciou significativamente nas propriedades mecânicas, compressão paralela as fibras ($f_{c,0}$), módulo de ruptura em flexão estática (f_M) e módulo de elasticidade em flexão estática (E_M), porém, essas variáveis foram influenciadas pelas procedências da madeira.

Lima et al. (2011b) avaliando as propriedades mecânicas da madeira de *Tectona grandis* com 32 anos em Pederneiras-SP-BR, usando a norma ASTM D 143-94 (2003), obtiveram os seguintes valores médios, 46,93 MPa para a compressão paralela as fibras ($f_{c,0}$); 102,20 MPa, para módulo de ruptura em flexão estática (f_M) e 11.774,54 MPa para módulo de elasticidade em flexão estática (E_M). E, tal qual observado neste estudo, para as propriedades físico-mecânicas, os autores relataram que, ocorreu a tendência de aumento de valores das propriedades mecânicas no sentido medula-casca, no perfil radial. Descreveram ainda que, os valores tendem a se estabilizar a partir da parte intermediária. Provavelmente, pelo aumento da proporção de lenho adulto, em relação à madeira juvenil.

Tal como aconteceu com os valores médios obtidos para as propriedades anatômicas, químicas e físicas, os valores médios gerais deste trabalho são menores que os valores observados por Valero et al. (2005), Bhat et al. (2001), Hardiyanto e Prayitno (2008) e por Lima et al. (2011b) para madeira de *Tectona grandis* com idade maior que 13 anos, com destaque para a média do módulo de elasticidade em flexão estática (E_M) de Bhat et al. (2001) (14.460 MPa) que é 1,56 vezes maior que 9.241,02 MPa.

3.5 – COR DA MADEIRA POR COLORIMETRIA CIELab

Na Tabela 2.13 encontram-se os valores do F calculado com as significâncias, da análise de variância, bem como, os valores médios da estatística

descritiva das variáveis cromáticas: claridade (L^*), coordenadas vermelho/verde (a^*); coordenadas amarelo/azul (b^*), saturação (C) e ângulo da tinta (h^*), do sistema de cores CIELab (1976) da madeira das seis procedências de *Tectona grandis* com nove anos de idade, em DIC, em esquema fatorial 6 x 2 (fator 1 – 6 procedências e fator 2 – 2 camadas do perfil radial).

Tabela 2.13 – Resumo da análise de variância e da estatística descritiva para as variáveis cromáticas, em função de seis procedências (Fator 1) e das camadas do perfil radial (Fator 2) da madeira de *Tectona grandis* com nove anos de idade, em esquema fatorial 6 x 2.

Análise de Variância e Estatística Descritiva						
Variáveis Cromáticas						
Fonte de Variação	GL	L^*	a^*	b^*	C	h^*
F Calculado						
P	5	1,51 ^{ns}	2,02 ^{ns}	0,60 ^{ns}	0,67 ^{ns}	1,85 ^{ns}
PR	1	394,47 ^{**}	308,53 ^{**}	1,65 ^{ns}	12,41 ^{**}	208,37 ^{**}
P X PR	5	0,24 ^{ns}	2,28 ^{ns}	1,01 ^{ns}	1,16 ^{ns}	1,03 ^{ns}
Média	-	62,59	7,29	21,10	22,18	70,75
“σ”	-	8,80	2,44	2,75	2,60	5,72
Mínimo	-	48,01	2,59	16,68	16,94	60,18
Máximo	-	77,64	11,09	29,67	27,75	81,22
CV (%)	-	14,00	33,00	13,00	12,00	8,00

L^* : claridade; a^* : coordenadas vermelho/verde; b^* : coordenadas amarelo/azul; C: saturação; h^* : tonalidade; GL: grau de liberdade; P: procedências; PR: perfil radial; σ : desvio padrão; CV: coeficiente de variação; **: significativo ao nível de 1% de significância ($\alpha < 0,01$); ns: não foi significativo ($\alpha \geq 0,05$).

Quanto as procedências MT-SE, MT-00, MT-01, MT-02, MT-08, MT-80, observaram-se pelo teste F, que não houve diferenças significativa entre as médias das variáveis cromáticas. Para as camadas do perfil radial, cerne e alburno há diferença significativa para as médias das variáveis, claridade (L^*), coordenadas vermelho/verde (a^*), saturação (C) e ângulo da tinta (h^*). Entre as médias da variável coordenadas amarelo/azul (b^*) não houve diferença significativa. A interação das procedências com as camadas do perfil radial também não foi significativa (Tabela 2.13).

As médias gerais dos parâmetros da cor da madeira de teca foram: a claridade igual a 62,59; os matizes vermelho/verde igual a 7,29; os matizes amarelo/azul igual a 21,10; a saturação igual a 22,18 e a tonalidade igual a 70,75 (Tabela 2.13).

Os valores mínimos e máximos dos parâmetros colorimétricos, claridade (L^*) está entre 48,01 e 77,64, as coordenadas vermelho/verde (a^*) entre 2,59 e 11,09 e as coordenadas amarelo/azul (b^*) entre 16,68 e 29,67. Estes valores são compatíveis com os obtidos por Derkyi et al. (2009) em estudo da variação da cor da madeira da *Tectona grandis* de plantações de diferentes zonas ecológicas em Gana, e caracterizadas com o sistema CIELab (1976), obtiveram os seguintes resultados para os parâmetros da cor claridade (L^*) entre 42,86 e 68,31, coordenadas vermelho/verde (a^*) entre 6,00 e 16,94 e coordenadas amarelo/azul (b^*) entre 16,84 e 33,32, onde os valores de L^* , a^* e b^* indicam cor mais escura, com a presença das cores vermelho e amarela. Quanto as diferentes zonas ecológicas, observaram que as madeiras coletadas em locais mais úmidos são ligeiramente mais escuras.

A Tabela 2.14 apresenta o teste de comparação múltipla de Tukey, com significância de 5% para as médias das variáveis cromáticas para o Fator 1 – procedências e para o Fator 2 – camadas do perfil radial, para a madeira de *Tectona grandis*, com nove anos de idade.

Estes resultados confirmam os dados do teste de F, em que as médias das variáveis cromáticas para as procedências são estatisticamente iguais e que as médias nas camadas do perfil radial (cerne e alburno) são diferentes. Como esperado a cor do cerne e do alburno da madeira de *Tectona grandis* das procedências estudadas são estatisticamente diferentes, em função dos valores das variáveis L^* , a^* , C e h^* , com destaque para a variável b^* (amarela), que é determinante na formação e composição de agrupamento em cores. A variável a^* (vermelha), apesar de ser baixa (9,5), é 1,86 vezes maior no cerne, resultando numa tonalidade intensa, cor oliva ao cerne.

Tabela 2.14 – Resumo das médias e do teste de Tukey, para as variáveis cromáticas, em função de seis procedências (Fator 1) e das camadas do perfil radial (Fator 2) da madeira de *Tectona grandis* com nove anos de idade.

Médias das Variáveis Cromáticas e Teste de Tukey					
Fator 1 (procedências) / Níveis					
Procedências	L*	a*	b*	C	h*
MT-SE	61,48 a	7,59 a	20,55 a	22,03 a	69,85 a
MT-00	60,34 a	7,82 a	20,95 a	22,48 a	69,40 a
MT-01	64,04 a	6,87 a	20,21 a	21,46 a	71,57 a
MT-02	63,17 a	7,19 a	20,44 a	21,78 a	70,79 a
MT-08	63,64 a	6,84 a	21,05 a	22,48 a	72,69 a
MT-80	62,94 a	7,61 a	21,91 a	23,26 a	70,76 a
Fator 2 (camadas do perfil radial) / Níveis					
Cerne	54,24 b	9,50 a	21,28 a	23,34 a	65,73 b
Alburno	71,02 a	5,11 b	20,44 a	21,09 b	76,07 a

L*: claridade; a*: coordenadas vermelho/verde; b*: coordenadas amarelo/azul; C: saturação; h*: tonalidade. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, nas colunas. Foi aplicado o teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

A variável claridade (L*) igual a 71,02 é 1,31 vezes maior no alburno, conferindo maior claridade a este. Os valores médios de saturação (C), confirmam o grau de mesclagem dos matizes vermelho e amarelo com a cor cinza, ou seja, quanto menos cinza na cor, mais saturada esta é, produzindo as mesclas acinzentadas das cores da Tabela 2.14 A variável tonalidade (h*) confirma que apesar da diferença entre a cor do cerne e do alburno, há predominância da cor amarela na composição das cores da madeira, tanto para o cerne como para o alburno em todas as procedências colocando as cores da madeira de teca na região do amarelo (Figura 2.9).

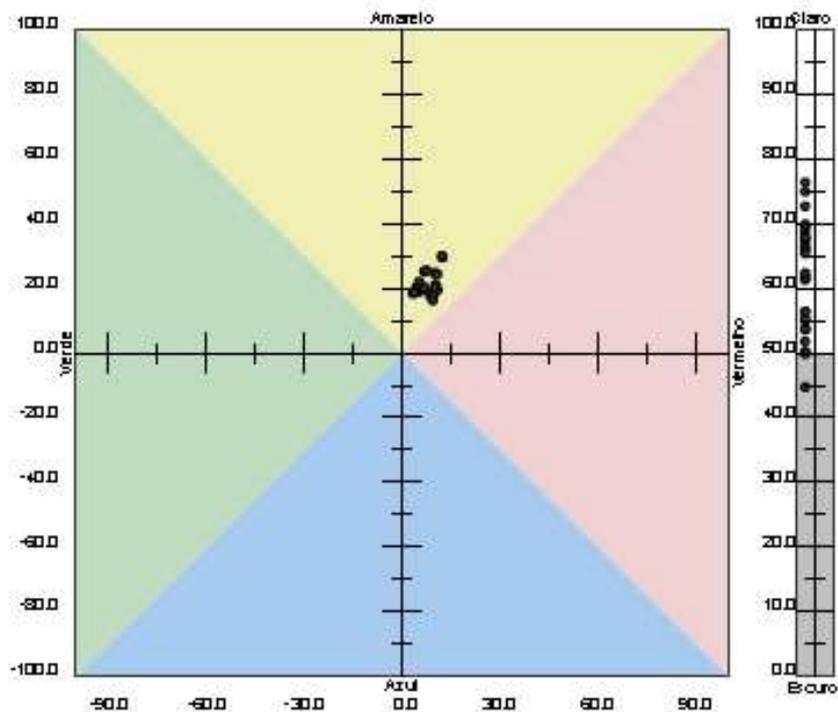


Figura 2.10 – Distribuição de escores, em função dos espectros de refletância, obtidos para o modelo estimador das cores da madeira de *Tectona grandis*, com o software iControl, com base no sistema colorimétrico – CIELab (1976), para as variáveis L^* , a^* e b^* .

Na Tabela 2.15 têm-se os valores médios das variáveis cromáticas para as procedências, nas camadas do perfil radial cerne e albarno. Observa-se que as variáveis cromáticas do sistema CIELab resultaram em três grupos de cores para as seções de cerne e um único grupo para as seções de albarno, para as 6 procedências testadas, utilizando-se a classificação em grupo de cores propostas por Camargos e Gonzalez (2001).

O albarno das seis procedências de *Tectona grandis* enquadrou-se no grupo 16, cor cinza-rosado. Para o cerne das procedências, apesar da análise de variância indicar que não há diferenças estatísticas entre as cores do cerne, a classificação agrupou a procedência semente no grupo 21, cor marrom-claro, a procedência MT-08 no grupo 13, cor marrom-oliva, e as procedências MT-00, MT-01, MT-02 e MT-80 no grupo 22, cor rosa acinzentado (Tabela 2.15).

Tabela 2.15 – Valores médios das variáveis cromáticas, em função das seis procedências (Fator 1) com as camadas do perfil radial (Fator 2) para a determinação da cor da madeira de *Tectona grandis* com nove anos de idade.

Médias das Variáveis Cromáticas e Grupos e Cores da Madeira						
Variáveis Cromáticas	L*	a*	b*	C	h*	Grupo / Cor
Fator 1 (procedências) e Fator 2 (camadas do perfil radial) / Níveis						
MT-SE – Cerne	53,53	10,08	20,32	22,70	63,40	21- Marrom-claro
MT-SE – Alburno	68,65	5,61	20,78	21,50	75,01	16 - Cinza-rosado
MT-00 – Cerne	54,40	9,34	20,73	22,70	65,39	22 - Rosa-acinzentado
MT-00 – Alburno	70,34	5,28	21,33	21,99	76,09	16 - Cinza-rosado
MT-01 – Cerne	55,89	9,17	21,02	22,98	66,34	22 - Rosa-acinzentado
MT-01 – Alburno	72,18	4,57	19,40	19,94	76,81	16 - Cinza-rosado
MT-02 – Cerne	53,84	9,56	20,83	22,95	65,08	22 - Rosa-acinzentado
MT-02 – Alburno	72,50	4,82	20,04	20,62	76,50	16 - Cinza-rosado
MT-08 – Cerne	55,20	9,66	22,85	24,82	67,15	13 - Marrom-oliva
MT-08 – Alburno	72,09	4,03	19,24	19,68	78,23	16 - Cinza-rosado
MT-80 – Cerne	53,66	9,20	21,92	23,81	66,99	22 - Rosa-acinzentado
MT-80 – Alburno	70,36	6,35	21,90	22,81	73,78	16 - Cinza-rosado

L*: claridade; a*: coordenadas vermelho/verde; b*: coordenadas amarelo/azul; C: saturação; h*: tonalidade.

Moya e Calvo-Alvarado (2012) em estudo da variação da cor da madeira de *Tectona grandis* com 15 anos de idade, e a sua relação com fatores ambientais, na Costa Rica, usando o sistema CIELab (1976) também constataram que a composição da cor da madeira do cerne e do alburno são diferentes, e que o alburno tem valores mais elevados de claridade (L*).

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 também obtiveram resultados em que se infere que as médias da variável cromática claridade (L*), na face tangencial, são diferentes estatisticamente entre si, no cerne e no alburno, para os dois espaçamentos. Quando se avalia claridade (L*), em função dos espaçamentos constata-se que estes são estatisticamente iguais nos alburnos e diferentes no cerne. Essa mesma constatação é feita para as variáveis coordenadas

vermelho/verde (a^*) e coordenadas amarelo/azul (b^*). Assim concluíram que a cor da madeira do cerne e do alburno são diferentes (a mesma constatação deste estudo) e que os alburnos nos dois espaçamentos têm a mesma cor.

Para Lukmandaru (2016) e Moya e Calvo-alvarado (2012) a variável claridade (L^*) tem forte correlação com os extrativos, devido aos componentes fenólicos, contidos nas paredes celulares da madeira. Isto certamente contribui de forma marcante na elevação da cor mais escura do cerne.

Bhat (1999), Moya e Calvo-Alvarado (2012) atribuíram a cor marrom-amarelado para o cerne de *Tectona grandis* com respectivamente cinco e 15 anos de idade, plantadas em sítios férteis e com clima seco. Queiroz et al. (2016) estudando o intemperismo artificial em lâminas de *Tectona grandis* com 13 anos de idade, tratadas com os produtos de acabamento seladora e *stain* constataram que, a face tangencial das lâminas *in natura*, sem acabamento, enquadrou-se pelos valores médios das variáveis cromáticas, sistema CIELab (1976) no agrupamento classificado como marrom-oliva.

Para este estudo da cor da madeira de *Tectona grandis*, infere-se que a variação na genética das plantas, as características edafoclimáticas do sítio e os constituintes químicos refletiram na composição das variáveis cromáticas do cerne e conseqüentemente, na variação da cor da madeira das seis procedências avaliadas. A análise nos dados dos constituintes químicos do cerne não foi satisfatória, para detectar as fontes de variações, que poderiam ajudar a entender as diferenças de cores. O constituinte químico, extrativos, é o que mais correlaciona-se com as cores da madeira. Porém, a variação dos valores desse constituinte entre as procedências não apontou uma definição precisa para uma avaliação. Talvez uma determinação mais fina dos componentes dos extrativos poderá fazer entender as variações de cores ocorridas no cerne desta espécie.

3.6 – CORRELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DA MADEIRA DE *Tectona grandis*

Na Tabela 2.16 encontra-se a matriz de correlação linear, bivariada de Pearson entre as variáveis das propriedades anatômicas, químicas, físicas e mecânicas, em função de seis procedências de *Tectona grandis*.

Tabela 2.16 – Correlação linear de Pearson, entre as variáveis das propriedades anatômicas, químicas, físicas e mecânicas, em função de seis procedências de *Tectona grandis* com nove anos de idade.

Correlações de Pearson

Variável	MFA (°)	CF (μm)	EPF (μm)	ρB (km.m^{-3})	ϵ_{r3} (%)	$f_{c,0}$ (MPa)	f_M (MPa)	E_M (MPa)	EX (%)	L (%)
MFA (°)	1	0,08 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	0,01 ^{ns}	-0,21 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	-0,25 ^{ns}	0,14 ^{ns}
CF (μm)	0,08 ^{ns}	1	0,22*	0,19 ^{ns}	0,15 ^{ns}	-0,32*	-0,18 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	0,33 ^{ns}
EPF (μm)	-0,07 ^{ns}	0,22 ^{ns}	1	0,27*	-0,03 ^{ns}	0,03 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,41*
ρB (km.m^{-3})	0,01 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,27*	1	0,02 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,35*	0,18 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	0,61**
ϵ_{r3} (%)	-0,21 ^{ns}	0,15 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	0,02 ^{ns}	1	-0,23 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	-0,33*	-0,28 ^{ns}	-0,14 ^{ns}
$f_{c,0}$ (MPa)	-0,05 ^{ns}	-0,32*	0,03 ^{ns}	0,04 ^{ns}	-0,23 ^{ns}	1	0,41**	0,39**	0,23 ^{ns}	-0,08 ^{ns}
f_M (MPa)	-0,01 ^{ns}	-0,18 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	0,35*	-0,04 ^{ns}	0,41**	1	0,37**	0,08 ^{ns}	0,29 ^{ns}
E_M (MPa)	-0,02 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	0,18 ^{ns}	-0,33*	0,39**	0,37**	1	0,50*	-0,26 ^{ns}
EX (%)	-0,25 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	0,14 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-0,28 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,50*	1	-0,12 ^{ns}
L (%)	0,14 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,41*	0,61**	-0,14 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	0,29 ^{ns}	-0,26 ^{ns}	-0,12 ^{ns}	1

CF: comprimento da fibra; EPF: espessura das paredes da fibra; MFA: ângulo microfibrilar de celulose; ρB : densidade básica; ϵ_{r3} : contração tangencial; $f_{c,0}$: compressão paralela as fibras; $f_{M,0}$: módulo de ruptura, em flexão estática; E_M : módulo de elasticidade, em flexão estática; EX: extrativos; L: lignina; **: significativo ao nível de 1% de significância ($\alpha < 0,01$); *: significativo ao nível de 5% de significância ($0,01 \geq \alpha < 0,05$); ns: não foi significativo ($\alpha \geq 0,05$).

A variável que mais correlacionou-se significativamente foi o módulo de elasticidade em flexão estática (E_M), que tem correlação positiva com a compressão

paralela as fibras ($f_{c,0}$), com o módulo de ruptura em flexão estática (f_M) e com o teor de extrativos (EX), e negativa com a contração tangencial (ϵ_{t3}). A densidade básica (ρ_B) tem correlação significativa e positiva com módulo de ruptura, em flexão estática (f_M), com teor de lignina (L), e com a espessura das paredes da fibra (EPF). O teor de extrativos (EX) têm correlação significativa e positiva com a espessura das paredes da fibra (EPF), e com a densidade básica (ρ_B), e correlação negativa com o módulo de elasticidade em flexão estática (E_M). A compressão paralela as fibras ($f_{c,0}$) tem correlação significativa e positiva com o módulo de ruptura em flexão estática (f_M), e com módulo de elasticidade em flexão estática (E_M), porém, correlaciona-se negativamente com o comprimento da fibra (CF). O teor de lignina (L) tem correlação significativa e positiva com a espessura das paredes da fibra (EPF) e com a densidade básica (ρ_B). O ângulo microfibrilar de celulose (MFA) é a única variável que não se correlacionou significativamente com nenhuma variável.

Moreira (1999) constatou que a correlação entre a densidade básica com as variáveis das propriedades mecânicas depende da espécie a ser testada, pois, ela é significativa para algumas, porém, falha em outras. Neste estudo para as variáveis das propriedades mecânicas a densidade básica correlaciona-se significativamente apenas com o módulo de ruptura em flexão estática (f_M), com correlação fraca (0,35*).

Chagas (2013) ao correlacionar diversas propriedades da madeira de *Tectona grandis*, encontrou significância apenas entre o diâmetro do lume da fibra, entre a largura da fibra (LF), com correlação perfeita e negativa, e entre a espessura das paredes da fibra (EPF), com correlação perfeita e negativa. A correlação perfeita e positiva foi somente entre o diâmetro do lume da fibra (DL) e a largura da fibra (LF). Das correlações para as propriedades anatômicas deste estudo o comprimento da fibra (CF) correlacionou-se significativamente apenas com compressão paralela as fibras ($f_{c,0}$), com correlação fraca e negativa. A espessura das paredes da fibra (EPF) tem correlação significativa com o comprimento da fibra (CF), com a densidade básica (ρ_B), com correlações desprezíveis, respectivamente 0,22* e 0,27*, e com o teor de lignina (L), com correlação fraca e positiva (0,41*).

Os valores dos coeficientes de correlação lineares mesmo quando significativos ficaram entre medianos e baixos, atribuindo magnitudes de

correlações entre moderadas e desprezíveis. Esse comportamento pode ser devido as diferenças entre as procedências, para as duas variáveis testadas.

3.7 – CLASSIFICAÇÃO DE IMPORTÂNCIA ENTRE VARIÁVEIS DE PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS NA QUALIFICAÇÃO DAS PROCEDÊNCIAS

Na tarefa de avaliar cada uma das variáveis das propriedades tecnológicas analisadas e correlacioná-las com as procedências e mesmo a correlação entre as variáveis, ao se considerar a complexidade e escala dos dados, tem-se uma tarefa exaustiva e com possibilidade de falhas, na interpretação da variável que tem mais relevância na qualificação e seleção das procedências. Como exemplo as variáveis de propriedades anatômicas. Na avaliação da Tabela 2.2 pode-se inferir que na seleção de procedências as variáveis comprimento de fibra (CF) e espessura das paredes da fibra (EPF) são as que mais separam as procedências, sendo que a procedência MT-80 é a que mais se destaca. Da avaliação da Tabela 2.12 tem-se a variável módulo de ruptura em flexão estática (f_M) como a que seleciona as procedências, porém, a procedência em destaque é a MT-SE. Então fica a pergunta, qual ou quais procedências são mais relevantes.

A técnica *two step cluster* (agrupamento de duas etapas) ao realizar análises exploratórias e estruturais dos dados das variáveis de diferentes tipos de medições e classificá-las é uma ferramenta que possibilita a correta tomada de decisão de qual ou quais são as procedências mais relevantes e quais variáveis contribuíram para essa seleção.

Na Figura 2.11-A tem-se o resumo do modelo preditor, com o resultado da formação de um único *cluster* ou agrupamento de dados para as 11 entradas ou variáveis analisadas, MFA, CF, EPF, ρ_B , ϵ_3 , f_{C0} , f_M , E_M , EX, L, mais as procedências de *Tectona grandis*. A Figura 2.11-B confirma os dados resultaram num único *cluster* e a Figura 2.11-C destinada a qualidade dos *clusters*, descreve que não há cálculo de qualidade para um único *cluster*.

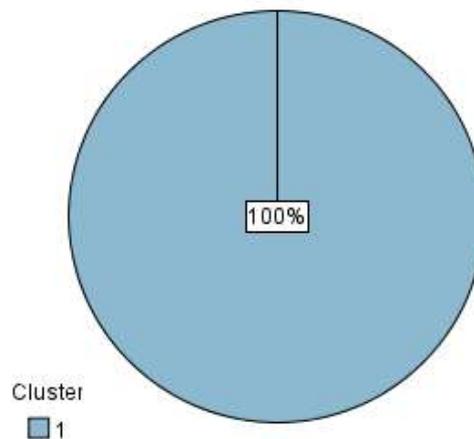
A formação de um único *cluster* sugere que todas as procedências de *Tectona grandis* compartilham características comuns quanto as propriedades tecnológica da madeira.

Resumo do modelo

Algoritmo	TwoStep
Entradas	11
Agrupamentos	1

A

Tamanhos de cluster



B

Qualidade de Cluster



A qualidade de cluster não pode ser calculada para uma solução de cluster único.

C

Figura 2.11 – Resumo do modelo preditor (A); Tamanhos de Cluster (B); e Qualidade de Cluster (C) – *Output, two step cluster.*

Na Figura 2.12 tem-se o comportamento das variáveis dentro do *cluster* com as variáveis classificadas por importância geral do modelo preditor, onde as procedências é a variável mais importante no modelo, seguida das variáveis comprimento de fibra (CF), módulo de elasticidade em flexão estática (E_M) e espessura das paredes da fibra (EPF). Assim é possível afirmar com confiança de 95% de probabilidade estatística que as variáveis comprimento de fibra (CF) e espessura das paredes da fibra (EPF) influenciam na seleção das procedências de *Tectona grandis* com nove anos de idade.

Agrupamentos

Cluster	1
Tamanho	100,0%
Entradas	PROCEDÊNCIAS
	CF
	EM
	EPF
	Extrativos
	fCO
	fM
	Lignina
	MFA
	RetraçãoTangencial
	DensidadeBásica

Figura 2.12 – Cluster com variáveis classificadas por importância geral do modelo preditor – *Output, two step cluster*.

Quanto as procedências as Figuras B e D, do Apêndice B.2 indicam a procedência clonal MT-01 com a mais relevante ao conjunto de dados analisado, com frequência de 25,0%, na combinação de dados.

3.8 QUALIFICAÇÃO DA MADEIRA DE *Tectona grandis* A PARTIR DE VARIÁVEIS DE PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS

Com os valores médios das variáveis das propriedades tecnológicas por procedências da Tabela 2.17 pode-se classificar a madeira de cada procedência avaliada, em função da classe de resistência, da norma NBR 7190 (1997), e assim otimizar a melhor possibilidade de uso de cada material.

Tabela 2.17 – Resumo dos valores médios por procedências das variáveis das propriedades tecnológicas, para enquadramento da madeira de *Tectona grandis* com nove anos de idade, conforme classe de resistência.

Valores Médios por Procedências e Classe de Resistência						
Variável	MT-SE	MT-00	MT-01	MT-02	MT-08	MT-80
ρ_B (km.m⁻³)	484,6 C 20	420,1 C 20	410,3 C 20	439,5 C 20	451,2 C 20	488,6 C 20
ρ_{AP} (km.m⁻³)	569,8 C 20	497,1 C 20	490,1 C 20	519,3 C 20	530,3 C 20	572,6 C 20
$f_{c,0k}$ (MPa)	28,6 C 20	27,9 C 20	21,1 C 20	27,5 C 20	29,3 C 20	27,2 C 20
$E_{c,0}$ (MPa)	10.158,1 C 20	10.240,2 C 20	9.915,4 C 20	10.227,4 C 20	10.858,4 C 20	9.878,7 C 20
CR	C 20	C 20	C 20	C 20	C 20	C 20

ρ_B : densidade básica; ρ_{AP} : densidade aparente; $f_{c,0k}$: compressão paralela as fibras, característico; $E_{c,0}$: módulo de elasticidade, na compressão paralela às fibras; CR: Classe de resistência.

Na classificação individual de cada variável, a madeira de todas as procedências, ficaram enquadradas na classe C 20, para densidade básica (ρ_B), e para densidade aparente (ρ_{AP}). Para o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras ($E_{c,0}$) ($E_M / 0,90$), todas as procedências enquadraram-se na classe C20. Em função da compressão paralela as fibras, característico ($f_{c,0k}$) ($f_{c,0} * 0,70$) todas as procedências enquadraram-se como C 20. Finger et al. (2003) em caracterização da madeira juvenil de *Tectona grandis*, oriunda do primeiro desbaste comercial, a qualificaram na classe de resistência C 20, da NBR 7190 (1997), em função dos valores médios da densidade básica (ρ_B) e da densidade aparente (ρ_{AP}). Assim, em consideração a tabela de classificação de resistência para dicotiledônias da norma NBR 7190 (1997), que visa a segurança na utilização da madeira como material, todas as seis procedências enquadram-se na classe C 20 (Tabela 2.17).

Com a classificação das variáveis das propriedades tecnológicas apresentadas na Tabela 2.18 é possível inferir que: a inclinação vertical das microfibrilas de celulose, bem como o comprimento das fibras (CF) refletem no menor módulo de elasticidade em flexão estática (E_M), e conseqüentemente no menor módulo de ruptura em flexão estática (f_M) e na menor compressão paralela as fibras ($f_{c,0}$).

Os valores de módulo de elasticidade em flexão estática (E_M), do módulo de ruptura em flexão estática (f_M) deste estudo são menores que os da madeira de

árvores com a idades de oito anos, de estudo de Moreno e Roque (2006), e muito menores que os valores observados em árvores adultas, com idades superiores a 20 anos, de trabalho de Hardiyanto e Prayitno (2008).

Tabela 2.18 – Resumo dos valores médios gerais, para classificação das variáveis das propriedades tecnológicas da madeira de *Tectona grandis* com nove anos de idade.

Valores Médios Gerais e Classificação			
Variável	Média Geral	Classificação	Fonte
MFA (°)	13,3	Inclinação vertical	Foelkel (1977)
CF (µm)	992,8	Fibras curtas	Coradin e Muñiz (1992)
ρB (km.m⁻³)	451,9	Madeira leve	Melo et al. (1990)
A_r (%)	1,3	Estabilidade excelente	Moreschi (2014)
EX (%)	4,6	Alto teor	Klock et al. (2006)
L (%)	31,9	Alto teor	Klock et al. (2006)
f_{c,0} (MPa)	39,6	Baixa resistência	* NBR 7190 (1997)
f_M (MPa)	91,9	Baixa resistência	* NBR 7190 (1997)
E_M (MPa)	9.241,0	Baixa rigidez	* NBR 7190 (1997)

MFA: ângulo microfibrilar de celulose; CF: comprimento da fibra; ρB: densidade básica; A_r: anisotropia de retração; EX: extrativos; L: lignina; f_{c,0}: compressão paralela as fibras; f_M: módulo de ruptura, em flexão estática; E_M: módulo de elasticidade, em flexão estática. * Classificação com base em NBR 7190 (1997), Primeiro Apêndice.

A leveza da madeira é provavelmente devido a quantidade de massa no volume, que é menor na madeira dessas procedências, pela presença de anéis porosos, que associados a maior proporção de lenho juvenil também reduziu a sua resistência mecânica.

Em razão da classificação individual das variáveis das propriedades tecnológicas e do enquadramento das seis procedências na mesma classe de resistência C 20, considera-se que estas têm a mesma aplicação e uso.

A madeira das seis procedências com nove anos, não é adequada para o uso estrutural, devido à baixa resistência mecânica. Porém, estão aptas para atender ao setor de movelaria e também ao setor de construção, embora, podem ser usadas na fabricação de diversos produtos. Na construção civil leve, tem utilização como: peças decorativas, em lâminas, painéis, compensados laminados

e compensados sarrafeados; têm aplicações como na confecção de esquadrias, portas, batentes e molduras; em utilidades em geral, pode ser usada como tábuas, ripas, rodapés, forros, assoalhos, pisos, tacos e parquetes. Na marcenaria é adequada na confecção de móveis finos.

Considerando os valores médios das variáveis das propriedades tecnológicas de diversos estudos, em diversas regiões e com diferentes idades, os resultados obtidos neste estudo, são compatíveis às árvores de *Tectona grandis* com idade de 9 anos.

Na avaliação das propriedades tecnológicas da madeira com nove anos, em função das camadas do perfil radial, as variáveis das propriedades anatômicas, por avaliarem as três camadas – cerne, intermediária e alburno, e por serem mais sensíveis as variações histológicas, em função da idade ou do tempo de formação do lenho, é a que mais produziu diferenças estatísticas. Onde dentre os valores dos caracteres, comprimento do elemento de vasos, comprimento de fibra, diâmetro do lume, diâmetro tangencial do lume e largura da fibra, pelo menos uma das médias é diferente. Para as variáveis das propriedades mecânicas as médias do cerne e da camada intermediária são significativamente diferentes apenas para resistência de compressão paralela às fibras. Para a maioria das variáveis de todas as procedências, observou-se que há tendência de crescimento dos valores médios no sentido medula-casca, com a constatação de estabilização de valores entre as variáveis anatômicas, indicando que o lenho está na transição para adulto.

As variáveis densidade básica (ρ_B), compressão paralela as fibras ($f_{c,0}$), módulo de elasticidade, em flexão estática (E_M), e módulo de ruptura, em flexão estática (f_M) são as que mais se correlacionaram com as outras variáveis tecnológicas, com correlação coerente, significativas.

Apesar das diferenças das anisotropias de contração, devido a presença de anéis porosos, que aumenta a contração no sentido tangencial, a estabilidade dimensional da madeira testada é classificada entre normal e excelente. Moreschi (2014) relata que o movimento da madeira é mais facilmente transferido para o exterior pelo lenho tardio mais denso e mais rígido, enquanto o movimento radial é parcialmente absorvido pelo lenho juvenil, mais poroso e mais mole.

O alto valor do teor de extrativos na madeira de *Tectona grandis*, com nove anos é benéfico, pois, contribui na composição da cor do cerne do lenho, além de

conferir a maior resistência ao lenho contra os ataques de xilófagos. Por outro lado, a alta concentração de lignina no lenho, apesar de contribuir para os valores da densidade da madeira, traz obstáculos ao seu uso para a produção de celulose.

Latorraca e Albuquerque (2000) descrevem que a maioria dos problemas que ocorrem com a qualidade da madeira é devido a algumas características do lenho juvenil, menor porcentagem de lenho outonal, maior ângulo microfibrilar, paredes celulares mais finas, baixa densidade, menor contração transversal, maior contração longitudinal, maior conteúdo de lignina e baixa resistência mecânica. E que a demarcação entre o lenho juvenil e adulto não é clara, devido a mudanças graduais nas células.

4 – CONCLUSÃO

Com os dados obtidos pode-se concluir que:

- As procedências influenciaram significativamente os valores dos caracteres anatômicos, porém, entre as médias do diâmetro tangencial do lume, da frequência de vasos, da espessura das paredes da fibra e da ultraestrutura ângulo microfibrilar de celulose nas camadas do perfil radial não houve diferença significativa. Para a interação entre as procedências e o perfil radial, houve diferença significativa para as médias do comprimento da fibra, da espessura das paredes da fibra e para as médias da largura da fibra.
- Os valores médios das variáveis comprimento do elemento de vasos, diâmetro tangencial do lume e diâmetro do lume cresceram no sentido medula-casca, com diferença significativa. Para as médias da largura da fibra houve tendência de crescimentos de valores no sentido medula-casca, porém sem significância estatística. Com essa tendência de crescimento pode-se inferir que o lenho juvenil está em transição para lenho adulto, porém, há a necessidade de monitoramento da estabilização dos valores do comprimento de fibras e da espessura das paredes da fibra para confirmação da idade a partir da qual as árvores produzem lenho adulto.
- Para os componentes químicos constatou-se a necessidade de estudos mais específicos dos extrativos, para detalhamento dos flavonóides – polifenóis

responsáveis pela pigmentação natural - contidos nas madeiras, com objetivo de explicar a diferença de cor entre os cerne das procedências avaliadas;

- Quanto as propriedades físicas apenas variáveis densidade básica, densidade aparente e variação volumétricas são estatisticamente diferentes entre si entre as procedências. As seis procedências são classificadas quanto a densidade básica como madeira leve. Quanto a estabilidade dimensional as procedências são classificadas como madeira com excelente estabilidade;

- Para as variáveis das propriedades mecânicas as médias do cerne e da camada intermediária são significativamente diferentes apenas para resistência de compressão paralela às fibras. Entre as procedências apenas as médias da compressão perpendicular às fibras e do módulo de ruptura em flexão estática são estatisticamente diferentes entre si;

- As variáveis densidade básica, módulo de ruptura em flexão estática e módulo de elasticidade em flexão estática são as que mais se correlacionaram significativamente com as outras variáveis tecnológicas com correlações coerentes e positivas;

- A técnica *two step cluster* qualificou a procedência clonal MT-01 com a mais relevante ao conjunto de dados analisados quanto as propriedades tecnológicas da madeira de *Tectona grandis*;

- Da classificação das madeiras das procedências constata-se que todas estão enquadradas na mesma classe de resistência, C 20, confirmando que nenhuma das procedências avaliadas se destaca isoladamente das demais. Onde pode-se inferir que a idade é a característica determinante na avaliação da madeira de *Tectona grandis* com nove anos de idade, pois, a quantidade de lenho juvenil, com percentual de 56,52% alborno ainda é maior que o percentual de cerne, 43,48%, influenciando nos resultados de todas as variáveis das propriedades tecnológicas.

Considerando o uso adequado da madeira de *Tectona grandis* como matéria-prima nas indústrias, conclui-se que não há diferença entre as procedências testadas. Pois, todas as seis procedências estão enquadradas na classe de resistência C 20, da NBR 7190 (1997).

CAPÍTULO III: CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DAS PROCEDÊNCIAS DE *Tectona grandis* POR INFRAVERMELHO PRÓXIMO

1 – INTRODUÇÃO

O estudo sobre as propriedades físicas e mecânicas é de grande importância para qualquer espécie florestal, com relevância para as espécies com alto valor comercial, por apresentarem grande potencial para usos diversos, como é o caso da espécie *Tectona grandis*, que tem um mercado seguro e rentável para exportações da madeira em tora e em produtos processados. Tal qual ocorre em toda a América Latina Valero et al. (2005) apresentam um cenário em que a *Tectona grandis* apesar de ser exótica na Venezuela possui grandes extensões de plantações comerciais, essa realidade e a perspectiva de uso desse material na indústria local em construção de habitações, como madeira roliça ou modular traz a necessidade de pesquisas tecnológicas, para aferir a qualidade e aptidão tecnológica da madeira produzida.

Na avaliação da qualidade da madeira, além das técnicas convencionais de análise, a evolução das técnicas aplicadas as ciências dos materiais favorecem a introdução de novas técnicas não-destrutivas de análise, fruto do desenvolvimento tecnológico. Baillères e Durand (2000) consideram que para teca, pelo valor e potencial genético das árvores em pé nas florestas, o uso de métodos de amostragem com a derrubada de árvores são inadequados, considerando adequadas as análises não-destrutiva para fins silviculturais e de uso final. Porém, a indústria de papel e celulose pela escala de produção e valor agregado é a que mais se beneficia com as modernas técnicas não-destrutivas de análise, que com o tempo e redução do custo dos equipamentos de análises, são usados atualmente na caracterização de madeira sólidas e em partículas de todas as áreas das ciências florestais.

Keiding et al. (1986) avaliando procedências internacionais de teca, consideraram que, a correlação entre caracteres é uma ferramenta a se considerar em qualquer seleção. A correlação pode ser estudada em diferentes níveis, por exemplo, ao nível de indivíduos, árvores ou procedências, sendo que a correlação com as procedências são as mais importantes. Correlações simples entre

caracteres podem ser comparadas a valores médios da procedência, tais correlações são denominadas de correlações fenotípicas. Neste trabalho será usada a correlação linear de Pearson para a seleção das variáveis das propriedades, anatômicas, químicas, físicas e mecânicas, que apresentaram a melhor correlação entre si e com as procedências de teca, para as predições, pela técnica de espectroscopia por infravermelho próximo (NIR).

A madeira sendo um material composto é constituída por três polímeros principais, celulose, hemicelulose e lignina, que servem como esqueleto, matriz, e por substâncias incrustadas, os extrativos, que são geralmente constituídos por compostos com baixo peso molecular, extracelular. Muitas pesquisas utilizando a técnica de espectroscopia NIR, associada a quimiometria - por análises multivariadas de dados - como método de avaliação qualitativa ou quantitativa tratam sobre esses compostos. Na espectroscopia com base na absorção ou emissão na faixa NIR - 800 a 2.500 nm (12.500 a 4.000 cm^{-1}) - os compostos orgânicos consistem em vários grupos funcionais, cujos fundamentos são vibrações moleculares, como eles são os mais intensos e mais simples é possível definir a estrutura molecular desses materiais orgânicos usando o espectro (TSUCHIKAWA, 2007; TSUCHIKAWA e SHWANNINGER, 2013; TSUCHIKAWA e KOBORI, 2015).

Com o avanço nas pesquisas utilizando os espectros de infravermelho próximo têm-se conseguido explicar a interação das ondas eletromagnéticas com os constituintes da madeira, a fim de se conhecer os fenômenos associados a essa técnica. Fackler e Schwanninger (2010) estudando polissacarídeos e ligninas em madeira de *Picea abies*, identificaram que as bandas de absorção OT são esperadas na região entre 6.340 cm^{-1} e 6.270 cm^{-1} e são, portanto, atribuídas aos grupos de celulose I_{β} (6.340 cm^{-1}), que a ligação O-H é atribuída ao grupo de celulose I_{α} (6.270 cm^{-1}) e que as várias vibrações de estiramento C-H para as bandas OT dos polissacarídeos são atribuídas a lignina, região entre 5.900 cm^{-1} e 5.500 cm^{-1} para distintos C-H-containing de grupos dessa macromolécula.

Ribeiro (2017) estudando as propriedades tecnológicas das madeiras de 20 espécies tropicais e nativas comercializadas no estado de Mato Grosso considerou a técnica de infravermelho próximo como eficiente para predição do comprimento das fibras e da densidade básica da madeira das espécies estudadas.

Este capítulo tem por objetivo analisar as propriedades anatômicas, físicas, químicas e mecânicas da madeira das procedências de *Tectona grandis* com a técnica óptica de infravermelho próximo, correlacionando-as com as técnicas convencionais para assim contribuir com a consolidação do uso das técnicas não destrutivas como ferramenta de análises.

2 – MATERIAL E MÉTODOS

2.1 – MATERIAL DE ESTUDO

Para os ensaios das propriedades tecnológicas estimadas a partir de infravermelho próximo com transformada de Fourier - FTNIR, os corpos de prova foram os mesmos utilizados nas caracterizações anatômicas e química, onde os discos com cinco centímetros de altura, retirados a 2,40 m dos fustes das árvores. Esses discos foram aplainados e lixados com lixa grana 80. Os ensaios não destrutivos por infravermelho foram realizados com seis tratamentos, em cinco repetições por tratamento, em esquema fatorial 6 X 2, sendo o fator 1, as seis procedências de *Tectona grandis* (MT-SE, MT-00, MT-01, MT-02, MT-08, MT-80), e o fator 2, as duas camadas do perfil radial (cerne e alburno), por parcela, totalizando 60 parcelas, em delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC).

2.2 – PROPRIEDADES DA MADEIRA DAS PROCEDÊNCIAS DE *Tectona grandis* – POR INFRAVERMELHO PRÓXIMO

Para a caracterização da madeira das procedências por técnica não-destrutiva com infravermelho, foram analisadas as variáveis das propriedades anatômicas, químicas, físicas e mecânicas.

2.2.1 – Variáveis das propriedades anatômicas, químicas, física e mecânicas preditas por infravermelho próximo

As variáveis das propriedades tecnológicas, espessura das paredes da fibra (EPF_{NIR}) (μ), ângulo microfibrilar de celulose (MFA_{NIR}) ($^{\circ}$), teor de lignina (L_{NIR}) (%), densidade básica ($\rho_{B_{NIR}}$) ($kg.m^{-3}$), módulo de elasticidade em flexão estática (EM_{NIR}) (MPa) e módulo de ruptura em flexão estática ($f_{M_{NIR}}$) (MPa), foram preditas pela técnica óptica de espectroscopia por infravermelho, a partir dos valores de referência, obtidos por técnicas convencionais de análises. Com exceção do MFA e do teor de lignina que foram selecionados por ser descrito na literatura como

variável que possui boa probabilidade de calibração com os dados dos espectros, as demais foram selecionadas por possuírem boa correlação entre si e com as procedências pelo teste de Pearson. As análises foram realizadas no Laboratório de Produtos Florestais do Serviço Florestal Brasileiro – LPF/SFB, utilizando o aparelho Tensor 37 da @Bruker Optik GmbH (Figura 3.1-A). Os parâmetros de análise foram: Resolução de 4 cm^{-1} ; com 32 varreduras (Scans), região espectral na região entre 12.000 cm^{-1} e 4.000 cm^{-1} , infravermelho próximo; e com resultados dos espectros em absorvância, coletados e registrados com o software OPUS, versão 6.5 Build: 6, 5, 97 @Bruker Optik GmbH (Figura 3.1-B).

A análise foi feita na meia parte dos discos retirados após a primeira seção de cada tora da árvore. Os discos foram preparados para a análise, primeiro por aplainamentos em plainas de mesa e depois por lixamentos com lixa grana 80. As amostras foram previamente climatizadas e durante as análises apresentaram umidade de 12%.

Os espectros de reflectância de radiação no infravermelho próximo foram coletados a partir de 30 corpos de prova, sólidos, na face transversal com três leituras na camada cerne e mais três leituras na camada alburno do perfil radial, totalizando 360 leituras e 11.520 varreduras. Todas as leituras foram coletadas com o acessório sonda óptica em um único dia e em sala com controle de temperatura e umidade relativa do ar, respectivamente 20 °C e $< 30\%$.

Na coleta de dados dos espectros, sobre os discos foi colocado o emissor de radiação (sonda óptica) (Figura 3.1-A). O equipamento emitiu a radiação nos comprimentos de ondas especificados e mediu o quanto da radiação é refletida. A diferença entre o emitido e o refletido são os valores de absorção da radiação pelo tecido vegetal nos diferentes comprimentos de ondas utilizados. Com isso, cada leitura gera um conjunto de valores da absorvância em diferentes comprimentos de ondas, o espectro. Cada espectro foi o resultado das varreduras realizadas pelo equipamento, a cada leitura, com base nas metodologias usadas por Curty (2013), Rosso et al. (2013) e Gouvêa et al. (2011).

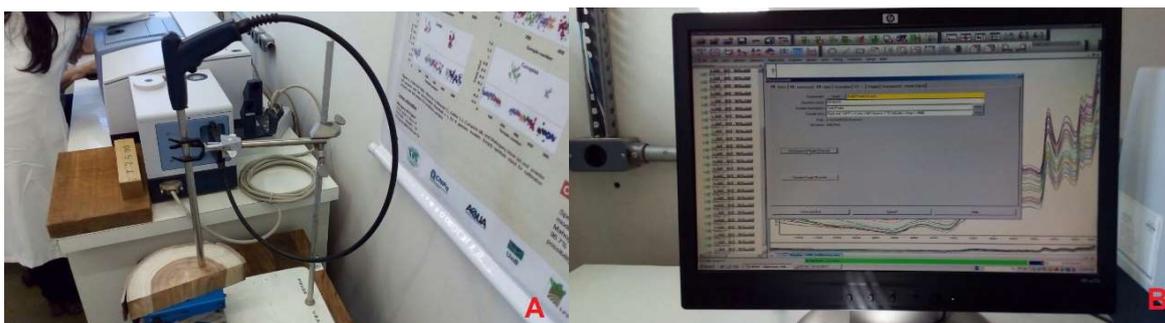


Figura 3.1 – Equipamento espectrofotômetro Tensor 37, da @Bruker, com sonda óptica coletando espectros da madeira sólida (A); e Padrão de coleta de espectros processados com o *Software* OPUS 6.5 (B).

Na construção dos modelos quimiométricos para predição das variáveis das propriedades tecnológicas da madeira sólida, foi utilizado o programa The Unscrambler® da CAMO as Norway, versão 9.7.

A calibração e validação dos modelos aos dados foram obtidas pelos mínimos quadrados parciais (PLS) e confirmadas pelo coeficiente de determinação (R^2) entre valores preditos e valores medidos e pela relação de desempenho do desvio (RPD), que pelas suas magnitudes – ≥ 2 – determinam a qualidade do modelo preditor. Outros valores considerados na validação dos modelos foram: a raiz quadrada do erro padrão de calibração (RMSEC), que foi determinada pela equação 3.1, que expressa o erro produzido na calibração dos modelos; e a raiz quadrada do erro padrão de validação cruzada (RMSECV), que foi determinada pela equação 3.2, que expressa o erro da validação – proveniente da calibração e calculados a partir de cinco grupos ou segmentos com 36 amostras por grupos, das mesmas metodologias utilizadas por Kelley et al. (2004), Chaix et al. (2010), Gouvêa et al. (2011) e Rosso et al. (2013). Quanto mais baixos forem os valores de RMSEC, RMSECV e RMSEL, mais preciso é o modelo preditor.

$$RMSEC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{NC} (\hat{y}_i - y_i)^2}{NC - K - 1}} \quad (3.1)$$

Onde:

- RMSEC = raiz quadrada do erro médio quadrático de calibração;
- \hat{y}_i = valor do constituinte de interesse da amostra i , predito em calibração;
- y_i = valor de referência da amostra i , ou seja, o valor conhecido;
- NC = número de amostras usadas para o desenvolvimento da calibração; e

- K = número de fatores usados para o desenvolvimento da calibração.

$$\text{RMSECV} = \sqrt{\sum_{i=1}^{NP} \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{NP-1}} \quad (3.2)$$

Onde:

- RMSECV = raiz quadrada do erro médio quadrático de validação cruzada;
- \hat{y}_i = valor do constituinte de interesse para a validação da amostra i , estimado usando a calibração;
- y_i = valor conhecido do constituinte de interesse da amostra i – valor de referência;
- e
- NP = número de amostras da predição.

As rotinas das análises utilizando o programa The Unscrambler, foram feitas conforme a sequência:

- Pelos pré-tratamentos dos dados espectrais com a verificação de ruídos e variações das linhas de base – *baseline* – dos espectros por tratamento e para todos os tratamentos. Para a correção dos ruídos e das linhas de base, fez-se a transformação dos dados de referência e dos dados dos espectros por variação normal padrão (SNV), com a transformação dos dados dos espectros pela primeira derivada (1ª Der) e transformando dos dados dos espectros com a segunda derivada (2ª Der).
- Após cada transformação foi aplicada a análise de componentes principais (PCA) dos espectros transformados, com a avaliação das porcentagens das variâncias por componente principal e da porcentagem da variância acumulada, para os principais componentes da matriz;
- Após os pré-tratamentos os dados foram submetidos a calibração/validação dos modelos para as estimativas das variáveis tecnológicas por FTNIR pela inserção dos dados de referência transformados por SNV junto aos dados espectrais.
- Na sequência fez-se a análise dos dados por PSL – com uma única variável resposta por vez – na calibração e na validação cruzada, para todos os dados dos tratamentos e para os dados por tratamento, para a obtenção dos valores da raiz quadrada do erro médio quadrático de calibração (RMSEC). A confirmação da qualidade dos modelos preditores foi em função dos valores de referência, com a

determinação dos valores da raiz quadrada do erro médio quadrático de validação cruzada (RMSECV), da relação de desempenho de desvio (RPD), e do coeficiente de determinação para validação cruzada (R^2_{cv}), confirmados e determinados com o programa Excel, da Microsoft®, versão 365.

Nos pré-tratamentos, na calibração/validação dos modelos, não houve a retirada de amostras com valores extremos (*outliers*), devido ao pequeno número de amostras que resultou em pequena variância entre os dados. Na validação cruzada o número de segmentos (ns) foi de cinco, o programa calculou automaticamente o número de amostras por segmento (as) em função do número de amostras ou elementos de cada análise (n), para a obtenção da raiz quadrada do erro médio quadrático de validação cruzada (RMSECV).

2.3 – ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para as variáveis preditas a partir de FTNIR, aplicou-se a técnica estatística de análise multivariada de dados, com: análise de componentes principais (PCA), nas análises exploratórias dos pré-tratamentos; e com a análise de regressão por mínimos quadrados parciais (PLS), na calibração, validação e predição. Sendo os dados de referências, as variáveis independentes, e valores preditos, as variáveis dependentes nos modelos.

A necessidade da análise de regressão é para definir os modelos que estimaram as variáveis das propriedades tecnológicas da madeira de *Tectona grandis*. As análises multivariadas foram processadas com o programa The Unscrambler, versão 9.7.

3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 – PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DA MADEIRA POR FTNIR

3.1.1 – Pré-tratamentos dos dados espectrais por infravermelho próximo

Na tabela 3.1 têm-se os valores da variação normal padrão; da primeira derivada, e da segunda derivada, com seus respectivos valores de porcentagem da variância acumulada das componentes principais (PC1 + PC2), de análise de componentes principais em pré-tratamento de espectros, medidos nas camadas

cerne e albarno da face transversal em madeira de seis procedências de *Tectona grandis* com nove anos de idade.

Dos resultados dos pré-tratamentos com a conversão dos espectros originais, em espectros transformados, constata-se que os dados transformados pela primeira derivada, geraram resultados com maior variância acumulada, pela remoção dos efeitos relacionados com os dados fora de linha (*offset*) (α).

Tabela 3.1 – Valores da porcentagem de variância (% var), para os dados dos espectros FTNIR da madeira de *Tectona grandis* com nove anos de idade, em função das camadas do perfil radial.

Pré-tratamentos – FTNIR			
Perfil radial	SNV %	SNV + 1ª Der. %	SNV + 2ª Der. %
Cerne	79 + 17%	99 + 01%	99 + 01%
Albarno	83 + 15%	99 + 01%	99 + 01%

SNV: variação normal padrão; 1ª Der: primeira derivada; 2ª Der: segunda derivada.

Os espectros foram normalizados por SNV, transformados e pela primeira e ou pela segunda derivada de Savitzky Golay, na busca da melhor pré-tratamento - maior correlação dos valores medidos para a predição de modelos multivariados por PLS com menor RMSECV.

3.1.2 – Variáveis de propriedades tecnológicas por infravermelho próximo

Nas tabelas 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7 estão respectivamente os resultados dos modelos das variáveis tecnológicas espessura das paredes da fibra (EPF_{NIR}), ângulo microfibrilar de celulose (MFA_{NIR}), teor de lignina (L_{NIR}), densidade básica (ρB_{NIR}), módulo de ruptura em flexão estática (f_{MNIR}) e módulo de elasticidade em flexão estática (E_{MNIR}) para a madeira de *Tectona grandis* com nove anos de idade, a partir de espetros de infravermelho próximo com os seus valores de referência e preditos, bem com as suas respectivas estatísticas descritivas.

Para a espessura das paredes da fibra (EPF_{NIR}) (Tabela 3.2), e para o ângulo microfibrilar de celulose (MFA_{NIR}) (Tabela 3.3) têm-se que os modelos matemáticos e estatísticos de análises multivariadas de dados ajustaram os dados dos espectros

aos valores de referência dessas duas variáveis anatómicas, ou seja, o modelo multivariado respondeu bem aos objetivos.

Os valores da espessura das paredes da fibra (EPF_{NIR}) variaram entre 4,74 μm no cerne e 5,09 μm no alburno. Os valores do ângulo microfibrilar de celulose (MFA_{NIR}), estão entre 14,52° no alburno e 16,28° no cerne.

Os valores de RMSEC variaram entre 0,90 e 1,52 μm para espessura das paredes da fibra (EPF_{NIR}) e entre 2,10 e 2,29° para o ângulo microfibrilar de celulose (MFA_{NIR}). Os valores de RMSECV variaram entre 1,47 e 1,92 μm para espessura das paredes da fibra (EPF_{NIR}) (Tabela 3.2) e entre 2,76 e 2,93° para ângulo microfibrilar de celulose (MFA_{NIR}) (Tabela 3.3). Todos os valores de R^2_{CV} são maiores que 93,0%. Os valores de RPD foram sempre maiores que 2, confirmando que os modelos PLS aplicados são ótimos preditores para a espessura das paredes da fibra (EPF_{NIR}) e para o ângulo microfibrilar de celulose (MFA_{NIR}).

Tabela 3.2 – Espessura das paredes da fibra da madeira de *Tectona grandis* com nove anos de idade, predita por FTNIR, em função das camadas do perfil radial.

Calibração e Validação Cruzada com PLS para FTNIR

Espessura das Paredes da Fibra (EPF_{NIR}) (μm)

Perfil radial	n	ns	MÉDIA X	MÉDIA Y	“ σ ”	RMSEC	RMSECV	R^2_{CV}	RPD
Cerne	90	5	4,30	5,09	7,27	1,52	1,92	0,93	3,78
Alburno	90	5	4,30	4,74	7,06	0,90	1,47	0,96	4,81

n: número de elementos ou amostras (referências); ns: número de segmentos; X: valor de referência; Y: valor predito; RMSEC: raiz quadrada do erro médio quadrático de calibração; RMSECV: raiz quadrada do erro médio quadrático de validação cruzada; R^2_{CV} : coeficiente de determinação para validação cruzada; “ σ ”: desvio padrão; RPD: relação de desempenho do desvio.

Tabela 3.3 – Ângulo microfibrilar de celulose da madeira de *Tectona grandis* com nove anos de idade, predito por FTNIR, em função das camadas do perfil radial.

Calibração e Validação Cruzada com PLS para FTNIR

Ângulo Microfibrilar de Celulose (MFA_{NIR}) (°)

Perfil radial	n	ns	MÉDIA X	MÉDIA Y	“ σ ”	RMSEC	RMSECV	R^2_{CV}	RPD
Cerne	90	5	12,50	15,18	21,33	2,29	2,93	0,98	7,28
Alburno	90	5	12,50	14,52	20,61	2,10	2,76	0,98	7,47

n: número de elementos ou amostras (referências); ns: número de segmentos; X: valor de referência; Y: valor predito; RMSEC: raiz quadrada do erro médio quadrático de calibração; RMSECV: raiz quadrada do erro médio quadrático de

validação cruzada; R^2_{CV} : coeficiente de determinação para validação cruzada; " σ ": desvio padrão; RPD: relação de desempenho do desvio.

Hein et al. (2012) em estimativa do ângulo microfibrilar em madeira de *Eucalyptus urophylla*, com 6 anos, em madeira de híbrido de *Eucalyptus urophylla* + *grandis* com 14 anos, por meio da FTNIR, com leituras de espectros na face radial, obtiveram valores médio de ângulo microfibrilar de celulose (MFA) médio de $10,6^\circ$, com RPD e R^2_{CV} de respectivamente 2,07 e 0,74, e com RMSECV de $1,33^\circ$, em modelo tratado por SNV + 1ª Der.

Viana et al. (2010) em estudando modelos de calibração e a espectroscopia no infravermelho próximo para predição das propriedades químicas e físicas da madeira de *Eucalyptus* com 3 anos, de florestas localizadas em 4 município de MG/BR, obtiveram para validação cruzada, modeladas por PLS, de espectros obtidos na face transversal da madeira, os seguintes valores: R^2_{CV} de 0,86 e RPD de 2,00 para, densidade básica (ρ_B); e R^2_{CV} de 0,86 e RPD de 1,90 para, lignina total, em plantio de Santa Bárbara.

A Tabela 3.4 mostra os parâmetros utilizados na análise multivariada por regressão PLS, e foram eficientes para predizer o teor de lignina (L_{NIR}), onde os espectros e os valores de referências geraram médias preditas de 31,88% no alburno e 31,85% no cerne. Com valores dos coeficientes de determinação (R^2_{CV}) da validação cruzada, para as procedências com RPD maiores que 2, variando entre 0,80 e 0,89.

Kelley et al. (2004) usando a espectroscopia de infravermelho próximo para predizer a composição química e as propriedades mecânicas da madeira sólida de *Pinus loblolly*, em Arkansas-USA, com espectros inteiros e reduzidos constataram os seguintes valores: para o teor de lignina (L) a média predita é de 27,9%, com RMSEP de 1,0, e com coeficiente de correlação de 0,76; para ângulo microfibrilar de celulose (MFA) a média predita foi de $19,0^\circ$, com RMSEP de 6,8%, e com coeficiente de correlação de 0,68; para o módulo de ruptura, em flexão estática (f_M) a média predita foi de 76,6 MPa, com RMSEP de 10,4 MPa, com coeficiente de correlação de 0,94; para o módulo de elasticidade, em flexão estática (E_M) a média predita foi de 8.540 MPa, com RMSEP de 1,49 MPa, com coeficiente de correlação de 0,87, em modelos com intervalo espectral entre 500 e 2.400 nm, em PLS com 5 PC.

Tabela 3.4 – Teor de lignina da madeira de *Tectona grandis* com nove anos de idade, predito por FTNIR, em função das camadas do perfil radial.

Calibração e Validação Cruzada com PLS para FTNIR

Teor de Lignina (L_{NIR}) (%)

Perfil radial	n	ns	MÉDIA X	MÉDIA Y	“σ”	RMSEC	RMSECV	R ² _{cv}	RPD
Cerne	30	5	31,84	31,85	0,04	0,00	0,04	0,80	2,28
Alburno	30	5	31,84	31,88	0,04	0,00	0,01	0,89	2,98

P: procedências; n: número de elementos ou amostras (referências); ns: número de segmentos; X: valor de referência; Y: valor predito; RMSEC: raiz quadrada do erro médio quadrático de calibração; RMSECV: raiz quadrada do erro médio quadrático de validação cruzada; R²_{cv}: coeficiente de determinação para validação cruzada; “σ”: desvio padrão; RPD: relação de desempenho do desvio.

Os espectros inteiros, com faixa espectral entre 12.000 e 4.000 cm⁻¹, medidos na face transversal e pré-tratados por SNV e pela primeira derivada não foram eficientes para correlacionar-se os dados dos espectros com os valores de referência das variáveis das propriedades tecnológicas densidade básica, módulo de elasticidade em flexão estática e módulo de ruptura em flexão estática das procedências de *Tectona grandis* testadas, ou seja, os modelos não são bons preditores, pois, os valores preditos possuem baixa correspondência ao valor real medido.

Para densidade básica (ρ_{B_{NIR}}) o modelo preditor do cerne é satisfatório, com valor do coeficiente de determinação de 65% e RPD de 1,67. Na camada alburno o modelo de validação para a densidade básica tem coeficiente de determinação de 52% e RPD de 1,42 é classificado como insuficiente, pois, com relação a R², os regressores não explicaram satisfatoriamente a quantidade variabilidade dos dados e o RDP muito menor que 2 confirma a alta variabilidade da média e a baixa precisão do cálculo da média. O modelo resultou em média predita (Y) de 452,57 kg.m⁻³ no alburno e 451,04 kg.m⁻³ no cerne (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 – Densidade básica da madeira de *Tectona grandis* com nove anos de idade, predita por FTNIR, em função das camadas do perfil radial.

Calibração e Validação Cruzada com PLS1 para FTNIR									
Densidade Básica ($\rho_{B_{NIR}}$) (kg.m^{-3})									
Perfil radial	N	ns	MÉDIA X	MÉDIA Y	“σ”	RMSEC	RMSECV	R²_{CV}	RPD
Cerne	60	5	451,87	451,04	0,58	0,12	0,35	0,65	1,67
Alburno	60	5	451,87	452,57	0,58	0,18	0,41	0,52	1,42

n: número de elementos ou amostras (referências); ns: número de segmentos; X: valor de referência; Y: valor predito; RMSEC: raiz quadrada do erro médio quadrático de calibração; RMSECV: raiz quadrada do erro médio quadrático de validação cruzada; R²_{CV}: coeficiente de determinação para validação cruzada; “ σ ”: desvio padrão; RPD: relação de desempenho do desvio.

Para o módulo de ruptura em flexão estática (f_{MNIR}) o modelo preditor gerado a partir de 60 amostras de referência e de 180 espectros, tem R²_{CV} de 0,52 para o alburno e de 0,24 para o cerne, para respectivos RPD de 1,43 de 1,14, gerando média predita (Y) de 93,80 e de 94,46 MPa no alburno e no cerne também são insuficientes (Tabela 3.6). O modelo de calibração de trabalho de Ribeiro (2017) com espectros obtidos na face tangencial de madeira tropical também teve baixo desempenho, explicando até 52% dos valores de referência, e classificado pela autora com insuficiente (RPD = 1,38).

Tabela 3.6 – Módulo de ruptura em flexão estática da madeira de *Tectona grandis* com nove anos de idade, predito por FTNIR, em função das camadas do perfil radial.

Calibração e Validação Cruzada com PLS para FTNIR									
Módulo de Ruptura (f_{MNIR}) (MPa)									
Perfil radial	n	ns	MÉDIA X	MÉDIA Y	“σ”	RMSEC	RMSECV	R²_{CV}	RPD
Cerne	60	5	93,90	94,46	0,10	0,05	0,08	0,24	1,14
Alburno	60	5	93,90	93,80	0,10	0,03	0,07	0,52	1,43

n: número de elementos ou amostras (referências); ns: número de segmentos; X: valor de referência; Y: valor predito; RMSEC: raiz quadrada do erro médio quadrático de calibração; RMSECV: raiz quadrada do erro médio quadrático de validação cruzada; R²_{CV}: coeficiente de determinação para validação cruzada; “ σ ”: desvio padrão; RPD: relação de desempenho do desvio.

Para o módulo de elasticidade em flexão estática (E_{MNIR}) as camadas alburno e cerne renderam modelos com boa qualidade e exatidão consistentes,

com respectivos valores de R^2_{cv} de 0,63 e 0,60 para RPD de 1,59, preditas a partir de 180 espectros e 60 amostras de referência, com médias preditas (Y) de 9.074,44 e 9.074,34 MPa no alburno e no cerne (Tabela 3.7).

Rosso (2010), em predição das propriedades de *Eucalyptus grandis* Maiden com 27 anos, por espectroscopia no infravermelho próximo constatou que os seguintes valores para os parâmetros que determinam a qualidade dos modelos preditores: RPD entre 1,24 e 1,50 e R^2_v entre 0,35 e 0,51 para, módulo de ruptura em flexão estática (f_M), de espectros obtidos na face radial, com melhores valores encontrados nos modelos pré-tratados por SNV + a 1ª Der; RPD variando entre 1,42 e 1,78 e R^2_v entre 0,51 e 0,66 para, módulo de elasticidade, em flexão estática (E_M), com espectros medidos na face radial, sem pré-tratamentos; e RPD entre 1,77 e 2,29 e R^2_v entre 0,68 e 0,74, para massa específica a 0%, medidos na face radial, e com os maiores valores encontrados no modelos com pré-tratamentos por SNV + 1ª Der. Com a mesma performance constatada neste estudo para essas três variáveis, sendo que a autora apoiando-se em Schimleck e Evans (2001), que consideram o RPD de 1,5 como suficiente para qualificar o modelo, e conclui que os seus modelos satisfatórios na predição.

Tabela 3.7 – Módulo de elasticidade em flexão estática da madeira de *Tectona grandis* com nove anos de idade, predito por FTNIR, em função das camadas do perfil radial.

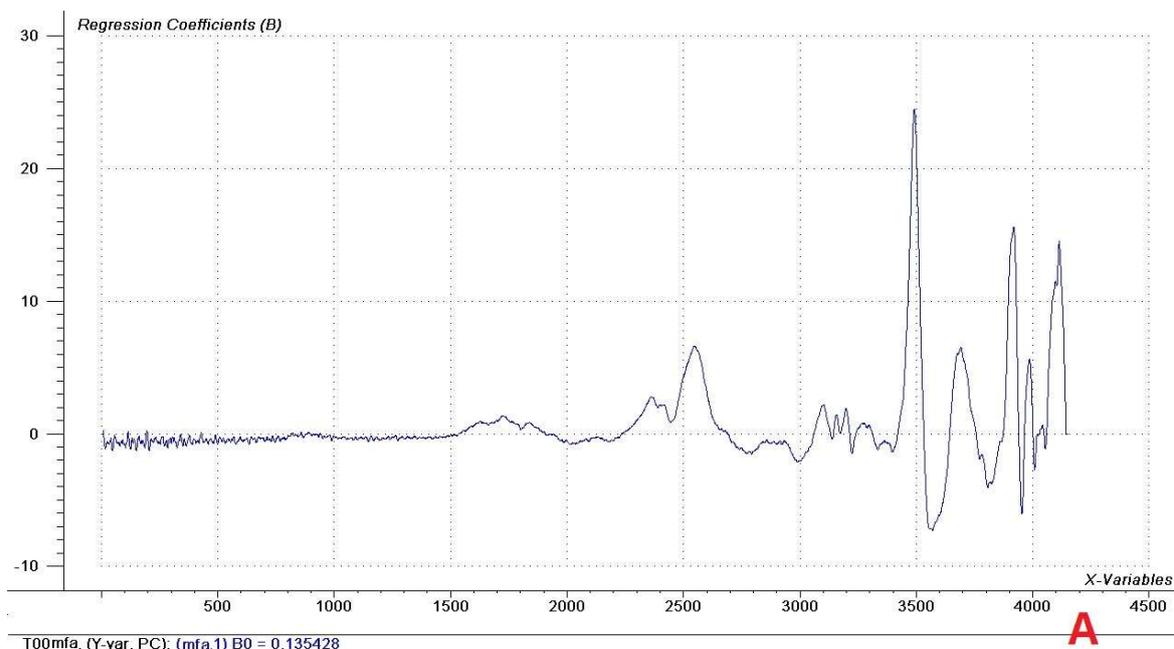
Calibração e Validação Cruzada com PLS para FTNIR									
Módulo de elasticidade (E_{MNIR}) (MPa)									
Perfil radial	N	ns	MÉDIA X	MÉDIA Y	“σ”	RMSEC	RMSECV	R^2_{cv}	RPD
Cerne	60	5	9.074,42	9.044,44	0,03	0,01	0,02	0,60	1,59
Alburno	60	5	9.074,42	9.074,34	0,03	0,01	0,02	0,63	1,59

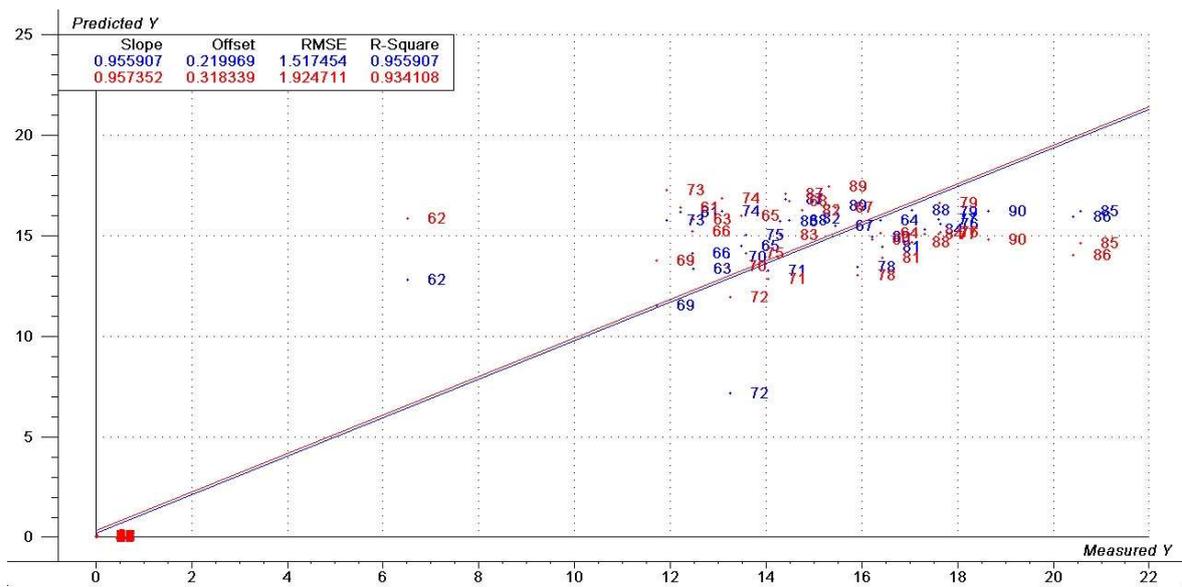
n: número de elementos ou amostras (referências); ns: número de segmentos; X: valor de referência; Y: valor predito; RMSEC: raiz quadrada do erro médio quadrático de calibração; RMSECV: raiz quadrada do erro médio quadrático de validação cruzada; R^2_{cv} : coeficiente de determinação para validação cruzada; “ σ ”: desvio padrão; RPD: relação de desempenho do desvio.

Na Figura 3.2-A, de espectro de absorvância transformado por SNV + 1ª derivada de Savitzki e Golay, para o cerne da procedência MT-00-C, em predição do ângulo microfibrilar de celulose (MFA_{NIR}), observa-se que no modelo PLS, os

dados de referência possuem correlação muito forte com os dados dos espectros ($r = 0,9825$), que reflete em um espectro inteiro, com pouco ruído.

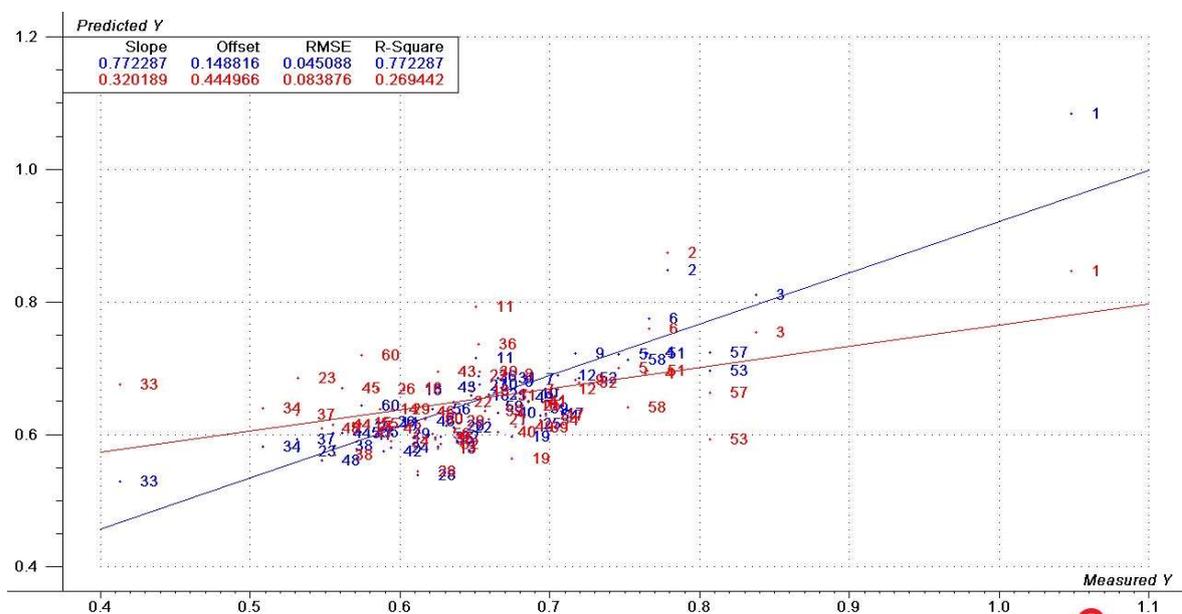
Modelando a variável de interesse com dados bem correlacionados ($r = 0,9644$ e $R^2_{CV} = 93,41\%$) foi possível obter uma maior exatidão, como observado na Figura 3.2-B, em que as coordenadas dos escores preditos estão muito próximos aos escores de referência. Por outro lado, a PLS que modela a variável módulo de elasticidade em flexão estática (E_{MIR}), para o cerne das procedências na Figura 3.2-C resultou em coordenadas dos escores preditos afastados dos escores de referência, devido à baixa exatidão do modelo, coeficiente de determinação (R^2_{CV}) de 26,94% para a validação cruzada e coeficiente de correlação (r) de 0,4892.





AQ - Cerne - epf, (Y-var, PC): (epf,2) (epf,2)

B



AQ - Cerne - fm0, (Y-var, PC): (fm0,3) (fm0,3)

C

Figura 3.2 – Espectros de absorvância transformados por SNV e 1ª derivada de Savitzki e Golay (A). Resultados de validação cruzada dos modelos PLS, de predição por FTNIR, em função dos valores de referência (B) e (C) para madeira de *Tectona grandis* com nove anos.

Os espectros de FTNIR medidos na face transversal na madeira sólida e correlacionados com as propriedades anatômicas, químicas, físicas e mecânicas

geraram modelos multivariados por PLS que variaram entre modelos ruins e ótimos modelos.

Os modelos preditores das variáveis da propriedade anatômica, espessura das paredes da fibra (EPF_{NIR}) e ângulo microfibrilar de celulose (MFA_{NIR}) foram ótimos, em função da quantidade de amostras de referência produziram modelos com R_{CV}^2 maiores que 93% e com RPD maiores que 2. As variáveis das propriedades físicas e químicas, que possuem bons modelos preditores com R_{CV}^2 entre 80 e 80% para lignina (L_{NIR}), entre 52 e 65% para densidade básica (ρ_{BNIR}) e entre 60 e 63% para o módulo de elasticidade em flexão estática (E_{MNIR}). Os dados do módulo de ruptura em flexão estática (f_{MNIR}) das propriedades mecânicas não geraram bons modelos, pois, apesar de serem modelados com a mesma quantidade de amostras de referências das outras variáveis os dados dos espectros não se correlacionaram satisfatoriamente com os dados de referência.

Hein et al. (2012) ponderam que a espectroscopia no NIR é uma técnica que detecta variações na constituição química da madeira e pode ser utilizada para acessar diversas propriedades tecnológicas da madeira, porque tais características dependem, de alguma forma, dos componentes químicos da madeira e de suas proporções.

Para uma explicação coerente sobre a relação dos espectros com as variáveis de referência Kelley et al. (2004) inferem que a relação entre o ângulo microfibrilar de celulose (MFA) e os espectros ainda não é clara. Entretanto, uma indicação das características moleculares, que são responsáveis para as correlações pode ser obtida examinando os coeficientes da regressão dos modelos PLS. Onde há uma forte correlação inversa, entre os coeficientes de regressão do ângulo microfibrilar de celulose (MFA) e do módulo de elasticidade (E_M). Isto é esperado desde que há uma relação inversa entre ângulo microfibrilar de celulose (MFA) e módulo de elasticidade (E_M). Por exemplo, quando o ângulo microfibrilar de celulose (MFA) aumenta de 0 a 45 graus o módulo de elasticidade (E_M) de madeira geralmente diminui. Estes coeficientes de regressão também fornecem algumas informações das características químicas que impulsionam as correlações entre os espectros FTNIR e as propriedades mecânicas e ângulo microfibrilar de celulose (MFA). Atribuir características moleculares aos espectros FTNIR é difícil

devido à extensa sobreposição das vibrações moleculares fundamentais na faixa NIR.

5 – CONCLUSÃO

A caracterização das propriedades tecnológicas da madeira das procedências de *Tectona grandis* com nove anos de idade, a partir do método de espectroscopia de infravermelho, pela correlação dos valores obtidos utilizando-se as técnicas convencionais de análises com os espectros de infravermelho próximo, medidos na face transversal, gerou modelos preditores com boa qualidade, para as variáveis testadas, com exceção para o módulo de ruptura em flexão estática (f_{MNIR}) que teve performance entre moderada no alburno e ruim no cerne.

Assim, a técnica de óptica de espectroscopia de absorção por FTNIR é eficiente na predição das variáveis das propriedades tecnológicas da madeira de *Tectona grandis*.

CONCLUSÃO GERAL

Deste estudo conclui-se quanto a qualidade da madeira de *Tectona grandis* com 9 anos de idade que:

- Para as variáveis de rendimento em serrada em função das variáveis dendrométricas os clones MT-00, MT-01, MT-02 e MT-08 se destacaram das outras procedências;
- Com a técnica *two step cluster* através de classificação escalonável de dados das variáveis de dendrométricas e as variáveis de rendimento de desdobros foi possível determinar que a procedência clonal MT-08 é a mais importante quanto ao rendimento de madeira serrada.
- Quanto as propriedades tecnológicas a técnica *two step cluster* classificou a procedência clonal MT-01 com a mais relevante ao conjunto de dados analisado.
- Não há diferença entre as madeiras das procedências de *Tectona grandis*, MT-SE, MT-00, MT-01, MT-02, MT-08 e MT-80, para as propriedades tecnológicas, em função da utilização final;
- A técnica de colorimetria pelo sistema CIELab aplicada na definição das cores da madeira das procedências foi eficaz na determinação de três cores distintas para o cerne e de uma única cor para o alburno.
- A técnica de FTNIR foi eficiente na predição das variáveis das propriedades tecnológicas da madeira de *Tectona grandis*.

RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se para pesquisas futuras:

- Continuar a avaliação do povoamento quando ao rendimento de madeira serrada e quanto a classificação de propriedades tecnológicas.
- Confirmar através do monitoramento a idade transição de lenho juvenil para lenho adulto.
- Realizar estudos com os extrativos para o detalhamento dos polifenóis, responsáveis pela pigmentação natural da madeira, com objetivo de entender melhor a composição da cor produzindo diferentes cores entre os cernes das procedências avaliadas.

REFERÊNCIAS

ABRAHÃO, C. P. **Estimativa de algumas propriedades da madeira de *Eucalyptus urophylla* por espectrometria**. 2005. 182f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal, Departamento de Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2005.

AMODEI, J. B. **Avaliação da qualidade da madeira de *Tectona grandis* L.f. por meio de análises tomográfica, microdensitométrica e anatômica**. 2011. 50f. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambientais e Florestais, Instituto Florestal) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Soropédica. 2011.

ANDA, R. R.; NATERA, J. F. Z.; GUZMÁN, J. A. S.; PÉREZ, E. S.; TALAVERA, F. J. F. Propiedades físico-mecánicas de madera de teca de plantaciones comerciales. **Revista mexicana de ciencias forestales**, v. 5, n. 24, p. 12-25, 2014.

ÂNGELO, H.; SILVA, G. F.; SILVA, V. S. M. Análise econômica da indústria de madeiras tropicais: o caso do pólo de Sinop, MT. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 14, n. 2, p. 91-101. 2004.

ÂNGELO H.; SILVA, V. S. M.; SOUZA, Á. N.; GATTO, A. C. Aspectos financeiros da produção de teca no estado de Mato Grosso. **Floresta**, Curitiba, v. 39, n. 1, p. 23-32, jan/mar. 2009.

ANTONIO, R. T.; LUNA, J. A. N.; RODRÍGUEZ, E. A.; CALDERÓN, O. A. A.; PÉREZ, J. J.; CÁRDENAS, M. G.; FLORES, H. J. M. Propiedades físico-mecánicas de la madera *Tectona grandis* L. f. de una plantación comercial en el estado de Michoacán. **Revista Mexicana de Ciencias Forestales**, v. 8, n. 40, p. 37-56, 2017.

ARRUDA, T. P. M. **Secagem da madeira juvenil de *Tectona grandis* L. F.** 2013. il. 98f. Tese (Doutorado em Ciência e tecnologia da madeira, Departamento de Ciências Florestais) - Universidade Federal de Lavras. Lavras. 2013.

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

AYARKWA, J.; ADDAE-MENSAH, A. Processing of small diameter logs: Effect of log diameter, sawing pattern and some bole variables on lumber recovery. **Ghana Journal of Forestry**, Kumasi, v. 8, p. 43-51. 1999.

BATISTA, D. C.; SILVA, J. G. M.; CORTELETTI, R. Desempenho de uma serraria com base na eficiência e na amostragem do trabalho. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 20, n. 2, p. 271-280. 2013.

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, da Faculdade de Ciências

Agronômicas) - Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” - UNESP. Botucatu. 2006.

BHAT, K. M. Is fast grown teak inferior in wood quality – an appraisal of wood figure (colour, grain, texture) from plantations of high input management. **Wood News**, v. 9, n. 4, p. 48-49, 1999.

BHAT, K. M.; PRIYA, P. B.; RUGMINI, P. Characterisation of juvenile wood in teak. **Wood Science and Technology**, Thrissur, v. 34, n. 6, p. 517-532, 2001.

BILLMEYER JUNIOR, F.W.; SATZMAN, M. **Principles of colour technology**. John Wiley, New York, 240 p. 1981.

BITTENCOURT, E. **Parâmetros de otimização no processo de fabricação de celulose e papel**. 2004. 93f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal, Centro de Ciências Florestais e da Madeira) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2004.

BLOSS, F. D. **Crystallography and Crystal Chemistry: An introduction**. Mineralogical Society of America, Washington, 543 p.1971.

BOTREL, M. C. G. Ganho genético em propriedades físicas e mecânicas de clones de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 76, p. 13-19, dez. 2007.

BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B.; SILVA, D. A.; KLOCK, U. Caracterização do rendimento e quantificação dos resíduos gerados em serraria através do balanço de materiais. **Floresta**, v. 32, n. 2, 2002.

BUDIAMAN, A.; KOMALASARI, P. Waste of Felling and On-Site Production of Teak Squarewood of the Community Forest. **Journal Manajemen Hutan Tropika**, Bogor, vol. XVIII, n. 3, p. 164-168, Dez. 2012.

BURDON, R. D., KIBBLEWHITE, R. P., WALKER, J. C., MEGRAW, R. A., EVANS, R., COWN, D. J. Juvenile versus mature wood: a new concept, orthogonal to corewood versus outerwood, with special reference to *Pinus radiata* and *P. taeda*. **Forest science**, Rockeville, v. 50, n. 4, p. 399-415, 2004.

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

CADEMARTORI, P. H. G.; MISSIO, A. L.; GATTO, D. A.; e BELTRAME, R. Prediction of the Modulus of Elasticity of *Eucalyptus grandis* Through Two Nondestructive Techniques. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 21, n. 3, p. 369-375, 2014.

CAIXETA, R. P.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; LIMA, J. T. Propriedades e classificação da madeira aplicadas à seleção de genótipos de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 27, n. 1, p. 43-51, 2003.

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, p. 30-41. Set-2001.

CARNEIRO, R. S. **Influência de defeitos de crescimento e das dimensões de traqueídeos nas propriedades de densidade e flexão estática da madeira de *Pinus caribaea***. 2006. 70f. Dissertação (Mestrado, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Florestal) Universidade de Brasília. Brasília. 2006.

CAVE, I. D. Theory of X-ray measurement of microfibril angle in wood. **Forest Products Journal**, v. 16, p. 37-42, 1966.

CHAGAS, S. F. Propriedades da madeira de *Tectona grandis* (L. f.), visando a sua utilização para peças preservadas. 2013. 78f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal, do Departamento de Engenharia Florestal) Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2013.

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

CHAIX, G.; KOKUTSE, A. D.; RATOVOMBOAHANGY, B.; GUIBAL, D.; RANDRIANJAFY, H.; RAKOTONDRAOELINA, H.; BRANCHERIAU, L.; RAKOTOVOLOLONALIMANANA, H.; HEIN, P. R. G.; RAMANANANTOANDRO, T. Prediction of radial and tangential shrinkages by near infrared spectroscopy: an example for *Tectona grandis* from Togo and for *Liquidambar styraciflua* from Madagascar. **Cerne**, v. 16, p. 66-73, 2010.

CHAVES, A. G. S. **Modelagem do crescimento e da produção de *Tectona grandis* L. f. até a idade de rotação**. 2013. 72f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais, Faculdade de Engenharia Florestal) Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá. 2013.

COPANT. **Maderas**: Glossário de términos usados em anatomia. COPANT (Commission Panamericana de Normas Técnica). Bogotá: 1969. R 182.

COPANT. **Maderas comerciales**: Nomenclatura panamericana. COPANT (Commission Panamericana de Normas Técnica), Bogotá: 1971. R 281.

CORADIN, V. T. R.; MUÑIZ, G. I. B. **Normas e procedimentos de estudos de anatomia de madeira**: I. Angiospermae II. Gimnospermae, Brasília: IBAMA, 1992. 19 p. (LPF – Série Técnica nº 15).

COSTA, G. G. O. Uso da Técnica Two Step Cluster para Segmentação de Funcionários de uma Empresa no Rio de Janeiro Segundo Clima Organizacional: Um Estudo de Caso. **Revista da Estatística da Universidade Federal de Ouro Preto**, v. 6, n. 1, p. 33-56, 2017.

COSTA, R. B.; RESENDE, M. D. V.; SILVA, V. S. M. Experimentação e seleção no melhoramento genético de teca (*Tectona grandis* L. f.). **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 14, n. 1, p. 76-92, 2007.

COSTA, C. G.; CALLADO, C. H.; CORADIN, V. T. R.; CARMELLO-GUERREIRO, S. R. **Xilena**. In: CARMELLO-GUERREIRO, S.M.; APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B. (Eds). Anatomia Vegetal. 2ª. Ed. Viçosa, Editora da UFV, Viçosa, p. 129-154. 2006.

CURTY, C. **A espectroscopia no infravermelho próximo de folhas para a identificação de plantas na Amazônia**. 2013. viii, 43f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA, Manaus, 2013.

DA SILVA, D. A.; DE CHRISTO, E. R.; BELHING, A.; MAYER, S. L. S.; PELANDA, K. A.; SIMETTI, R. Potencial e qualidade da madeira de desbaste de teca para produção de biocombustível. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 35, n. 83, p. 299-305, 2015.

DE MOURA PALERMO, G. P.; DE FIGUEIREDO LATORRACA, J. V.; DURGANTE SEVERO, E. T.; DO NASCIMENTO, A. M.; DE REZENDE, M. A. Delimitação entre os lenhos juvenil e adulto de *Pinus elliottii* Engelm. **Revista Árvore**, v. 37, n. 1, p. 191-200. 2013.

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

DERKYI, N. S. A.; BAILLERES, H.; CHAIX, G.; THEVENON, M. F.; OTENG-AMOAKO, A. A.; ADU-BRED, S. Colour variation in teak (*Tectona grandis*) wood from plantations across the ecological zones of Ghana. **Ghana J. Forestry**, v. 25, p. 40-49, 2009.

DIOGO, F. A. **Qualidade da madeira e da celulose de clones de *Eucalyptus* ssp. de diferentes densidades**. 2014. 39f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2014.

EVANGELISTA, W. V. **Caracterização da madeira de clones de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. e *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, oriundo de consórcio agrossilvipastoril**. 2007. 120f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2007.

FACKLER, K.; SCHWANNINGER, M. Polysaccharide degradation and lignin modification during brown rot of spruce wood: a polarised Fourier transform near infrared study. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 18, n. 6, p. 403-416, 2010.

FERREIRA, K. A. C.; MENDOZA, Z. M. S. H.; RIBEIRO, E. S.; BATISTA, B. M. F.; SILVA, J. C. Análise dos compostos acidentais na madeira de *Tectona grandis* L. f. **Biodiversidade**, v. 14, n. 1, 2015.

FIGUEIREDO, E. O.; SCOLFORO, J. R. S.; DE OLIVEIRA, A. D. Estimativa do percentual de casca e do fator de forma em povoamentos jovens de teca (*Tectona grandis* L. f.). **Embrapa Acre-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, Rio Branco. p. 5,2005.

FINGER, F. A.; FINGER, Z; LOGSDON, N. B. Qualificação da madeira de teca, *Tectona grandis* L. f., oriunda do primeiro desbaste comercial, com vistas a seu aproveitamento. **Madeira: arquitetura e engenharia**, v. 4, n. 10, 2003.

FLÓREZ, J. B. **Caracterização tecnológica da madeira jovem de teca (*Tectona grandis* L. f.)**. 2012. 85f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2012.

FLÓREZ, J. B.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; HEIN, P. R. G.; SILVA, J. R. M. Caracterización de la madera joven de *Tectona grandis* L. f. plantada en Brasil. **Madera y Bosques**, Xalapa. v. 20, n. 1. p. 11-20. 2014.

FOELKEL, C. E. B.; BRASIL, M. A. M.; e BARRICHELO, L. E. G. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **IPEF**, Piracicaba, n. 2/3, p. 65-74. 1971.

FOELKEL, C. E. B. **Estrutura da madeira**. Belo Oriente: CENIBRA, 1977. 84 p.

FORMOSO, M. L. L. **Difratometria de raios-X**. In: GOMES, Celso B.; FORMOSO, M. L. L.; TRESCASES, J. J. Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia. Edgard Blucher, São Paulo, p. 2-48, 1984.

FUKUSHIMA, R. S.; HATFIELD, R. D.; FUZETO, A. P.; BACHA, C. B.; PORT, A. C. Um novo método analítico para a determinação do teor de lignina em produtos vegetais. In: VII Encontro Nacional Sobre Métodos dos Laboratórios da Embrapa. CNPSA.EMBRAPA, Jaguariúna, v.8, nov.2003.

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, n. 1, p. 124-134, 2016.

GATTO, D. A.; HASELEIN, C. R.; BULIGON, E. A.; CALEGAR, L.; STANGERLIN, D. M.; OLIVEIRA, L. S.; SANTINI, E. J. Estimativa da idade de segregação do lenho juvenil e adulto por meio de parâmetros anatômicos para madeira de *Luehea divaricata* Mart. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 4, p. 535-540, out-dez, 2008.

GONÇALEZ, J. C. **Caracterization technologique de quatre especes peu connues de la forêt amazonienne: anatomie, chimie, couleur, propriétés physiques et mécaniques**. 1993. 446f. Thèse (Doctorat en Technologie du Bois) - Ministère de l'Agriculture et de la Pêche. Nancy, 1993.

GONÇALVES, F. G.; SILVA OLIVEIRA, J. T. D.; SILVA, G. F. D.; NAPPO, M. E.; TOMAZELO FILHO, M. Parâmetros dendrométricos e correlações com propriedades tecnológicas em um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, v. 34, n. 5, p. 947-959, 2010.

GOUVÊA, M. A.; PREARO, L. C.; DO CARMO ROMEIRO, M. Avaliação da aplicação de técnicas multivariadas de interdependência em teses e dissertações de algumas instituições de ensino superior. **FACEF Pesquisa-Desenvolvimento e Gestão**, v. 15, n. 1, p. 107-123, 2012.

GOUVÊA, A. F. G.; TRUGILHO, P. F.; GOMIDE, J. L.; SILVA, J. R. M.; ANDRADE, C. R.; ALVES, I. C. N. Determinação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* por diferentes métodos não destrutivos. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 349-358, 2011.

GUIMARÃES, E. M. **Difratometria de raios-X**. In: XXVII Congresso Brasileiro de Ciências do Solo, Brasília, julho, 1999.

GUIMARÃES, C. C. **Desenvolvimento e validação de modelos quimiométricos baseados em espectroscopia no infravermelho próximo para a predição de parâmetros do caldo e da biomassa do sorgo sacarino visando à produção de etanol**. 2014. XV. 101f. Dissertação (Mestrado em Química, Departamento de Química) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2014.

GUTIÉRREZ, R. C.; FONSECA, C. S.; ROMERO, E. J.; BLANCO, G. L.; CUNUHAY, P. S. Análisis comparativo de las propiedades físico-mecánicas de la madera de teca (*Tectona grandis* LF) de Quevedo y Balzar. **Ciencia y Tecnología** v. 1, n. 2, p. 55-63, 2008.

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. Bookman Editora, 689 p. 2009.

HARDIYANTO, E. B.; PRAYITNO, T. A. **Present utilization of small-diameter teak log from community teak plantations in Java and eastern Indonesia**. Technical Report. ITTO, Yokohama, ITTO PPD 121/06 Rev. 2(I). 45 p. 2008.

HEIN, P. R. G. **Genetic and environmental control of microfibril angle on *Eucalyptus* wood: its effects on wood traits and implication for selection**. 2011. 165f. Tese de Doutorado. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc. 2011.

HEIN, P. R. G.; CLAIR, B.; BRANCHERIAN, L.; CHAIX, G. Predicting microfibril angle in *Eucalyptus* wood from different wood faces and surface qualities using near infrared spectra. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 18, n. 6, p. 455-464. 2011.

HEIN, P. R. G.; LIMA, J. T.; TRUGILHO, P. F.; CHAIX, G. Estimativa do ângulo microfibrilar em madeira de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* por meio da

espectroscopia no infravermelho próximo. *Floresta e Ambiente, Seropédica*, v. 19 n. 2, p. 194-199. 2012.

HEIN, P. R. G.; SILVA, J. R. M.; BRANCHERIAU, L. **Correlations among microfibril angle, density, modulus of elasticity, modulus of rupture and shrinkage in 6-year-old *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*. *Maderas, Cienc. Tecnol.* [online], Concepción, v. 15, n. 2, p. 171-182. 2013.**

HIDAYATI, F.; ISHIGURI, F.; IIZUKA, K.; MAKINO, K.; TAKASHIMA.; DANARTO.; WINARNI, W. W.; IRAWATI, D.; NA'EM, M.; YOKOTA, S. Variation in tree growth characteristics, stress-wave velocity, and Pilodyn penetration of 24-year-old teak (*Tectona grandis*) trees originating in 21 seed provenances planted in Indonesia. ***Journal of Wood Science***. v. 59, n. 3, p. 512–516. 2013.

HUGHES, H. F. The wood structure of *Pinus caribaea* Morelet in relation to use characteristics, growth conditions and tree improvement. 1971. In: BURLEY, J.; NIKLES, D.G. **Selection and breeding to improve some tropical conifers**. Oxford: Commonwealth Forestry Institute, p. 13-22, 1973.

IAWA COMMITTEE. List of microscopic features for hardwood identification. ***IAWA Bulletin***, Leiden, v. 10, n. 3, p. 234-332. 1989.

IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M.; ROSILANI 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

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD - JIS. JIS B 0601:2001. Geometrical Products Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters, Tokyo. **JIS**. 2001.

JOHANSEN, D. A. **Plant microtechnique**, New York: MacGraw-Hill, 533 p. 1940.

KEDHARNATH, S.; CHACKO, V. J.; GUPTA, S. K.; MATTHEWS, J. D. geographic and individual tree variation in some wood characters of teak (*Tectona grandis* L. f.) I fibre length. ***Silvae Genet.*** v. 12, p. 181-187, 1963.

KEIDING, H.; WELLENDORF, H. LAURIDSEN, E. B. **Evaluation of an international series of teak provenance trials**. Forskningscentret for Skov & Landskab. Kongens Lyngby, 84 p. 1986.

KELLEY, S. S. RIALS, T. G.; SNELL, R.; GROOM, L. H.; SLUITER, A. Use of near infrared spectroscopy to measure the chemical and mechanical properties of solid wood. ***Wood Science and Technology***, v. 38, n. 4, p. 257-276, 2004.

KJAER, E. D.; KAJORNSRICHON, S.; LAURIDSEN, E. B. Heartwood, calcium and silica content in five provenances of teak (*Tectona grandis* L.). ***Silvae Genetica***, v. 48, n. 1, p. 1-3. 1999.

KOKUTSE, A. D.; BAILLÈRES, H.; STOKES, A.; KOKOU, K. Proportion and quality of heartwood in Togolese teak (*Tectona grandis* L.f). **Forest Ecology and Management**, v. 189, n. 1, p. 37-48. 2004.

KOKUTSE, A.; BRANCHERIAU, L.; CHAIX, G. Rapid prediction of shrinkage and fibre saturation point on teak (*Tectona grandis*) wood based on near-infrared spectroscopy. **Annals of forest science**, v. 67, n. 4, p. 403, 2010.

KRAUS, J. E.; LOURO, R. P.; ESTELITA, M. E. M.; ARDUIN, M. **A célula vegetal**. In: CARMELLO-GUERREIRO, S.M.; APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B. (Eds). Anatomia Vegetal. 2ª. Ed. Viçosa, Editora da UFV, Viçosa, p. 31-86. 2006.

KRISDIANTO, K. Radial variation in microfibril angle of super and common teak wood. **Indonesian Journal of Forestry Research**, Bogor, v. 5, n. 2, p. 125-134, 2008.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B.; HERNANDEZ, J. A.; ANDRADE, A. S. Química da Madeira. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 3ª Edição Revisada. 2005.

LACRET, R.; VARELA, R. M. MOLINILLO, J. M. G.; NOGUEIRAS, C.; MACÍAS, F. A. Tectonoelins, new norlignans from a bioactive extract of *Tectona grandis*. **Phytochemistry Letters**. v. 5, n. 2, p. 382–386. 2012.

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

LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; CAMPOS, J. C. C.; TAKIZAWA, F. H.; RODRIGUES, F. L. Um modelo de distribuição diamétrica para povoamentos de *Tectona grandis* submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, v. 30, n. 1, p. 89-98, 2006.

LEITE, H. G.; OLIVEIRA-NETO, R. R.; MONTE, M. A.; FARDIN, L.; ALCANTARA, A. M.; SILVA BINOTI, M. L. M.; CASTRO, R. V. O. Modelo de afilamento de cerne de *Tectona grandis* Lf. Taper models of heartwood of *Tectona grandis* Lf. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 89, p. 053-059, mar. 2011.

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.

LIMA, I. L. D.; GARCIA, R.; LONGUI, E. L.; FLORSHEIM, 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. 2011a.

LIMA, I. L.; PIMENTEL, M. M.; GARCIA, J. N. Propriedades Mecânicas e Densidade Aparente da Madeira de *Tectona grandis* Linn. F. (Teca) em Função do Espaçamento e da Posição Radial na Tora. **Silva Lusitana**, Oeiras, v. 19, n. 2, p. 221-232. 2011b.

LOGSDON, N. B. Estabilidade dimensional: propostas para revisão da NBR 7190/97. In.: **Encontro brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira**, Uberlândia. FECIV-UFU. 8. 2002.

LOURENÇO, A.; NEIVA, D. M.; GOMINHO, J.; MARQUES, A. V.; PEREIRA, H. Characterization of lignin in heartwood, sapwood and bark from *Tectona grandis* using Py–GC–MS/FID. **Wood science and technology**, v. 49, n. 1, p. 159-175, 2015.

LUKMANDARU, G.; ASHITANI, T.; TAKAHASHI, K. Color and chemical characterization of partially black-streaked heart-wood in teak (*Tectona grandis*). **Journal of Forestry Research**, v. 20, n. 4, p. 377-380. 2009.

LUKMANDARU, G.; TAKAHASHI, K. Radial distribution of quinones in plantation teak (*Tectona grandis* Lf). **Annals of Forest Science**, Les Ulis, v. 66, n. 6, p. 1-9, 2009.

LUKMANDARU, G. Hubungan antara kadar ekstraktif dengan sifat warna pada kayu teras jati. **Jurnal Penelitian Hasil Hutan**, v. 34, n. 3, p. 207-216, 2016.

MACHADO, M. P. O. **Quantificação de resíduos do processamento de cinco espécies comerciais amazônicas e análise do potencial energético**. 2015. xi 58f. Dissertação (Mestrado, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Florestal) Universidade de Brasília. Brasília. 2015.

MADI, J. P. S.; BORGES, D. S.; ROCHA, K. J.; FAVALESSA, C. M. C. Ajuste de distribuições probabilísticas para representar a distribuição diamétrica de teca. In.: **Atualidades em mensuração florestal**, [livro eletrônico] / Ed. Ana Paula Dalla Corte et al. Curitiba. UFPR. ed. 1, p. 313-317, 2014.

MAGALHÃES, W. L. E.; PEREIRA, J. C. D.; MUÑIZ, G. I. B.; KLOCK, U.; DA SILVA, J. R. M. Determinação de propriedades químicas e anatômicas de madeiras com uso da reflexão difusa de infravermelho próximo. **Boletim de Pesquisas Florestais**, Colombo, n. 50, p. 25-36, jan/jun. 2005.

MELO, J. E.; CORADIN, V. T. R.; MENDES, J. C. Classes de densidade para madeiras da Amazônia brasileira. In: **Congresso Florestal Brasileiro**. Anais. Sociedade Brasileira de Silvicultura, SBS; Sociedade Brasileira de Engenheiros Florestais, SBEF. São Paulo, v. 6, p. 695-699. 1990.

MONTEIRO, T. C.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M.; TRUGILHO, P. F.; ANDRADE, B. C. L. Avaliação do desdobro de toras de *Eucalyptus* para a obtenção de peças estruturais. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 3, p. 357-524, jul/set. 2013.

MOORE, D. M.; REYNOLDS JR, R. C. **X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals**. Oxford: Oxford university press, Oxford, v. 378, 332 p. 1989.

MOREIRA, A. C. O. M. **Caracterização de *Bambusa vulgaris* Schard. ex J.C. Wendl. var. *vulgaris*, e dos Resíduos de Caldeira no Processo de Conversão Térmica de Energia.** 2012. 61f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais, Departamento de Engenharia Florestal, Faculdade de Tecnologia) - Universidade de Brasília. Brasília. 2012.

MOREIRA, W. S. **Relações entre propriedades físico-mecânicas e características anatômicas e químicas da madeira.** 1999. 107f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal, Departamento de Engenharia Florestal) - Universidade de Viçosa. Viçosa. 1999.

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. **Revista Forestal Mesoamericana Kurú**, v. 3, n. 9, p. 50-63, 2006.

MORESCHI, J. C. **Propriedades tecnológicas da madeira.** Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. UFPR. Apostila. 2014.

MORI, C. L. S de O.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; TRUGILHO, P. F.; e GONÇALEZ, J. C. Caracterização da cor da madeira de clones de híbridos de *Eucalyptus* spp. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 137-146, abr/jun. 2005.

MOTTA, J. P. **Propriedades tecnológicas da madeira de *Tectona grandis* Lf proveniente do Vale do Rio Doce, Minas Gerais.** 2011. II. 125f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais, Centro de Ciências Agrárias) - Universidade Federal do Espírito Santo. Jerônimo Monteiro. 2011.

MOYA, R.; BOND, B.; QUESADA, H. A review of heartwood properties of *Tectona grandis* trees from fast-growth plantations. **Wood science and technology**, v. 48, n. 2, p. 411-433, 2014.

MOYA, R.; CALVO-ALVARADO, J. Variation of wood color parameters of *Tectona grandis* and its relationship with physical environmental factors. **Annals of Forest Science**. v. 69, n. 8, p. 947-959. 2012.

MOYA, R.; MUÑOZ, F.; BERROCAL, A. Teak: *Tectona grandis* L.f. Technical sheet 7. In: Tecnologia de madera de plantaciones forestales: Fichas técnicas. **Revista Forestal Mesoamericana Kurú**, Cartago, v. 7, n. 18–19, p. 117–131, 2010.

MOYA, R.; BERROCAL, A.; SERRANO, J. R.; TOMAZELLO FILHO, M. Variación radial de la anatomía, densidad y durabilidad de la madera de teca (*Tectona grandis*) procedente de dos calidades de sitio y dos regiones climáticas de Costa Rica. **Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales**, Madrid, v. 18, n. 2, p. 119-131, 2009.

NARANJO, S. S.; R. MOYA, S.; S. CHAUHAN, S. Early genetic evaluation of morphology and some wood properties of *Tectona grandis* L. clones. **Silvae Genetica**, v. 61, p. 58-65, 2012.

NIDAVANI, R. B.; MAHALAKSHMI, A. M. Teak (*Tectona grandis* Linn.): renowned timber plant with potential medicinal values. **International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences**, Sagar, v. 6, n.1, p. 48-54, 2014.

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMMEISTER, J. C.; e TOMAZELLO FILHO, M. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v.29, n.1, p. 115-127. 2005.

OLIVEIRA, R. M. **Utilização de técnicas de caracterização de superfícies de madeiras tratadas termicamente**. 2009. 123f. Tese (Doutorado em Ciências: Área de concentração: Física Aplicada, Instituto de Física de São Carlos) - Universidade de São Paulo. São Carlos. 2009.

PAES, J. B.; SANTOS, L. L.; SILVA, L. F.; MOTTA, J. P.; BRAZ, R. L.; LOMBARDI, L. R. Caracterização tecnológica da madeira juvenil de teca (*Tectona grandis*) visando à produção de móveis. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 10, n. 3, p. 437-442, 2015.

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

PÉREZ-CORDERO, L. D.; KANNINEN, M. Heartwood, sapwood and bark content, and wood dry density of young and mature teak (*Tectona grandis*) trees grown in Costa Rica. **Silva Fennica**, Helsinki, v. 37, n. 1, p. 45-54, 2003.

PICÓ, Y. **Análise Química dos Alimentos**. Elsevier Brasil, 368 p. 2016.

PINTO, M. L. **Propriedades e características da madeira de teca (*Tectona grandis*) em função da idade**. 2007. 124f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2007.

PREMRASMI, T.; DIETRICH, H. H. Nature and distribution of extractives in teak (*Tectona grandis* Linn.) from Thailand. **The Natural History Bulletin of the Siam Society**, Bangkok, v. 22, n. 1-2, p. 1-14, 1967.

PUCCINI, C. T.; GONÇALVES, R.; MONTEIRO, M. E. A. Avaliação estatística da variação da velocidade de propagação de ondas de ultrassom na madeira em presença de defeitos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 3, p. 499-503. 2002.

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.

RAMOS, L. M. A.; LATORRACA, J. V. D. F.; PASTRO, M. S.; SOUZA, M. T. D.; GARCIA, R. A.; CARVALHO, A. M. D. Variação radial dos caracteres anatômicos da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill Ex Maiden e idade de transição entre

lenho juvenil e adulto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 92, p. 411-418, dez. 2011.

RIBEIRO, E. S. **Propriedades tecnológicas de vinte espécies de madeiras tropicais comercializadas pelo estado de Mato Grosso**. 2009. 183f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais, Departamento de Engenharia Florestal, Faculdade de Tecnologia) - Universidade de Brasília. Brasília. 2017.

RIBEIRO, A. O.; MORI, F. A.; MENDES, L. M. Características das dimensões das fibras e análise do ângulo microfibrilar de *Toona ciliata* cultivada em diferentes localidades. **Floresta**, Curitiba, v. 41, n. 1, p. 47-56, jan./mar. 2011.

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

ROSSO, S. Predição das propriedades de *Eucalyptus grandis* Maiden por espectroscopia no infravermelho próximo. 125 f. 2010. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2010.

ROSSO, S.; MUNIZ, G. I. B.; MATOS, J. L. M.; HASELEIN, C. R.; HEIN, P. R. G.; LOPES, M. C. Estimate of the density of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden using near infrared spectroscopy. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 4, p. 525-692, out/dez. 2013.

SALES, A.; LAHR, F. A. R. **Proposição de classes de resistência para madeira**. EPUSP, São Paulo. 20 p. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil – BT/PCC/166, 1996.

SALES, A. Classes de resistência para madeira. **Madeira: arquitetura e engenharia**, v. 1, n. 1, p. 25-30, 2000.

SANQUETTA, M. N. I.; SANQUETTA, C. R.; MOGNON, F.; DALLA CORTE, A. P.; RODRIGUES, A. L.; MAAS, G. C. B. Ajuste de equações hipsométricas para a estimação da altura total de indivíduos jovens de teca. **Científica**, Jaboticabal, v. 43, n. 4, p. 400-406, 2015.

SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R.; GATTO, D. A. Análise comparativa das propriedades físicas e mecânicas da madeira de três coníferas de florestas plantadas. **Ciência Florestal**, v. 10, n. 1, p. 85-93, 2000.

SCHIMLECK, L. R.; EVANS, R.; ILIC, J. Estimation of *Eucalyptus delegatensis* wood properties by near infrared spectroscopy. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 31, n. 10, p. 1671-1675, 2001.

SHIMIZU, J. Y.; KLEIN, H.; OLIVEIRA, J. R. V. **Diagnóstico das plantações florestais em Mato Grosso**. Central de Texto, Cuiabá, 2007. 63p.

SHIMOYAMA, V. R. S. **Estimativas de propriedades da madeira de *Pinus taeda* através do método não destrutivo emissão de ondas de tensão, visando a geração de produtos de alto valor agregado**. 2005. 136f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais, Setor de Ciências Agrárias) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2005.

SILVA, F. R.; DE MORAES SILVA, V. S.; MIRANDA, S. O. Crescimento de *Tectona grandis* em um uma plantação no município de Alta Floresta, Mato Grosso. **FLORESTA**, Curitiba, v. 44, n. 4, p. 577-588, 2014.

SMALIAN, H. L. **Beitrag zur Holzmesskunst Strausund**. Dank, 1937. 124p.

STANGERLIN, D. M. **Monitoramento de Propriedades de Madeiras da Amazônia Submetidas ao Ataque de Fungos Apodrecedores**. 2012. 259f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais, Departamento de Engenharia Florestal, Faculdade de Tecnologia) - Universidade de Brasília. Brasília. 2012.

STANGERLIN, D. M.; GONÇALEZ, J. C.; GONÇALVES, R.; SANTINI, E. J.; CALEGARI, L.; MELO, R. R.; GATTO, D. A. Avaliação de tipos de ondas geradas por dois modelos de transdutores para determinação do módulo de elasticidade dinâmico. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 40, n. 4, p. 691-700, out./dez. 2010.

SOUZA, O. A.; SILVA, J. C.; LUCIA, R. M. D.; EVANGELISTA, W. V. Avaliação da madeira de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh E *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake em ensaio de usinagem, visando à produção moveleira. **Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 48, p. 751-758, 2009.

SOUZA, A. N.; OLIVEIRA, A. D.; SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M.; CARVALHO, L. M. T. Modelagem do rendimento no desdobro de toras de eucalipto cultivado em sistema agroflorestal. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 2, p. 222-238, abr./jun. 2007.

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**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 291-299, maio/ago. 2005.

TELES, R. F. **Ensaio não destrutivos para avaliar o desempenho de madeiras amazônicas tratadas quimicamente**. 2014. Xiv. 195f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais, Departamento de Engenharia Florestal, Faculdade de Tecnologia) - Universidade de Brasília. Brasília. 2014.

TEWARI, V. P.; MARISWAMY, K. M. Heartwood, sapwood and bark content of teak trees grown in Karnataka, India. **Journal of forestry research**, v. 24, n. 4, p. 721-725, 2013.

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

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus saligna* e *E. grandis*. **IPEF**, Piracicaba, v. 29, p. 37-45, 1985.

THULASIDAS, P. K.; BHAT, K M. Log characteristics and sawn timber recovery of home-garden teak from wet and dry localities of Kerala, India. **Small-scale Forestry**, v. 8, n. 1, p. 15-24, 2009.

TRUGILHO, P. F.; BIANCHI, M. L.; ROSADO, S. C. S.; LIMA, J. T. Qualidade da madeira de clones de espécies e híbridos naturais de *Eucalyptus*. **Cientia Forestalis**, Piracicaba, n. 73, p. 55-62, março 2007.

TSUCHIKAWA, Satoru; KOBORI, Hikaru. A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. **Journal of Wood Science**, v. 61, n. 3, p. 213-220, 2015.

TSUCHIKAWA, Satoru; SCHWANNINGER, Manfred. A review of recent near-infrared research for wood and paper (Part 2). **Applied Spectroscopy Reviews**, v. 48, n. 7, p. 560-587, 2013.

TSUCHIKAWA, Satoru. A review of recent near infrared research for wood and paper. **Applied Spectroscopy Reviews**, v. 42, n. 1, p. 43-71, 2007.

VALERO, S. W.; REYES C, E. C.; GARAY J, D. A. 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**, Mérida, v. 49, n. 1, p. 61-73. 2005.

VARGHESE, M.; NICODEMUS, A.; RAMTEKE, P. K.; ANBAZHAGI, G.; BENNET, S. S. R.; SUBRAMANIAN, K. Variation in growth and wood traits among nine populations of teak in Peninsular India. **Silvae genetica**, v. 49, n. 4/5, p. 201-205, 2000.

VARANDA, L. D. ALVES, M. C. S.; GONÇALVES, M. T. T.; SANTIAGO, L. F. F. Influência das variáveis do lixamento tubular na qualidade das peças de *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, Lavras, v.16, Suplemento, p. 23-32, jul. 2010.

VARASQUIM, F. M. F. A.; ALVES, M. C. S.; GONÇALVES, M. T. T.; SANTIAGO, L. F. F.; SOUZA, A. J. D. Influence of belt speed, grit sizes and pressure on the sanding of *Eucalyptus grandis* wood. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 2, p. 231-237, abr./jun. 2012.

VENDRUSCOLO, D. G. S.; Drescher, R.; CARVALHO, S. P. C.; SOUZA, H. S.; SILVA, R. S.; CHAVES, A. G. S. Forma do fuste de árvores de *Tectona grandis* em diferentes espaçamentos. **Advances in Forestry Science**, Cuiabá, v.3, n.3, p.51-54, 2016.

VIANA, L. C.; TRUGILHO, P. F.; HEIN, P. R. G.; MOREIRA DA SILVA, J. R.; TARCISIO L. J. Modelos de calibração e a espectroscopia no infravermelho próximo para predição das propriedades químicas e da densidade básica da

madeira de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 2, p. 367-376, 2010.

VIEIRA, A. H.; ROCHA, R. B.; BENTES-GAMA, M. M; LOCATELLI, M. **Desempenho de teca (*Tectona grandis*) em plantio adensado no Estado de Rondônia**. Embrapa Rondônia - Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 56 (INFOTECA-E), Porto Velho, p. 14, 2008.

VÍQUEZ, E.; PÉREZ, D. Effect of pruning on tree growth, yield, and wood properties of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. **Silva Fennica**, v. 39 n. 3, p. 381–390. 2005.

VITAL, B. R. **Planejamento e Operação de Serrarias**, Viçosa, Editora UFV. 211 p. 2008.

WADE, M. W.; BULLARD, S. H.; STEELE, P. H.; ARAMAN, P. A. Estimating hardwood sawmill conversion efficiency based on sawing machine and log characteristics. **Forest Products Journal**. Peachtree corners, v. 42, n. 11/12, 1992.

WAHLSTROM, E. E. **Cristalografia Óptica**. Ao Livro Técnico, Rio de Janeiro, 368p. 1969.

ZERBINI, N. J. **Madeiras tropicais com potencial comercial da região do rio Xingu (Pará, Brasil)**: Propriedades tecnológicas e cadeia produtiva. 2008. 187f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal, Departamento de Engenharia Florestal, Faculdade de Tecnologia) – Universidade de Brasília. Brasília-DF. 2008.

ZOBEL, B.; JETT, J.B. **Genetics of wood production**. Springer-Verlag, Berlin, 337p. 1995.

APÊNDICES

A – CLASSIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS TECNOLÓGICAS

Tabela A – Classificação das variáveis tecnológicas, em função da classe de resistência, para dicotiledôneas de NBR 7190 (1997) (U = 12%).

Classificação das Variáveis Tecnológicas						
Classes	$f_{c,0k}$ (Mpa)	$f_{v,0k}$ (Mpa)	$E_{c,0}$ (MPa)	ρ_B (km.m ⁻³)	ρ_{AP} (km.m ⁻³)	Classificação
C 20	≤ 20 a 29,99	≤ 4 a 4,99	≤ 9.500 a 14.499	≤ 500 a 649	≤ 650 a 799	Baixa
C 30	30 a 39,99	5 a 5,99	14.500 a 19.499	650 a 749	800 a 949	Média
C 40	40 a 59,99	6 a 7,99	19.500 a 24.499	750 a 799	950 a 999	Alta
C 60	≥ 60	≥ 8	≥ 24.500	≥ 800	≥ 1.000	Muito alta

ρ_B : densidade básica; ρ_{AP} : densidade aparente; $f_{c,0k}$: resistência de compressão paralela as fibras; $f_{v,k}$: resistência ao cisalhamento; $E_{c,0}$: módulo de elasticidade, na compressão paralela às fibras.

B – ESTATÍSTICA

B.1 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA

Tabela B – Anova para as variáveis dendrométricas DAP, HT, HC, %CRN, %ALB e C das seis procedências de *Tectona grandis* com nove anos de idade, em DIC.

		Soma dos Quadrados	Df	Quadrado Médio	Z	Sig.
DAP (m)	Entre Grupos	,014	5	,003	13,062	,000
	Nos grupos	,011	50	,000		
	Total	,025	55			
Altura T (m)	Entre Grupos	150,245	5	30,049	38,901	,000
	Nos grupos	40,940	53	,772		
	Total	191,185	58			
Altura C (m)	Entre Grupos	217,619	5	43,524	26,574	,000
	Nos grupos	85,166	52	1,638		
	Total	302,785	57			
% Cerne	Entre Grupos	936,916	5	187,383	3,471	,009
	Nos grupos	2753,213	51	53,985		
	Total	3690,130	56			
% Alburno	Entre Grupos	936,916	5	187,383	3,471	,009
	Nos grupos	2753,213	51	53,985		
	Total	3690,130	56			
C (cm/m)	Entre Grupos	1,272	5	,254	10,589	,000
	Nos grupos	1,273	53	,024		
	Total	2,545	58			

Tabela C – Anova para as variáveis de rendimento de madeira serrada VTASC, VCASC, VMS, VRS, RTASC e RCASC das seis procedências de *Tectona grandis* com nove anos de idade, em DIC.

		Soma dos Quadrados	Df	Quadrado Médio	Z	Sig.
VTASC (m³)	Entre Grupos	,579	5	,116	18,840	,000
	Nos grupos	,319	52	,006		
	Total	,898	57			
VCASC (m³)	Entre Grupos	,452	5	,090	26,860	,000
	Nos grupos	,165	49	,003		
	Total	,617	54			
VMS (m³)	Entre Grupos	,031	5	,006	18,000	,000
	Nos grupos	,016	47	,000		
	Total	,047	52			
VRS (m³)	Entre Grupos	,236	5	,047	11,309	,000
	Nos grupos	,208	50	,004		
	Total	,444	55			
RTASC (%)	Entre Grupos	1537,906	5	307,581	4,784	,001
	Nos grupos	3343,151	52	64,291		
	Total	4881,057	57			
RCASC (%)	Entre Grupos	1369,244	5	273,849	4,194	,003
	Nos grupos	3264,731	50	65,295		
	Total	4633,975	55			

Tabela D – Anova para os caracteres anatômicos CEV, CF, LF, DL e EPF das seis procedências com as camadas do perfil radial de *Tectona grandis* com nove anos de idade, em esquema fatorial 6 x 3.

Origem	Variável dependente	Tipo III Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	Z	Sig.
Modelo corrigido	CEV (µm)	42234,642 ^a	17	2484,391	6,383	,000
	CF (µm)	1078506,312 ^b	17	63441,548	15,030	,000
	LF(µm)	242,376 ^c	17	14,257	6,260	,000
	DL (µm)	344,741 ^d	17	20,279	6,190	,000
	EPF (µm)	13,810 ^e	17	,812	6,163	,000
Interceptação	CEV (µm)	7343954,461	1	7343954,461	18866,968	,000
	CF (µm)	70699149,285	1	70699149,285	16749,613	,000
	LF(µm)	49873,556	1	49873,556	21896,999	,000
	DL (µm)	22556,280	1	22556,280	6885,551	,000
	EPF (µm)	1337,233	1	1337,233	10145,967	,000
CLONES + SEMENTE	CEV (µm)	9411,384	5	1882,277	4,836	,001
	CF (µm)	195210,962	5	39042,192	9,250	,000
	LF(µm)	117,001	5	23,400	10,274	,000
	DL (µm)	216,594	5	43,319	13,224	,000
	EPF (µm)	9,115	5	1,823	13,832	,000
PERFIL RADIAL	CEV (µm)	27863,024	2	13931,512	35,791	,000
	CF (µm)	659682,365	2	329841,182	78,144	,000
	LF(µm)	52,637	2	26,318	11,555	,000
	DL (µm)	61,171	2	30,586	9,337	,000
	EPF (µm)	,841	2	,420	3,190	,049
CLONES + SEMENTES * PERFIL RADIAL	CEV (µm)	4163,061	10	416,306	1,070	,400
	CF (µm)	88054,065	10	8805,406	2,086	,040
	LF(µm)	56,631	10	5,663	2,486	,015
	DL (µm)	56,536	10	5,654	1,726	,097
	EPF (µm)	4,111	10	,411	3,120	,003

Erro	CEV (μm)	22576,460	58	389,249		
	CF (μm)	244814,656	58	4220,942		
	LF(μm)	132,103	58	2,278		
	DL (μm)	190,001	58	3,276		
	EPF (μm)	7,644	58	,132		
Total	CEV (μm)	7956014,452	76			
	CF (μm)	76011640,911	76			
	LF(μm)	53682,199	76			
	DL (μm)	24955,113	76			
	EPF (μm)	1413,283	76			
Total corrigido	CEV (μm)	64811,102	75			
	CF (μm)	1323320,969	75			
	LF(μm)	374,480	75			
	DL (μm)	534,743	75			
	EPF (μm)	21,454	75			

a. R Quadrado = ,652 (R Quadrado Ajustado = ,550)

b. R Quadrado = ,815 (R Quadrado Ajustado = ,761)

c. R Quadrado = ,647 (R Quadrado Ajustado = ,544)

d. R Quadrado = ,645 (R Quadrado Ajustado = ,541)

e. R Quadrado = ,644 (R Quadrado Ajustado = ,539)

Tabela E – Anova para os caracteres anatômicos DV e FV das seis procedências com as camadas do perfil radial de *Tectona grandis* com nove anos de idade, em esquema fatorial 6 x 3.

Origem	Variável dependente	Tipo III Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	Z	Sig.
Modelo corrigido	DV (μm)	54009,611 ^a	17	3177,036	9,325	,000
	FV (n mm-2)	2151,593 ^b	17	126,564	7,298	,000
Interceptação	DV (μm)	897006,345	1	897006,345	2632,909	,000
	FV (n mm-2)	24455,853	1	24455,853	1410,237	,000
CLONES + SEMENTES	DV (μm)	35972,747	5	7194,549	21,118	,000
	FV (n mm-2)	1855,735	5	371,147	21,402	,000
PERFIL RADIAL	DV (μm)	11093,366	2	5546,683	16,281	,000
	FV (n mm-2)	51,727	2	25,864	1,491	,233
CLONES + SEMENTES * PERFIL RADIAL	DV (μm)	4974,832	10	497,483	1,460	,175
	FV (n mm-2)	202,955	10	20,296	1,170	,327
Erro	DV (μm)	22485,556	66	340,690		
	FV (n mm-2)	1144,550	66	17,342		
Total	DV (μm)	994501,995	84			
	FV (n mm-2)	28188,000	84			
Total corrigido	DV (μm)	76495,167	83			
	FV (n mm-2)	3296,143	83			

a. R Quadrado = ,706 (R Quadrado Ajustado = ,630)

b. R Quadrado = ,653 (R Quadrado Ajustado = ,563)

Tabela F – Anova para os caracteres anatômicos MFA das seis procedências com as camadas do perfil radial de *Tectona grandis* com nove anos de idade, em esquema fatorial 6 x 3.

Origem	Tipo III Soma dos Quadrados	Df	Quadrado Médio	Z	Sig.
--------	-----------------------------	----	----------------	---	------

Modelo corrigido	,100 ^a	17	,006	,557	,912
Interceptação	15707,408	1	15707,408	1487620,017	,000
CLONES + SEMENTE	,025	5	,005	,470	,798
PERFIL RADIAL	,004	2	,002	,170	,844
CLONES + SEMENTE *	,072	10	,007	,684	,736
PERFIL RADIAL					
Erro	,750	71	,011		
Total	15750,599	89			
Total corrigido	,850	88			

a. R Quadrado = ,118 (R Quadrado Ajustado = -,094)

Tabela G – Anova para os componentes químicos das seis procedências de *Tectona grandis* com nove anos de idade, em DIC.

		Soma dos Quadrados	Df	Quadrado Médio	Z	Sig.
EXTRATIVOS (%)	Entre Grupos	15,961	5	3,192	5,382	,003
	Nos grupos	11,270	19	,593		
	Total	27,231	24			
CINZAS 525°C (%)	Entre Grupos	,155	5	,031	2,594	,064
	Nos grupos	,203	17	,012		
	Total	,358	22			
LIGNINA S (%)	Entre Grupos	22,646	5	4,529	33,681	,000
	Nos grupos	3,093	23	,134		
	Total	25,739	28			
LIGNINA I (%)	Entre Grupos	,035	5	,007	1,053	,417
	Nos grupos	,127	19	,007		
	Total	,163	24			
LIGNINA (%)	Entre Grupos	24,164	5	4,833	29,706	,000
	Nos grupos	3,742	23	,163		
	Total	27,906	28			
HOLOCELULOSE (%)	Entre Grupos	22,182	5	4,436	23,094	,000
	Nos grupos	3,458	18	,192		
	Total	25,640	23			

Tabela H – Anova para as variáveis das propriedades físicas U, ρ_{AP} , ρ_B , ΔV , ϵ_{r1} , ϵ_{r2} , ϵ_{r3} , ϵ_{i1} , ϵ_{i2} e ϵ_{i3} das seis procedências com as camadas do perfil radial de *Tectona grandis* com nove anos de idade, em esquema fatorial 6 x 2.

Origem	Variável dependente	Tipo III Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	Z	Sig.
Modelo corrigido	Teor de Umidade (%)	15,142 ^a	11	1,377	19,902	,000
	Densidade Aparente (kg/m ³)	48477,301 ^b	11	4407,027	2,442	,022
	Densidade Básica (kg/m ³)	41306,376 ^c	11	3755,125	2,514	,018
	Varição Volumétrica (%)	17,924 ^d	11	1,629	1,369	,229
	Retração Axial (%)	,144 ^e	11	,013	,868	,578
	Retração Radial (%)	9,199 ^f	11	,836	,868	,578
	Retração Tangencial (%)	8,196 ^g	11	,745	,715	,717
	Inchamento Axial (%)	,156 ^h	11	,014	,971	,489
	Inchamento Radial (%)	10,538 ⁱ	11	,958	,864	,581
	Inchamento Tangencial (%)	10,308 ^j	11	,937	,746	,688

Interceptação	Teor de Umidade (%)	6090,694	1	6090,694	88056,228	,000
	Densidade Aparente (kg/m³)	13035009,98	1	13035009,98	7222,367	,000
	Densidade Básica (kg/m³)	9363024,249	1	9363024,249	6267,624	,000
	Varição Volumétrica (%)	3686,886	1	3686,886	3098,114	,000
	Retração Axial (%)	26,075	1	26,075	1728,811	,000
	Retração Radial (%)	517,963	1	517,963	537,466	,000
	Retração Tangencial (%)	839,234	1	839,234	804,955	,000
	Inchamento Axial (%)	26,125	1	26,125	1788,710	,000
	Inchamento Radial (%)	559,280	1	559,280	504,631	,000
	Inchamento Tangencial (%)	928,620	1	928,620	739,407	,000
Clones + Sementes	Teor de Umidade (%)	14,761	5	2,952	42,681	,000
	Densidade Aparente (kg/m³)	48082,092	5	9616,418	5,328	,001
	Densidade Básica (kg/m³)	40943,702	5	8188,740	5,482	,001
	Varição Volumétrica (%)	15,061	5	3,012	2,531	,046
	Retração Axial (%)	,057	5	,011	,757	,587
	Retração Radial (%)	7,968	5	1,594	1,654	,171
	Retração Tangencial (%)	5,317	5	1,063	1,020	,420
	Inchamento Axial (%)	,077	5	,015	1,049	,404
	Inchamento Radial (%)	9,256	5	1,851	1,670	,167
	Inchamento Tangencial (%)	7,025	5	1,405	1,119	,368
Perfil Radial	Teor de Umidade (%)	,033	1	,033	,483	,491
	Densidade Aparente (kg/m³)	,006	1	,006	,000	,999
	Densidade Básica (kg/m³)	9,067	1	9,067	,006	,938
	Varição Volumétrica (%)	,662	1	,662	,556	,461
	Retração Axial (%)	,004	1	,004	,234	,632
	Retração Radial (%)	,384	1	,384	,399	,532
	Retração Tangencial (%)	1,426	1	1,426	1,368	,250
	Inchamento Axial (%)	,002	1	,002	,116	,735
	Inchamento Radial (%)	,406	1	,406	,366	,549
	Inchamento Tangencial (%)	1,387	1	1,387	1,105	,300
Clones + Sementes * Perfil Radial	Teor de Umidade (%)	,183	5	,037	,529	,753
	Densidade Aparente (kg/m³)	1843,018	5	368,604	,204	,959
	Densidade Básica (kg/m³)	1839,466	5	367,893	,246	,939
	Varição Volumétrica (%)	2,101	5	,420	,353	,877
	Retração Axial (%)	,098	5	,020	1,301	,285
	Retração Radial (%)	1,193	5	,239	,248	,938
	Retração Tangencial (%)	1,784	5	,357	,342	,884
	Inchamento Axial (%)	,095	5	,019	1,295	,288
	Inchamento Radial (%)	1,265	5	,253	,228	,948
	Inchamento Tangencial (%)	2,345	5	,469	,374	,863
Erro	Teor de Umidade (%)	2,490	36	,069		
	Densidade Aparente (kg/m³)	64973,206	36	1804,811		
	Densidade Básica (kg/m³)	53779,367	36	1493,871		

	Varição Volumétrica (%)	42,842	36	1,190		
	Retração Axial (%)	,543	36	,015		
	Retração Radial (%)	34,694	36	,964		
	Retração Tangencial (%)	37,533	36	1,043		
	Inchamento Axial (%)	,526	36	,015		
	Inchamento Radial (%)	39,899	36	1,108		
	Inchamento Tangencial (%)	45,212	36	1,256		
Total	Teor de Umidade (%)	6287,360	48			
	Densidade Aparente (kg/m ³)	13651632,660	48			
	Densidade Básica (kg/m ³)	9823582,263	48			
	Varição Volumétrica (%)	3855,279	48			
	Retração Axial (%)	27,385	48			
	Retração Radial (%)	577,409	48			
	Retração Tangencial (%)	909,640	48			
	Inchamento Axial (%)	27,450	48			
	Inchamento Radial (%)	626,400	48			
	Inchamento Tangencial (%)	1009,036	48			
Total corrigido	Teor de Umidade (%)	17,632	47			
	Densidade Aparente (kg/m ³)	113450,507	47			
	Densidade Básica (kg/m ³)	95085,742	47			
	Varição Volumétrica (%)	60,765	47			
	Retração Axial (%)	,687	47			
	Retração Radial (%)	43,893	47			
	Retração Tangencial (%)	45,729	47			
	Inchamento Axial (%)	,682	47			
	Inchamento Radial (%)	50,436	47			
	Inchamento Tangencial (%)	55,521	47			

- a. R Quadrado = ,859 (R Quadrado Ajustado = ,816)
b. R Quadrado = ,427 (R Quadrado Ajustado = ,252)
c. R Quadrado = ,434 (R Quadrado Ajustado = ,262)
d. R Quadrado = ,295 (R Quadrado Ajustado = ,080)
e. R Quadrado = ,210 (R Quadrado Ajustado = -,032)
f. R Quadrado = ,210 (R Quadrado Ajustado = -,032)
g. R Quadrado = ,179 (R Quadrado Ajustado = -,072)
h. R Quadrado = ,229 (R Quadrado Ajustado = -,007)
i. R Quadrado = ,209 (R Quadrado Ajustado = -,033)
j. R Quadrado = ,186 (R Quadrado Ajustado = -,063)

Tabela I – Anova para as variáveis das propriedades físicas A_i e A_r das seis procedências com as camadas do perfil radial de *Tectona grandis* com nove anos de idade, em esquema fatorial 6 x 2.

Origem	Variável dependente	Tipo III Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	Z	Sig.
Modelo corrigido	A_r	2,837 ^a	11	,258	,872	,573

	Ai	2,980 ^b	11	,271	,833	,608
Interceptação	Ar	98,584	1	98,584	333,425	,000
	Ai	101,541	1	101,541	312,306	,000
Clones + Sementes	Ar	1,234	5	,247	,835	,532
	Ai	1,392	5	,278	,856	,518
Perfil Radial	Ar	,696	1	,696	2,353	,132
	Ai	,698	1	,698	2,147	,150
Clones + Sementes *	Ar	,791	5	,158	,535	,749
	Perfil Radial	,776	5	,155	,478	,791
Erro	Ar	13,009	44	,296		
	Ai	14,306	44	,325		
Total	Ar	116,589	56			
	Ai	121,123	56			
Total corrigido	Ar	15,846	55			
	Ai	17,286	55			

a. R Quadrado = ,179 (R Quadrado Ajustado = -,026)

b. R Quadrado = ,172 (R Quadrado Ajustado = -,034)

Tabela J – Anova para as variáveis das propriedades Mecânicas $f_{c,0}$, $f_{c,90}$, f_H , f_M e E_M das seis procedências com as camadas do perfil radial de *Tectona grandis* com nove anos de idade, em esquema fatorial 6 x 2.

Origem	Variável dependente	Tipo III Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	Z	Sig.
Modelo corrigido	$f_{c,0}$ (MPa)	164,640 ^a	11	14,967	4,687	,000
	$f_{c,90}$ (MPa)	27,318 ^b	11	2,483	2,245	,039
	f_H (MPa)	215,216 ^c	11	19,565	1,343	,250
	f_M (MPa)	1080,617 ^d	11	98,238	3,982	,001
	E_M (MPa)	7032535,188 ^e	11	639321,381	1,006	,464
Interceptação	$f_{c,0}$ (MPa)	53062,138	1	53062,138	16618,169	,000
	$f_{c,90}$ (MPa)	2206,616	1	2206,616	1994,917	,000
	f_H (MPa)	34422,856	1	34422,856	2363,269	,000
	f_M (MPa)	286189,668	1	286189,668	11599,694	,000
	E_M (MPa)	2817463922,354	1	2817463922,354	4435,486	,000
Clones + Sementes	$f_{c,0}$ (MPa)	52,565	5	10,513	3,292	,017
	$f_{c,90}$ (MPa)	12,592	5	2,518	2,277	,072
	f_H (MPa)	135,546	5	27,109	1,861	,131
	f_M (MPa)	401,878	5	80,376	3,258	,018
	E_M (MPa)	3986808,133	5	797361,627	1,255	,309
Perfil Radial	$f_{c,0}$ (MPa)	87,020	1	87,020	27,253	,000
	$f_{c,90}$ (MPa)	3,204	1	3,204	2,897	,099
	f_H (MPa)	12,642	1	12,642	,868	,359
	f_M (MPa)	17,062	1	17,062	,692	,412
	E_M (MPa)	865009,365	1	865009,365	1,362	,252
Clones + Sementes * Perfil Radial	$f_{c,0}$ (MPa)	10,511	5	2,102	,658	,658
	$f_{c,90}$ (MPa)	10,244	5	2,049	1,852	,133
	f_H (MPa)	34,061	5	6,812	,468	,797
	f_M (MPa)	187,186	5	37,437	1,517	,214
	E_M (MPa)	1775703,214	5	355140,643	,559	,730
Erro	$f_{c,0}$ (MPa)	95,791	30	3,193		
	$f_{c,90}$ (MPa)	33,184	30	1,106		
	f_H (MPa)	436,973	30	14,566		
	f_M (MPa)	740,165	30	24,672		
	E_M (MPa)	19056292,494	30	635209,750		
Total	$f_{c,0}$ (MPa)	67541,273	42			

	fc,90 (MPa)	2763,320	42		
	fH (MPa)	43600,690	42		
	fM (MPa)	360700,714	42		
	EM (MPa)	3609996108,205	42		
Total corrigido	fc,0 (MPa)	260,430	41		
	fc,90 (MPa)	60,501	41		
	fH (MPa)	652,190	41		
	fM (MPa)	1820,782	41		
	EM (MPa)	26088827,682	41		

a. R Quadrado = ,632 (R Quadrado Ajustado = ,497)

b. R Quadrado = ,452 (R Quadrado Ajustado = ,250)

c. R Quadrado = ,330 (R Quadrado Ajustado = ,084)

d. R Quadrado = ,593 (R Quadrado Ajustado = ,444)

e. R Quadrado = ,270 (R Quadrado Ajustado = ,002)

Tabela K – Anova para as variáveis das cromáticas L*, a*, b*, C e h* das seis procedências com as camadas do perfil radial de *Tectona grandis* com nove anos de idade, em esquema fatorial 6 x 2.

Origem	Variável dependente	Tipo III Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	Z	Sig.
Modelo corrigido	L*	4011,856 ^a	11	364,714	37,389	,000
	a*	289,318 ^b	11	26,302	30,806	,000
	b*	59,029 ^c	11	5,366	,923	,527
	C	127,531 ^d	11	11,594	2,079	,043
	h ^o	1587,103 ^e	11	144,282	20,569	,000
Interceptação	L*	214508,321	1	214508,321	21990,452	,000
	a*	2917,454	1	2917,454	3417,044	,000
	b*	23795,504	1	23795,504	4093,284	,000
	C	26980,506	1	26980,506	4837,644	,000
	h ^o	274863,541	1	274863,541	39184,728	,000
Clones + Sementes	L*	73,844	5	14,769	1,514	,205
	a*	8,639	5	1,728	2,024	,094
	b*	17,393	5	3,479	,598	,701
	C	18,582	5	3,716	,666	,651
	h ^o	64,792	5	12,958	1,847	,123
Perfil Radial	L*	3847,858	1	3847,858	394,466	,000
	a*	263,421	1	263,421	308,530	,000
	b*	9,592	1	9,592	1,650	,206
	C	69,207	1	69,207	12,409	,001
	h ^o	1461,600	1	1461,600	208,367	,000
Clones + Sementes * Perfil Radial	L*	11,594	5	2,319	,238	,944
	a*	9,747	5	1,949	2,283	,063
	b*	29,482	5	5,896	1,014	,421
	C	32,237	5	6,447	1,156	,346
	h ^o	36,197	5	7,239	1,032	,411
Erro	L*	429,203	44	9,755		
	a*	37,567	44	,854		
	b*	255,785	44	5,813		
	C	245,397	44	5,577		
	h ^o	308,641	44	7,015		
Total	L*	224571,145	56			
	a*	3305,579	56			
	b*	24622,314	56			

	C	27930,543	56			
	h°	283521,428	56			
Total corrigido	L*	4441,058	55			
	a*	326,885	55			
	b*	314,814	55			
	C	372,927	55			
	h°	1895,743	55			

- a. R Quadrado = ,903 (R Quadrado Ajustado = ,879)
b. R Quadrado = ,885 (R Quadrado Ajustado = ,856)
c. R Quadrado = ,188 (R Quadrado Ajustado = -,016)
d. R Quadrado = ,342 (R Quadrado Ajustado = ,177)
e. R Quadrado = ,837 (R Quadrado Ajustado = ,796)

B.2 – TWO STEP CLUSTER



Figura A – Two step cluster para variáveis de rendimento da madeira serrada de *Tectona grandis* com nove anos de idade.

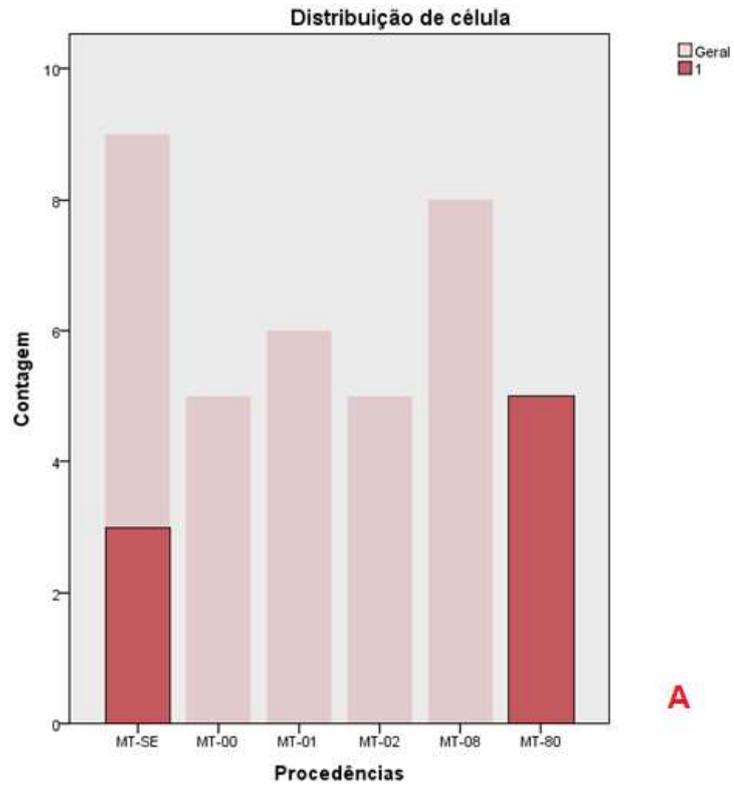
Agrupamentos
Classificação geral do cluster

Cluster	1
Rótulo	
Descrição	
Tamanho	100,0% (12)
Entradas	PROCEDÊNCIAS MT-01 (25,0%) Zscore: CF (μm) -0,07 Zscore: EM (MPa) -0,53 Zscore: EPF (μm) -0,09 Zscore: ex (%) -0,26 Zscore: fc,0 (MPa) -0,08 Zscore: fM (MPa) -0,26 Zscore: l (%) -0,33 Zscore: MFA (°) 0,26 Zscore: $\epsilon\text{r}3$ (%) 0,54 Zscore: ρB (kg.m^{-3}) -0,12

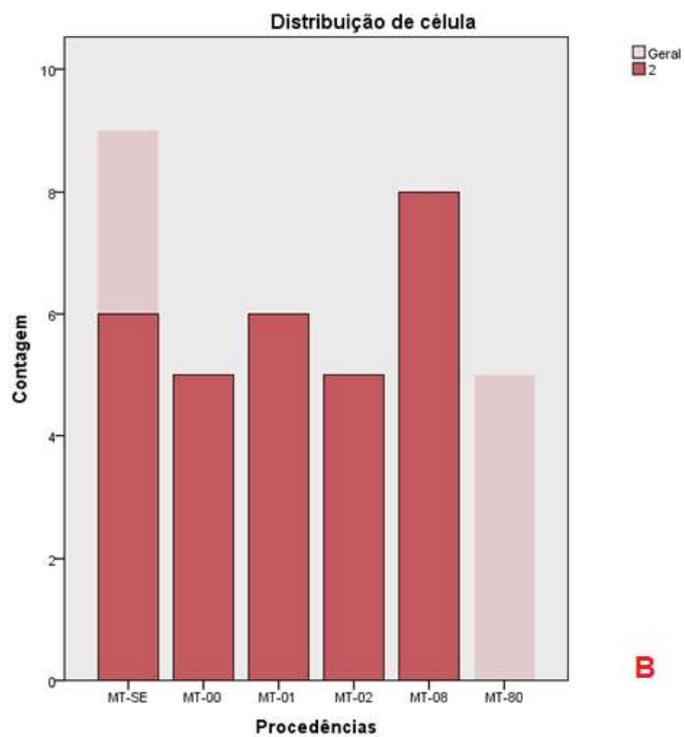
Agrupamentos
Classificação dentro do cluster

Cluster	1
Rótulo	
Descrição	
Tamanho	100,0% (12)
Entradas	PROCEDÊNCIAS MT-01 (25,0%) Zscore: CF (μm) -0,07 Zscore: EM (MPa) -0,53 Zscore: EPF (μm) -0,09 Zscore: ex (%) -0,26 Zscore: fc,0 (MPa) -0,08 Zscore: fM (MPa) -0,26 Zscore: l (%) -0,33 Zscore: MFA (°) 0,26 Zscore: $\epsilon\text{r}3$ (%) 0,54 Zscore: ρB (kg.m^{-3}) -0,12

Figura B – *Two step cluster* para variáveis de propriedades tecnológicas da madeira de *Tectona grandis* com nove anos de idade.



A



B

Figura C – Classificação das procedências: Dentro do *cluster 1* (A). Dentro do *cluster 2* (B) de variáveis de rendimento.

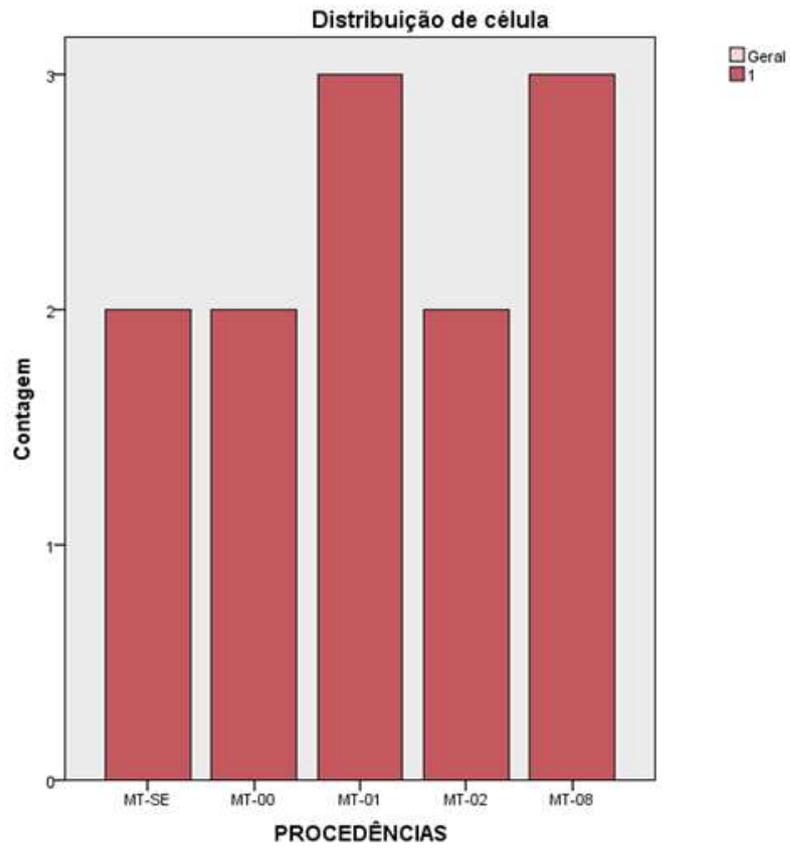


Figura D – Classificação das procedências dentro do único *cluster* de variáveis de propriedades tecnológicas.