



TATIANA PAULA MARQUES DE ARRUDA

SECAGEM DA MADEIRA JUVENIL DE
Tectona grandis L.F.

LAVRAS – MG

2014

TATIANA PAULA MARQUES DE ARRUDA

SECAGEM DA MADEIRA JUVENIL DE *Tectona grandis* L.f.

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração Processamento e Utilização da Madeira, para a obtenção de título de Doutor.

Orientador

Dr. José Reinaldo Moreira da Silva

Coorientadores

PhD José Tarcísio de Lima

Dr. Gustavo Henrique Denzin Tonoli

LAVRAS -MG

2013

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Arruda, Tatiana Paula Marques de.

Secagem da madeira juvenil de *Tectona grandis* L.F. / Tatiana
Paula Marques de Arruda. – Lavras : UFLA, 2013.

98 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2013.

Orientador: José Reinaldo Moreira da Silva.

Bibliografia.

1. Madeira - Propriedades tecnológicas. 2. Teca - Madeira -
Defeitos da secagem. 3. Teca - Propriedades tecnológicas. 4.
Agregação de valor. 5. Madeira - Matéria prima - Aproveitamento.
I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 674.142

TATIANA PAULA MARQUES DE ARRUDA

SECAGEM DA MADEIRA JUVENIL DE *Tectona grandis* L.F.

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração Processamento e Utilização da madeira, para a obtenção de título de Doutor.

APROVADA em 16 de dezembro de 2013.

PhD José Tarcísio Lima UFLA

Dr. Paulo Fernando Trugilho UFLA

PhD. Paulo Ricardo Gherardi Hein UFMG

Dr. Ricardo Jorge Klitzke UFPR

Dr. José Reinaldo Moreira da Silva
Orientador

LAVRAS – MG

2013

A minha família...

Em especial a minha mãe, Rogina Marques de Arruda, que sempre esteve ao meu lado, com seu amor, carinho, atenção e incentivo.

Aos meus irmãos, Rondenelly Cesar, Ronaldo Adriano e Laura Antônia, pelo apoio e carinho.

Aos meus sobrinhos, Pedro Augusto, João Gabriel, Ana Carolina e Giuliana Lorena, pela alegria que me proporcionam.

A minha avó, Nila Marques de Arruda, pelo amor e admiração.

Ao meu noivo, Rodrigo Moesch Welter, pelo amor, compreensão e companheirismo.

DEDICO AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pela força e coragem nesta etapa da minha vida e o conforto em meu coração nos momentos difícil de solidão, insegurança e ansiedade.

À minha mãe, por toda atenção, amor, carinho, ensinamentos, confiança, dedicação e eterna companhia.

Aos meus irmãos, pelo carinho e os ensinamentos da vida.

Aos meus sobrinhos, por me fazerem rir, brincar, relaxar e compreender o significado do amor incondicional.

Ao meu noivo, pelo amor, companheirismo, respeito, dedicação, admiração e compreensão.

Ao meu pai, Paulo César, que, mesmo longe do meu convívio, sempre torceu pelas minhas conquistas profissionais.

À Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), pela liberação e apoio.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Ciências Florestais, Setor de Ciência e Tecnologia da Madeira, pela oportunidade de realizar o doutorado.

Ao orientador José Reinaldo Moreira da Silva, pela orientação, ensinamentos, apoio, participação e atenção.

Aos professores José Tarcísio, Paulo Trugilho, Paulo Hein, Gustavo Tonoli, Fábio Akira, Alfredo Napoli, Lourival Mendes e aos demais que, de alguma forma, contribuíram para os conhecimentos.

Aos técnicos Claret, Ernani e Cris, pelo suporte técnico e administrativo.

Aos amigos queridos e especiais, Alessandra Fonseca e Jonnys Castro, pelo carinho, companheirismo, atenção, dedicação e incentivo.

À amiga Olivia Lopes, pelo carinho, estima e incentivo, e Claudia Ubinarti, Javan Pereira, João Rodrigo, Teodorico, Altobelly, Luis Eduardo, Caroline Sartori, Mara Lúcia, Selma Lopes, Claudinéia, Tatti Costa, Jeimy e Anna Carolina; aos bolsistas Vinicius e Glenda, pelo auxílio na coleta dos dados em laboratório; Allan Motta, pelos auxílios na estatística; Alessandra Ribeiro, pela ajuda na preparação das lâminas histológicas e ao Clério, grande amigo e guardião. A todos, muito obrigada.

Aos meus amigos do Mato Grosso, Suely, Laércio, João Junior, Emanuel, Jociane, Ivan, Mônica, Marquinhos e Fidel, pelo apoio e carinho.

Às empresas Floresteca e Bacaeri, que cederam a matéria-prima para a realização deste estudo.

À indústria Brasil Tropical Pisos, por ceder a estufa de secagem convencional para testar o programa de secagem.

Aos funcionários e gerentes Carlos, Ney, Giovanni, Neide, Cristiano, Gerônimo, Fausto, Luis Otavio, Neném, Zé da Guia, Antônio Passos, Fernando Passos e Augusto Passos, Olindo Bianchinni, José Carlos, Vagner, Vilmar, Anderson e Sr. Zinho.

RESUMO

Com a crescente demanda por fontes alternativas de matéria-prima para as indústrias, estudos nos quais se identifiquem as características tecnológicas de madeira juvenil, bem como o seu uso, são fundamentais para a produção sustentável. O trabalho foi realizado com o objetivo de apresentar informações técnicas do comportamento da secagem da madeira juvenil de *Tectona grandis*. Para tanto, foi necessário desenvolver programa de secagem para essa matéria-prima; avaliar a influência das propriedades anatômicas, físicas e químicas no processo de secagem e verificar os defeitos da secagem em estufa convencional. A madeira juvenil de *Tectona grandis* oriunda de desbastes foi avaliada no laboratório e no campo. No laboratório, foram avaliadas cinco árvores nas idades de seis, oito e dez anos, amostradas a 1,30 m do solo, em forma de toretes de 30 cm, que foram desdobrados em serra de fita. Na prancha central foram retirados corpos de prova em duas posições radiais (central e externa), para avaliar as propriedades anatômicas, físicas e químicas. Já as peças adjacentes foram destinadas ao ensaio de secagem, a 100 °C. No campo, foram utilizadas 15 árvores nas idades de 9, 11 e 13 anos, desdobradas em toras de 2.300 mm. De cada tora foi retirada uma tábua, para a secagem em estufa convencional, de 2.300 x 35 mm (comprimento x espessura) e largura variável, em função do diâmetro da tora que a originou. O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado em arranjo fatorial, com comparação múltipla e correlação de Pearson entre as variáveis. Realizaram-se a análise de variância e o teste de média de Tukey, a 95% de probabilidade, para estudos de laboratório. A análise descritiva foi empregada apenas para os estudos de campo. Observaram-se maior comprimento de fibras (827,4 µm) para a idade de 10 anos e tendência de aumento da posição central para a externa. O maior diâmetro de vaso (130 µm) foi observado para idade de 6 anos. A densidade básica variou de 0,401 a 0,573 g*cm⁻³; a contração radial, de 2,4% a 3,5%; a contração tangencial, de 4,9% a 5,8% e o coeficiente de anisotropia, de 1,82 a 2,14. Os máximos valores para teor de extrativos e de lignina foram de 16,8% e de 31,3%, para a idade de 10 e 6 anos, respectivamente. O tempo de secagem médio (12,1 horas) entre a umidade inicial até a umidade de 5% foi maior para a idade de 10 anos. A taxa de secagem em estufa convencional na condição verde, até o ponto de saturação das fibras (PSF), foi de 0,42%*h⁻¹ e do PSF até a umidade final de 7%, de 0,26%*h⁻¹.

Palavras-chave: Aproveitamento da matéria-prima de desbaste. Defeitos de secagem. Agregação de valor.

ABSTRACT

The growing demand for alternative sources of raw materials for industries requires studies that identify the technological characteristics of juvenile wood and its use, are fundamental to sustainable production. The objective was to present technical information of drying behavior *Tectona grandis* juvenile wood. For this it was necessary to develop the drying program for this raw material, evaluate the influence of anatomical, physical and chemical properties in the drying process and verify the defects in kiln dried wood. The juvenile wood of *Tectona grandis* from thinning were evaluated in the laboratory and in the field. In the laboratory, five trees were assessed at ages six, eight and ten years, sampled at 1.30 m above the ground, in the form of short logs of 30 cm, which were sawn in bandsaw. In the central plank were removed specimens in two radial positions (inner-outer) for evaluate the anatomical, physical and chemical properties. In its turn the adjacent pieces were conducted to drying test at 100°C. In the field, 15 trees were used at ages 9, 11 and 13, split into logs of 2300 mm. Each log had a board removed for drying in conventional kiln of 2300 x 35 mm (length x thickness) and variable width, depending on the original log diameter. The experimental design was a completely randomized factorial design with multiple comparisons and Pearson's correlation among the variables. Analysis of variance and Tukey's test average, at 95 % probability for laboratory studies were performed. Descriptive analysis was used only for field studies. It was observed greater fiber length (827.4 μm) for age of 10 years and trend increasing from the midland to the external positions. The largest vessel diameter (130 μm) was observed for 6 years of age. The basic density ranged from 0.401 to 0.573 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, the radial contraction ranged from 2.4 to 3.5 %; tangential contraction ranged from 4.9 to 5.8% and the anisotropy coefficient ranged from 1.82 to 2.14. The maximum values for extractives content and lignin were 16.8 % and 31.3 %, for age 10 and 6 years, respectively. The average drying time (12.1 h) between the initial moisture until the moisture of 5% was higher for the age of 10 years. The drying rate in conventional kiln from green condition to the fiber saturation point (FSP) was 0.46% $\cdot\text{h}^{-1}$ and the FSP until the final moisture of 7 % was 0.23% $\cdot\text{h}^{-1}$.

Keywords: Utilization of raw materials thinning. Drying defects. Adding value.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquema da amostragem e preparação dos corpos de prova para os ensaios físicos, anatômicos, químicos e secagem a 100 °C35
Figura 2	Corpos de prova fotografados para a determinação de presença de colapso. A= imagem antes da secagem, no estado úmido e B= imagem após a secagem, a 100 °C, no estado seco. Barra = 1 cm.....40
Figura 3	Corpos de prova preparados para observação e mensuração de diâmetro de pontoações intervasculares. Barra = 1 cm43
Figura 4	Amostras determinadoras de umidade (A) e amostras controladoras de umidade (B), para o processo de secagem convencional.....44
Figura 5	Valores médios da densidade básica da madeira de desbaste de <i>Tectona grandis</i> , no sentido radial, em diferentes idades, com desvio padrão47
Figura 6	Valores médios da contração volumétrica da madeira de desbaste de <i>Tectona grandis</i> , no sentido radial, nas diferentes idades, com o desvio padrão49
Figura 7	Valores médios da contração radial da madeira de desbaste de <i>Tectona grandis</i> , no sentido radial, em diferentes idades, com desvio padrão49
Figura 8	Valores médios do comprimento de fibras da madeira de desbaste de <i>Tectona grandis</i> , no sentido radial, em diferentes idades, com desvio padrão52
Figura 9	Valores médios do ângulo microfibrilar da madeira de desbaste de <i>Tectona grandis</i> , no sentido radial, em diferentes idades, com desvio padrão53
Figura 10	Fotomicrografias do lenho de <i>Tectona grandis</i> L. f. nas seções longitudinais tangenciais nas posições medula-câmbio nas três idades de desbastes. A (medula) e B (câmbio) na idade de desbaste de 6 anos; C (medula) e D (câmbio) na idade de desbaste de 8 anos e E (medula) e F (câmbio) na idade de desbaste de 10 anos. Barra = 60 µm.....56
Figura 11	Variação e comparação múltipla dos valores médios da largura do raio da madeira de desbaste de <i>Tectona grandis</i> , no sentido radial, nas diferentes idades. Obs.: os valores nas barras iguais, seguidos da mesma letra, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 95% de probabilidade57

Figura 12	Varição e comparação múltipla dos valores médios da altura do raio da madeira de desbaste de <i>Tectona grandis</i> , no sentido radial, em diferentes idades. Obs.: os valores nas barras iguais, seguidos da mesma letra, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 95% de probabilidade	58
Figura 13	Varição e comparação múltipla dos valores médios da frequência de raio da madeira de desbaste de <i>Tectona grandis</i> , no sentido radial, em diferentes idades. Obs.: os valores nas barras iguais seguidos da mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 95% de probabilidade	59
Figura 14	Varição e comparação múltipla dos valores médios do diâmetro de vasos da madeira de desbaste de <i>Tectona grandis</i> , no sentido radial, em diferentes idades. Obs.: os valores nas barras iguais seguidos da mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 95% de probabilidade	60
Figura 15	Varição e comparação múltipla dos valores médios de frequência de vasos da madeira de <i>Tectona grandis</i> , no sentido radial, nas diferentes idades de desbaste. Obs.: os valores nas barras iguais, seguidos da mesma letra, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 95% de probabilidade	61
Figura 16	Fotomicrografias do lenho de <i>Tectona grandis</i> L. f. nas seções transversais das posições medula-câmbio, nas três idades de desbaste. A (medula) e B (câmbio) na idade de desbaste de 6 anos; C (medula) e D (câmbio) na idade de desbaste de 8 anos e E (medula) e F (câmbio) na idade de desbaste de 10 anos. Barra = 60 μ m	62
Figura 17	Fotomicrografia eletrônica das pontoações intervasculares na madeira de desbaste de <i>Tectona grandis</i> L.f., em diferentes idades.....	63
Figura 18	Varição nos diâmetros das pontoações na madeira de desbaste de <i>Tectona grandis</i> , nas posições radiais em diferentes idades	66
Figura 19	Contrações nos corpos de prova submetidos à secagem a 100 °C. A: corpo de prova úmido; B: corpo de prova seco e C: sobreposição das dimensões dos corpos de prova úmidos e secos. Barra = 1cm	72
Figura 20	Perfil da secagem da madeira de <i>Tectona grandis</i> , oriunda de desbaste aos seis anos, no ensaio a 100 °C	75
Figura 21	Perfil da secagem da madeira de <i>Tectona grandis</i> , oriunda de desbaste aos oito anos, no ensaio a 100 °C.....	75
Figura 22	Perfil da secagem da madeira de <i>Tectona grandis</i> , oriunda de desbaste aos dez anos, no ensaio a 100°C	76

- Figura 23 Perfil gravimétrico médio da secagem convencional para a madeira de desbaste de *Tectona grandis* L.f. em diferentes idades81
- Figura 24 Defeitos na madeira após a secagem convencional em estufa industrial. A: rachadura superfície; B: rachaduras de superfícies; C: nós; D: rachadura de nó 83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Parâmetros indicadores para a elaboração de programas de secagem de diferentes madeiras por meio do ensaio de secagem a 100 °C	27
Tabela 2	Indicação da qualidade e do uso da madeira, em função do coeficiente de anisotropia.....	29
Tabela 3	Variáveis do ensaio de secagem a 100 °C.....	38
Tabela 4	Escore atribuído às rachaduras de topo.....	38
Tabela 5	Classificação de colapso devido à variação da superfície (Δs), antes e após a secagem a 100 °C.....	40
Tabela 6	Modelos matemáticos para a determinação dos programas de secagem.....	41
Tabela 7	Classificação da quantidade e percentual de sarrafos com nós em madeira juvenil de <i>Tectona grandis</i> L.f.	42
Tabela 8	Comparação múltipla das médias da densidade básica (DB), das contrações radial (β_{rd}), tangencial (β_{tg}) e volumétrica (β_{vol}) e do coeficiente de anisotropia (θ) da madeira de desbaste de <i>Tectona grandis</i> L. f. de diferentes idades.....	46
Tabela 9	Comparação múltipla de média para comprimento da fibra (CF), largura da fibra (LF), diâmetro do lume da fibra (DLF), espessura parede da fibra (EPF), fração parede (FP) e ângulo microfibrilar (AMF) da madeira de desbaste de <i>Tectona grandis</i> L. f., em diferentes idades	51
Tabela 10	Comparação múltipla das médias da largura de raio (LR), da altura do raio (AR), da frequência de raio (FR), do diâmetro de vaso (DV) e da frequência de vasos (FV) da madeira de desbaste de <i>Tectona grandis</i> L. f. proveniente de diferentes idades.....	54
Tabela 11	Comparação múltipla das médias do diâmetro de pontoações (μm) na madeira de desbaste de <i>Tectona grandis</i> , nas posições radiais em diferentes idades	65
Tabela 12	Comparação múltipla das médias das propriedades químicas nas madeiras de desbastes da <i>Tectona grandis</i> L. f.	68
Tabela 13	Comparação múltipla entre as médias da umidade da madeira e variáveis do ensaio, a 100 °C, para os desbastes da madeira de <i>Tectona grandis</i> L.f.....	70
Tabela 14	Parâmetros do programa de secagem no ensaio a 100 °C.....	73

Tabela 15	Valores de correlação de Pearson entre as características da madeira de desbaste de <i>Tectona grandis</i> , com as características da secagem a 100 °C.....	78
Tabela 16	Programa de secagem elaborado para madeira de desbaste de <i>Tectona grandis</i> , em diferentes idades, a partir de pequenas amostras de madeira em secagem, a 100 °C.....	80
Tabela 17	Parâmetros indicadores de taxa de secagem em programas de secagem convencional elaborados em ensaio a 100 °C	80
Tabela 18	Classificação de defeitos quanto ao número e ao percentual de tábuas com rachaduras superficiais, empenamentos do tipo arqueamento e encurvamento após a secagem em estufa convencional, para a madeira juvenil de <i>Tectona grandis</i> L.f.....	82
Tabela 19	Programa de secagem proposto para teste em árvores de desbaste de <i>Tectona grandis</i> , em diferentes idades, em estufa convencional	84

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1	<i>Tectona grandis</i> L.f.	19
2.2	Lenho juvenil.....	20
2.3	Secagem de madeira.....	22
2.3.1	Secagem convencional.....	24
2.3.2	Controle do processo.....	25
2.4	Propriedades da madeira que afetam a secagem.....	27
2.4.1	Propriedades físicas.....	27
2.4.2	Propriedades anatômicas.....	29
2.5	Defeitos de secagem.....	32
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	34
3.1	Material para estudo de laboratório.....	34
3.1.1	Preparo dos corpos de prova.....	34
3.1.2	Caracterização da madeira.....	35
3.1.2.1	Propriedades físicas.....	35
3.1.2.2	Propriedades anatômicas.....	36
3.1.2.3	Propriedades químicas.....	36
3.1.2.4	Ensaio de secagem a 100 °C.....	37
3.1.3	Análise estatística.....	41
3.2	Material para estudo de campo.....	41
3.2.1	Caracterização da madeira.....	42
3.2.1.1	Classificação dos defeitos.....	42
3.2.1.2	Diâmetro de pontoações.....	42
3.2.2	Secagem em estufa convencional.....	43
3.8	Análise estatística.....	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1	Propriedades físicas.....	45
4.2	Propriedades anatômicas.....	50
4.2.1	Pontoações intervaskulares nos ensaios de campo.....	63
4.3	Propriedades químicas.....	67
4.4	Ensaio de secagem a 100 °C.....	69
4.4.1	Perfil da secagem.....	74
4.5	Correlação entre as variáveis avaliadas.....	76
4.6	Secagem convencional.....	79
4.7	Defeitos.....	81
5	CONCLUSÕES.....	86
	REFERÊNCIAS.....	88

ANEXOS	100
---------------------	-----

1 INTRODUÇÃO

A secagem da madeira é fundamental para garantir seu uso mais adequado, melhorar suas propriedades e agregar valor a este produto. A secagem torna-se alternativa de agregar valor à madeira juvenil de *Tectona grandis* L. F., originada de desbastes de plantios comerciais, pois minimiza possíveis defeitos de instabilidade dimensional, de rachaduras e de empenamentos.

O desbaste, técnica silvicultural largamente utilizada em manejos dos plantios, consiste na retirada de árvores para otimizar o desenvolvimento das remanescentes. Seu resultado é a melhoria do processamento da madeira formada, devido ao aumento das dimensões. Na condução dos plantios de *Tectona grandis* são realizados quatro ciclos de desbaste, nos quais são retiradas árvores em diferentes intensidades, diâmetros e idades. Esse procedimento gera matéria-prima de limitada utilização, em função dos níveis de estabilidade dimensional, dos defeitos na microestrutura e da idade de formação do tecido lenhoso. A falta de conhecimentos específicos sobre as propriedades da madeira juvenil, originada de desbastes de plantios comerciais, gera a necessidade de estudo dessa matéria-prima, para permitir usos mais adequados, agregando valor.

A madeira adulta de *Tectona grandis* é internacionalmente considerada nobre e com excelentes qualidades de usos, devido às suas propriedades físicas e mecânicas, à alta durabilidade natural e à resistência a intempéries. Nos trópicos, ela é indicada para a produção sustentável de madeira de alta qualidade, devido ao seu crescimento, rendimento e qualidade. Para a indústria madeireira são relevantes verificações das características da madeira juvenil, como fontes alternativas de matéria-prima. Nesse contexto, a elaboração de programa de secagem específico para madeira juvenil torna-se uma forma de aproveitamento, com possibilidades de melhor utilização comercial.

A secagem da madeira é uma fase importante nas indústrias de processamento. Ela proporciona maior estabilidade dimensional e maior resistência à biodegradação, além de melhorar a qualidade da superfície processada e aumentar a resistência mecânica, dentre outras vantagens.

Diante da necessidade de agregar valor à madeira juvenil de *Tectona grandis* oriunda de desbastes, com baixa utilização comercial, o trabalho foi realizado com o objetivo de apresentar informações técnicas do comportamento da secagem da madeira juvenil de *Tectona grandis*, para contribuir com o setor madeireiro nacional. Assim, estabeleceram-se as metas de desenvolver um programa de secagem para essa matéria-prima, de avaliar a influência das propriedades anatômicas, físicas e química no processo de secagem e de verificar os defeitos na secagem em estufa convencional.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 *Tectona grandis* L.f.

Espécie nativa das zonas úmidas do subcontinente Índico e do Sudeste Asiático, a madeira de *Tectona grandis* (do grego *tehton* = carpinteiro e do latim *grandis* = grande, nobre) é muito apreciada pelos carpinteiros e marceneiros (DRESCHER, 2004).

A madeira de *Tectona grandis* Linn. F. é amplamente utilizada no mercado internacional, pois tem características peculiares de durabilidade, beleza, boas propriedades de processamento e excelentes propriedades físicas e mecânicas (BHAT, 2000). Esta espécie é preferida em reflorestamento nas áreas tropicais, devido ao seu excelente crescimento e rendimento (ROQUE; LEDEZMA, 2003). Por esta razão, tem sido amplamente utilizada em programas de reflorestamento, em muitos países tropicais e na América, na Oceania, na Ásia e na África (MORENO; MOYA, 2006). Bhat, Priya e Rugmini (2001), em levantamento realizado no mesmo ano, constataram que as plantações mundiais de *Tectona grandis* excediam a 5,2 milhões de hectares.

No Brasil, os plantios desta espécie iniciaram-se no final da década de 1960, realizados pela Cáceres Florestal S.A., no estado de Mato Grosso (RONDON, 2006). Atualmente, o plantio neste mesmo estado é de, aproximadamente, 60 mil hectares (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTOS DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF, 2012) e é a espécie que apresenta a maior perspectiva de retorno dos investimentos em plantios intensivos, sendo altamente valorizada pelo mercado internacional. As plantações em sítios de qualidade com condições ambientais favoráveis e com tratamentos silviculturais adequados podem gerar rendimentos de incremento médio

anual de 15 a 20 m³*hectare⁻¹*ano⁻¹. O valor da madeira no mercado internacional justifica investimentos para proporcionar melhor desenvolvimento da espécie. Assim, a madeira de *Tectona grandis* revela-se como cultura estratégica para atender ao mercado madeireiro no estado de Mato Grosso (SHIMATIZU; KLEIN; OLIVEIRA, 2007).

A madeira de *Tectona grandis* é considerada nobre, de excelente qualidade, sendo empregada em embarcações e decoração, construção naval e carpintaria em geral (GONÇALVES et al., 2009; MACEDO et al., 2005). A referida nobreza atribuída anteriormente estimula pesquisas para o conhecimento das características da madeira juvenil dessa espécie, como suposições de usos condizentes com as características excelentes apresentadas pela madeira adulta.

2.2 Lenho juvenil

Madeira juvenil é formada durante a fase inicial de desenvolvimento das árvores, próximo da medula (IIIC; NORTHWAY; PONGRACIC, 2003). Segundo Senft, Bendtsen e Galligan (1985 citados por IIIC; NORTHWAY; PONGRACIC, 2003), a madeira juvenil se diferencia tipicamente por apresentar anéis de crescimento largos, grã espiralada, baixa densidade e rigidez, paredes celulares finas e fibras curtas, menor teor de celulose e maior teor de lignina em relação à madeira adulta, alto ângulo microfibrilar, alta contração longitudinal e, geralmente, ocorrência de madeira de compressão.

A madeira juvenil se caracteriza como frágil por apresentar diferenças no comprimento de fibra, na composição química, na densidade básica e na resistência mecânica, se comparada à madeira adulta (PANSHIN; DE ZEEUW, 1980). Contrapondo-se a essa ideia, Sawno (1987) observou que a resistência da madeira permanece inalterada com a idade. Trabalhando com madeira de *Tectona grandis* com 27 anos de idade, na Nigéria, este autor

considerou que os primeiros sete anéis de crescimento são compostos por madeira juvenil e também observou que esta madeira juvenil não apresentou resistência mecânica e densidade básica inferiores às da madeira adulta.

Bhat (1995) constatou que árvores com oito anos de idade tinham madeira com densidade básica 5% menor que árvores com 51 anos, desenvolvidas na mesma região. Sawno (1990) observou que a densidade básica de madeira adulta foi significativamente maior que a da madeira juvenil, em *Tectona grandis* da Nigéria.

Bhat, Priya e Rugmim (2001) observaram características de madeira juvenil e adulta em *Tectona grandis* e relataram que a idade de maturação do ângulo microfibrilar situou-se entre 20 e 25 anos. Já para o comprimento de fibra, a idade de maturação variou de 15 a 25 anos, dependendo da região geográfica, corroborando a afirmação de que o período de formação de lenho juvenil e adulto pode variar de acordo com a espécie e as condições ambientais (BENDTSEN, 1978; RAMSAY; BRIGGS, 1986 citados por PALMA; LEONELLO; BALLARIN, 2010). Já o diâmetro de vaso estabilizou-se em torno de 20 anos, após aumento inicial durante a fase juvenil de crescimento. Em contrapartida, a proporção de vasos na madeira de *Tectona grandis* aumentou após os 20 anos, resultando em elevada proporção aos 60 anos de idade. Os mesmos autores observaram diminuição rápida da largura dos anéis de crescimento entre as idades de 25 e 30 anos, tornando-se mais lenta até os 60 anos. A espessura da parede celular, a porcentagem de raios, a densidade básica e a resistência ao esmagamento apresentaram baixos valores no sentido medula-câmbio. Já o módulo de ruptura e elasticidade apresentou determinada melhoria ou alterações não significativas, sem padrão distinto de variação no sentido medula-câmbio.

2.3 Secagem de madeira

Os problemas mais graves observados na secagem de madeira juvenil foram o empenamento na forma de arqueamento e o encurvamento em madeiras de coníferas (JOHANSSON et al., 1994; JOHANSSON; KLIGER, 2002; KLIGER, 2001 citados por IIIC; NORTHWAY; PONGRACIC, 2003). As informações sobre o comportamento da madeira juvenil de *Tectona grandis*, no processo de secagem, são relevantes nas plantações comerciais, na forma de aproveitamento e na agregação de valor.

A secagem é uma etapa importante no beneficiamento da madeira, pois lhe assegura estabilidade dimensional em aplicações estruturais e em objetos manufaturados (SEVERO, 2000).

Devido à higroscopicidade da madeira, a mesma pode ganhar ou perder umidade, de acordo com as condições ambientais a que está submetida. Portanto, secagem da madeira é um procedimento favorável para diminuir a sua instabilidade quando em uso (ACOSTA, 2008).

De acordo com Mendes (1996), durante a secagem, ocorrem alterações provocadas tanto pelo processo de secagem como pelas características da madeira. A temperatura é uma variável importante, pois está relacionada à velocidade de secagem, sendo que temperaturas mais elevadas garantem menor tempo (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

A velocidade de secagem depende da espécie, em função das características anatômicas (DURLO; MARCHIORI, 1992) que interferem na densidade básica e na permeabilidade da madeira. Madeiras mais densas requerem maior tempo de secagem, devido à maior espessura da parede celular. A maior permeabilidade da madeira contribui para acelerar o processo de secagem, principalmente na fase inicial (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

Outra variável que influencia a velocidade de secagem é a espessura da peça, sendo que a maior espessura torna a secagem mais lenta.

A umidade relativa e a temperatura são fatores que influenciam a velocidade de movimentação da água na madeira, em função do gradiente de secagem. Baixa umidade relativa promove a perda de umidade superficial da madeira, causando aumento do fluxo por capilaridade, também estimulando o fenômeno da difusão (PONCE; WATAI, 1985).

Siau (1971) considera que a direção estrutural é outro fator que influencia a velocidade de movimentação da água na madeira, ressaltando que o coeficiente de difusão é maior na direção longitudinal que na transversal. Galvão e Jankowski (1985) sumarizaram o fenômeno da difusão da seguinte forma: a água move-se por difusão através das paredes celulares, por forças originadas pelo gradiente de secagem e a rapidez ou a facilidade de secagem variam diretamente com a temperatura e a umidade e inversamente com a densidade, e com dependência da direção estrutural da madeira.

Kowalski e Pawlowski (2010) relataram que, devido às condições variáveis que ocorrem durante a secagem, a alternância de aquecimento e o umedecimento do material contribuem para a redução das tensões durante a secagem, proporcionando a conservação do material.

Em termos de taxa de aquecimento e distribuição da umidade final, há três fatores importantes que afetam a qualidade final, que são as propriedades da madeira, o tempo de secagem que deve atender aos requisitos de utilização final e as variações nas condições de secagem dentro da pilha de madeira na estufa, em que a distribuição de temperatura e a velocidade do ar sobre as faces da pilha devem ser o mais uniformes possível (PANG, 2007).

Determinar a umidade durante o processo de secagem é importante para garantir maior eficiência no controle do processo (CRUZ et al., 2009). Portanto, a determinação da umidade da madeira acima do ponto de saturação das fibras

(PSF) permite o controle do processo de secagem com maior precisão. Como já mencionado, a secagem não depende somente das variáveis do processo de secagem, mas também das propriedades da madeira, como as físicas e as anatômicas.

2.3.1 Secagem convencional

Tradicionalmente, no setor madeireiro, utilizam-se estufas convencionais para realizar a secagem artificial. Elas operam numa faixa de temperatura de 40 a 100 °C, têm sistema de renovação de ar, com velocidade do ar de 60 a 120 m*min⁻¹, e aquecimento e umidificação do ar que permitem o controle da temperatura e da umidade relativa (MARQUES; MARTINS, 2002; PONCE; WATAI, 1985).

O controle da temperatura e da umidade relativa e a combinação dessas duas características, associadas à movimentação de ar, fazem com que a secagem seja processada de forma mais rápida. Esse é o melhor método quando se pretende secar a madeira próximo ou abaixo da umidade de equilíbrio (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

A velocidade e a circulação do ar são parâmetros importantes para a retirada de umidade da madeira nos estágios iniciais e no decorrer da secagem. O ar promove a absorção da umidade liberada pela madeira e este deve circular para não comprometer o fluxo de transferência de umidade (MARTINS, 1988).

De acordo com Ciniglio (1998), temperatura de secagem elevada pode proporcionar maior gradiente de secagem, que favorece maior difusão e evaporação. Porém, é importante estabelecer o gradiente adequado a cada madeira, que influenciará a determinação do tempo de secagem, reduzindo ao máximo os danos. Gradiente de secagem elevado promove a rápida secagem

superficial da peça de madeira, gerando o “encruamento superficial” (KLITZKE, 2003).

O controle da umidade relativa é realizado pela diferença entre as temperaturas do termômetro de bulbo seco e bulbo úmido, com maior atenção ao termômetro de bulbo úmido, pois a diferença acentuada entre os mesmos pode provocar defeitos na madeira. O controle pode ser obtido por sistema de aquecimento, injeção de vapor saturado e abertura, e fechamento das entradas e ou saídas de ar (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985; MARQUES; MARTINS, 2002; PONCE; WATAI, 1985).

Com o acompanhamento da umidade inicial da madeira, da temperatura e da umidade relativa, pode-se conduzir a secagem da madeira por meio de programa de secagem convencional.

2.3.2 Controle do processo

O programa de secagem consiste num roteiro de informações ou ações que são efetuadas durante a secagem, por meio dos controles da temperatura e da umidade relativa (PONCE; WATAI, 1985). O programa de secagem pode ser elaborado experimentalmente, com o objetivo de obter a secagem rápida e com a qualidade da madeira ao final da secagem (BARBOSA et al., 2005). A indicação de programas de secagem para madeiras pouco conhecidas baseia-se na prática de tentativas e erros. Entretanto, este método é lento e nem sempre eficiente para madeira pouco tradicional (ANDRADE; JANKOWSKY; DUCATTI, 2001).

Os primeiros estudos sobre elaboração de programas de secagem surgiram para madeiras de espécies tropicais, no intuito de agrupá-las num programa de secagem mais eficiente. No entanto, as diferentes espécies apresentavam variedade durante a secagem e dificultava a sua mistura no processo secagem. Simpson e Baah (1989) descreveram um modelo matemático para agrupar as madeiras de espécies tropicais com base na densidade, na

umidade inicial e no tempo de secagem. Porém, Simpson e Sago (1991) detectaram limitações no modelo proposto, devido à necessidade da variável umidade de máxima saturação das espécies, que nem sempre era obtido. Contudo, foi possível a primeira aproximação do agrupamento de madeiras tropicais por tempo de secagem estimado somente pela densidade básica, pois ela é determinada associando a condição saturada da madeira.

Terazawa (1965 citado por BRANDÃO, 1989) relacionou a secagem de pequenos corpos de prova (2,5 x 5,0 x 10,0 cm) de madeira com valores de temperatura inicial e final e do gradiente de secagem existente em literatura. O mesmo autor utilizou como base os diferentes índices de rachaduras e colapso decorrentes da secagem a 100 °C e concluiu que a metodologia empregada era eficiente para prever o desempenho de espécies, quando submetidas à secagem convencional. Os resultados mostraram que a taxa de secagem e a rachadura de topo foram as variáveis de maior importância para a elaboração dos programas de secagem. Já Ciniglio (1998), utilizando a mesma metodologia de Brandão (1989) para a secagem de madeira de *Eucalyptus*, gerou equações matemáticas para determinar as temperaturas inicial e final e o gradiente de secagem. Esta metodologia foi testada por Andrade, Jankowsky e Ducatti (2001) e Barbosa et al. (2005), que observaram que a temperatura inicial e final e o gradiente de secagem mostraram-se coerentes e seguros, possibilitando a indicação de programa de secagem. Essa metodologia foi testada para várias espécies, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 Parâmetros indicadores para a elaboração de programas de secagem de diferentes madeiras por meio do ensaio de secagem a 100 °C

Espécies	Densidade básica (g*cm ⁻³)	Temperatura (°C)		Gradiente de secagem
		Inicial	Final	
<i>Eucalyptus grandis</i>	0,540	41,7	65,7	2,17
<i>Cordia goeldiana</i>	0,560	36,8	61,1	1,88
<i>Ocotea porosa</i>	0,550	42,2	68,3	1,95
<i>Pinus caribaea</i>	0,410	56,8	77,9	3,45
<i>Enterolobium contortisiliquum</i>	0,410	40,2	62,3	2,11

Fonte: Andrade, Jankowsky e Ducatti (2001)

Eleotério e Silva (2012), estudando várias metodologias para elaborar programa de secagem, observaram que o programa de secagem com base na metodologia de secagem a 100 °C, para três espécies de folhosas, apresentou potencial de secagem mais elevado e significativamente diferente, na faixa de 35% a 30% de umidade na primeira fase. Os mesmos autores concluíram que as temperaturas na primeira fase da secagem elaborada a partir da secagem a 100 °C são significativamente menores, variando de 33,4 a 43,9 °C e significativamente maiores na fase final, de 70 a 84,5 °C.

Na fase final do programa de secagem, duas etapas são relevantes, a equalização e o acondicionamento. Elas buscam a uniformização da umidade entre a carga de madeira como também entre as peças individualmente, conferindo melhor qualidade a madeira seca (MENDES, 1996).

2.4 Propriedades da madeira que afetam a secagem

2.4.1 Propriedades físicas

A densidade da madeira, bem como as demais propriedades, varia entre espécies, dentro da espécie e na direção medula-câmbio ou ao longo do fuste. As

variações da densidade básica são resultantes das diferentes espessuras da parede celular, das dimensões das células, das inter-relações entre esses dois fatores e da quantidade de extrativos presentes por unidade de volume (PANSHIN; DE ZEEUW, 1980).

Ilic, Northway e Pongracic (2003) consideram a densidade básica como característica importante na madeira, pois ela exerce influência sobre as fibras e nos produtos sólidos de madeira.

Andrade, Jankowsky e Ducatti (2001) afirmam que a densidade básica não deve ser usada isoladamente como parâmetro na indicação de programa de secagem e no agrupamento de espécies para secagem. Segundo Barbosa et al. (2005), a densidade básica, individualmente, não explicou a taxa de secagem e a presença de defeitos para madeiras de clones de *Eucalyptus*. Segundo estes mesmos autores, clones de mesma densidade básica ($0,540 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) foram agrupados em diferentes programas de secagem. Ciniglio (1998) agrupou duas espécies do gênero *Eucalyptus* com densidade de $0,570$ e $0,610 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, em um único programa de secagem. Para Zobel e Jett (1995), a densidade básica é o melhor preditor de qualidade da madeira.

Outra característica importante a ser observada para a secagem da madeira é a anisotropia. Na madeira, por ser higroscópica, a perda ou o ganho de umidade produzem alterações dimensionais que são desiguais em três direções estruturais (BROWN; PANSHIN; FORSAITH, 1952). Com isso, a determinação da razão entre as contrações tangencial e radial, conhecida como coeficiente de anisotropia, torna-se um índice importante para definir a probabilidade de formação de rachaduras e de empenamentos na madeira (OLIVEIRA, 1988). Na Tabela 2 encontra-se a qualidade de madeira em função do coeficiente de anisotropia. A madeira mais adequada para usos relacionados à estabilidade dimensional será aquela com menor coeficiente de anisotropia, pois caracteriza-

se por apresentar baixas alterações nas dimensões transversais absolutas (PANSHIN; DE ZEEUW, 1980).

Tabela 2 Indicação da qualidade e do uso da madeira, em função do coeficiente de anisotropia

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

Fonte: Nock, Richter e Burger (1975)

2.4.2 Propriedades anatômicas

Ceccantini (1996) afirma que a zona de estabilização dos comprimentos das fibras é marcada pela transição da madeira juvenil para a adulta, isto é, a variação das dimensões celulares tem caráter uniforme crescente, para a região de madeira juvenil e que tende a estabilizar na madeira adulta. Husen e Pal (2004) informam que o padrão de variação das dimensões das fibras em relação à idade é forte indicador de envelhecimento e de maturidade das madeiras. Cardoso et al. (2009), trabalhando com árvores de *Tectona grandis*, do Timor-Leste, observaram que o número de vasos foram semelhantes tanto para a variação radial quanto axial. Garcia et al. (2009), trabalhando com madeira plantadas em espaçamentos de 3,0 m x 1,5 m e de 3,0 m x 2,5 m, observaram maior comprimento de fibra (1.094 μm) para maior espaçamento e menor espessura da parede das fibras (4,62 μm) para o menor espaçamento e também

que comprimento das fibras e espessura da parede das fibras aumentaram significativamente no sentido medula-câmbio.

O ângulo microfibrilar nas paredes das células das fibras em madeira de folhosas é inversamente relacionado como comprimento das fibras. O ângulo microfibrilar varia entre os anéis de crescimento, sendo ângulos máximos para madeira juvenil e mínimos para a madeira adulta (PANSHIN; DE ZEEUW, 1980).

As pontoações são uma das principais vias de deslocamento de água entre células. Assim, elas têm maior importância no transporte de água em árvores vivas, bem como na secagem e no tratamento preservativo das madeiras (AHMED; CHUN, 2010).

Os raios são considerados elementos importantes no fluxo de líquidos no sentido medula-câmbio. Pontoações com pequenos diâmetros presentes na extremidade e na parede lateral são consideradas responsáveis pela menor permeabilidade na direção medula-câmbio. Vaso curto e largo, pequenas pontoações intervasculares e fibra curta tornam a *Tectona grandis* menos permeável na penetração longitudinal (AHMED; CHUN, 2010). Os tipos e as disposições das pontoações são importantes, especialmente no processo de secagem da madeira.

A permeabilidade é outra propriedade da madeira que envolve as características anatômicas e influencia o processo de secagem. Conforme Siau (1984), a magnitude do fluxo de massa de fluidos na madeira é determinada por sua permeabilidade. Porosidade é o volume de espaços vazios do sólido (porcentagem de vazios na madeira). Permeabilidade é a medida da facilidade com que fluidos são transportados através do sólido poroso, sob a influência de gradiente de pressão. Ela depende da porosidade, mas nem todo corpo poroso é permeável. Permeabilidade somente pode existir se os espaços vazios são interconectados por aberturas. Se estas membranas estiverem obstruídas ou

incrustadas, ou se as pontoações estiverem aspiradas, a madeira assume a estrutura de célula fechada e pode ter permeabilidade próxima de zero.

A permeabilidade da madeira, quando sua magnitude é baixa, é um dos principais responsáveis pelo surgimento de defeitos de secagem (CALONEGO et al., 2006). A permeabilidade, estando relacionada ao fluxo de líquidos e gases em um meio sólido, apresenta importância específica nos diferentes processos técnicos da indústria madeireira (LEHRINGER et al., 2009). Baixa permeabilidade de várias espécies de madeira causa problemas durante o tratamento químico, incluindo o tempo de secagem muito longo, grandes perdas de materiais após a secagem e caros processos de secagem (TORGOVNIKOV; VINDEN, 2009).

A penetração longitudinal de líquido é conduzida, principalmente, pelos vasos, juntamente com as fibras da madeira. Os elementos de vasos apresentam estruturas ocas e são interligados às extremidades de outros elementos de vasos, auxiliando no fluxo de líquidos na madeira. A penetração longitudinal na madeira está relacionada com diâmetro e comprimento dos elementos de vaso e com a dimensão e o número de pontoações intervasculares (AHMED; CHUN, 2010).

Ahmed, Hong e Chun (2007) observaram diferença na condução de líquidos pelos parênquimas radiais na madeira de *Prunus sargentii*. Os parênquimas radiais comumente formados por 4-5 fileiras de células, predominantemente do tipo procumbentes, têm maior permeabilidade que as células do tipo quadrada, devido à variação no comprimento da célula.

Tilos são estruturas distintas nos vasos de algumas angiospermas. Elas são excrescência de células do parênquima adjacentes que entram no lume dos vasos num formato de bolha (MURMANIS, 1975). A presença de tilos restringe o movimento de água na madeira (BOND; HAMNER, 2002) e, também, no processo de secagem da madeira serrada, compromete a saída de água, a

penetração de preservantes químicos e reduz a taxa de produção de pasta celulósica (OBST; SACHS; KUSTER, 1988).

2.5 Defeitos de secagem

Durante o processo de secagem artificial pode ocorrer o aparecimento de tensões internas na madeira, resultantes de contrações diferenciadas, ocasionando os defeitos, que podem limitar a utilização da madeira (CAVALCANTE, 1991). Essas contrações diferenciadas podem provocar uma série de defeitos, dentre os quais os mais comuns são o empenamento e as rachaduras (MENDES, 1996).

As rachaduras ocorrem, geralmente, no sentido dos raios (TSOUMIS, 1968). Madeira com raios mais largos necessitam de cuidados especiais, durante os estágios iniciais da secagem, para evitar a ocorrência de rachaduras superficiais, de topo e ou internas (MARQUES, 2008).

Outro tipo de defeito que ocorre durante a secagem é o colapso, que se caracteriza pela anormal variação dimensional da madeira. O colapso altera bruscamente a forma da célula e, conseqüentemente, a forma externa da madeira. Ele ocorre durante a retirada da água livre, isto é, em umidade acima do ponto de saturação das fibras (CAVALCANTE, 1991).

Na maioria dos casos, esses defeitos ocasionados na madeira, durante a secagem, podem ser corrigidos por alterações no programa de secagem. Porém, se a madeira apresentar características anormais, como grã espiralada, madeira de compressão e tração e nós, a possibilidade de intervenção durante o processo de secagem será limitada ou ineficiente (TSOUMIS, 1991).

Moya e Muñoz (2008) estudaram os defeitos de secagem em madeira de *Gmelina arborea* com idade de 10 anos e observaram maior incidência de

encurvamento e arqueamento após a secagem de tábuas retiradas na parte superior da árvore.

Durante a secagem de madeira de *Vockysia guatemalensis* com idade de 8 anos, foram observados torção, encurvamento, arqueamento e rachaduras internas. Porém, os defeitos de maior intensidade foram o arqueamento, com 88% e as rachaduras, com 45% (MOYA; TENÓRIO; MEYER, 2012).

De acordo com Moya e Munõz (2008) e Tenorio e Moya (2011), os defeitos provocados na secagem são comuns em espécies de rápido crescimento em áreas tropicais, como, por exemplo, nas espécies *Gmelina arborea* e *Acacia mangium*. Já Moya, Tenório e Meyer (2012) afirmam que a elevada incidência de defeitos observados na secagem de madeira de *Vockysia guatemalensis* com 8 anos de idade ocorre em função das propriedades fracas da madeira juvenil, tornando-se suscetíveis a desenvolverem defeitos durante a secagem.

Lima et al. (2011) avaliaram *Tectona grandis* com 31 anos de idade e descrevem a madeira como estável, que praticamente não empena e apresenta baixa contração durante a secagem. Já Quirós e Montero (2004) observaram que esta madeira é afetada na secagem com encurvamentos, devido à contração longitudinal, enquanto Gomez e Moya (2008) observaram que ela apresentou rachaduras e arqueaduras superiores às da madeira de *Bombacopsis quinata*.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material para estudo de laboratório

As árvores de *Tectona grandis* L.f. eram provenientes de desbastes de plantações em Cáceres, MT. Foram amostradas cinco árvores para cada idade, sendo de 6 (1º desbaste), 8 (2º desbaste) e 10 (3º desbaste) anos. Retirou-se um torete de 30 cm de comprimento de cada árvore, a 1,30 m do solo (DAP). As árvores com 6 anos foram oriundas de reprodução seminal, com diâmetro médio de 15 cm e altura comercial média de 9 m; as de 8 anos foram de reprodução clonal, com diâmetro médio de 18 cm e altura comercial média de 14 m e as de 10 anos, de reprodução seminal, com diâmetro médio de 24 cm e altura comercial média de 20 m.

3.1.1 Preparo dos corpos de prova

Os toretes foram desdobrados e do pranchão central foram retirados corpos de prova para a determinação das propriedades físicas e anatômicas, em duas posições radiais (medula-câmbio). Das tábuas adjacentes foram retirados corpos de prova para o ensaio de secagem a 100 °C, nas posições medula-câmbio (Figura 1).

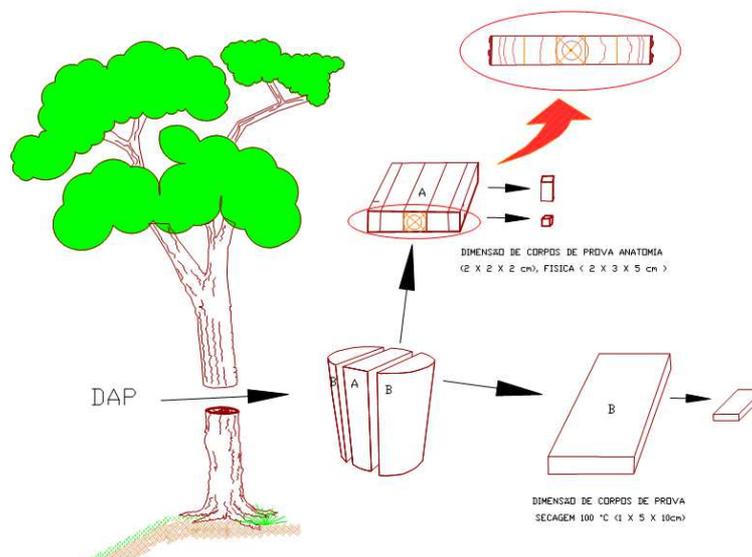


Figura 1 Esquema da amostragem e preparação dos corpos de prova para os ensaios físicos, anatômicos, químicos e secagem a 100 °C

3.1.2 Caracterização da madeira

3.1.2.1 Propriedades físicas

A umidade e a contração foram determinadas segundo a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1997), utilizando-se corpos de prova com dimensões de 2,0 cm x 3,0 cm x 5,0 cm (tangencial x radial x axial, respectivamente) para as idades de desbastes. A densidade básica foi determinada segundo a NBR 11941 (ABNT, 2003).

3.1.2.2 Propriedades anatômicas

Na análise anatômica, os corpos de prova apresentaram dimensões de 2,0 cm x 2,0 cm x 2,0 cm. Foram avaliados as características morfológicas e o ângulo microfibrilar.

Para a avaliação do comprimento de vasos e fibras, da espessura da parede da fibra, da largura do lume e da largura total da fibra, foi utilizada a metodologia descrita por Franklin (1945). A mensuração dos elementos anatômicos foi feita de acordo com International Association of Wood Anatomists - IAWA (1989).

No estudo microscópico foram preparadas lâminas histológicas, com tecidos de madeira, com espessura variando de 12 a 15 μm , nas faces tangencial, radial e transversal, cortados em micrótomo. A preparação e a coloração dos tecidos foram realizadas conforme técnica de Johnsen (1940). A descrição microscópica e a mensuração dos elementos celulares foram de acordo com IAWA (1989).

O ângulo microfibrilar (AMF) foi determinado conforme a metodologia descrita por Leney (1981). Cortes com 5 μm de espessura foram retirados dos corpos de prova, com auxílio de micrótomo e o material foi macerado (FRANKLIN, 1945). Para a mensuração do AMF foram preparadas lâminas e visualizadas em microscópio, com adaptador de polarização da luz e mesa giratória, com escala de 0 e 360°. Foram mensuradas 30 fibras para a obtenção do AMF.

3.1.2.3 Propriedades químicas

Na análise química, os corpos de prova foram reduzidos à serragem, formando-se única amostra, representando as duas regiões radiais (amostra composta). Foram determinados os teores de extrativos totais e de lignina insolúvel, segundo NBR 14853 (ABNT, 2010b) e NBR 7989 (ABNT, 2010a), respectivamente.

3.1.2.4 Ensaios de secagem a 100 °C

Os corpos de prova com dimensões de 10,0 cm x 5,0 cm x 1,0 cm (comprimento x largura x espessura, respectivamente) foram levados para estufa de laboratório sem circulação forçada de ar, com temperatura de 100 °C até a umidade de 5%, que foi determinada com base na estimativa de massa de água removida, por meio de pesagem em balança analítica (0,0001 g), assim como as demais variáveis (Tabela 3), conforme Barbosa et al. (2005) e Ciniglio (1998). O intervalo entre as pesagens foi adaptado em intervalos de 30 minutos, nas primeiras três horas de secagem e, depois, a cada duas horas, até a umidade pretendida.

As rachaduras de topo foram classificadas conforme a Tabela 4, sendo medidas em seu comprimento com paquímetro digital (0,01 mm) e em sua largura, com lâminas calibradoras (0,05 a 1,00 mm).

Tabela 3 Variáveis do ensaio de secagem a 100 °C

Variável	Descrição	Intervalo de umidade	Unidade
Ui	Umidade inicial	Verde	%
T1	Tempo de secagem	Ui a 5%	Hora
T2	Tempo de secagem	Ui a 30%	Hora
T3	Tempo de secagem	30% a 5%	Hora
V1	Velocidade de secagem	Ui a 5%	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$
V2	Velocidade de secagem	Ui a 30%	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$
V3	Velocidade de secagem	30% a 5%	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$
R1	Rachaduras de topo	Ui a 5%	Escore *
R2	Rachaduras de topo	Ui a 30%	Escore *
R3	Rachaduras de topo	30% a 5%	Escore *

Fonte: Barbosa et al. (2005). *avaliado por nota (adimensional), conforme Tabela 4

Tabela 4 Escore atribuído às rachaduras de topo

Escore	Dimensão da rachadura de topo	
	Comprimento (mm)	Largura (mm)
1	Ausente	Ausente
2	Menor que 5,0	Menor que 0,5
3	Maior que 5,0	Menor que 0,5
4	Menor que 5,0	$0,5 < \text{Largura} < 1,0$
5	Maior que 5,0	$0,5 < \text{Largura} < 1,0$
6	Maior que 5,0	Maior que 1,0

Fonte: Adaptado de Ciniglio (1998)

Após a secagem drástica, os corpos de prova foram levados para a estufa com circulação forçada de ar e com temperatura de (103 ± 2) °C, conforme a NBR 7190 (ABNT, 1997), até atingir massa constante. A determinação da umidade e velocidade de secagem entre a massa do corpo de prova na umidade inicial (m_{ui}) até a massa do corpo de prova com 5% de umidade (m_5), entre a massa do corpo de prova na umidade inicial (m_{ui}) até a massa do corpo de prova

com 30% de umidade (m_{30}) e entre a massa do corpo de prova com 30% de umidade (m_{30}) e até massa do corpo de prova com 5% de umidade (m_5), utilizaram-se as Equações 4, 5 e 6, respectivamente.

$$V_1 = \frac{m_{ui} - m_5}{T_1 * 100}$$

(4)

$$V_2 = \frac{m_{ui} - m_{30}}{T_2 * 100}$$

(5)

$$V_3 = \frac{m_{30} - m_5}{T_3 * 100}$$

(6)

em que

- V_1 = velocidade de secagem da umidade inicial até 5% ($g \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$);
- V_2 = velocidade de secagem da umidade inicial até 30% ($g \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$);
- V_3 = velocidade de secagem da umidade inicial de 30 a 5% ($g \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$);
- m_{ui} = massa do corpo de prova na umidade inicial (g);
- m_5 = massa do corpo de prova com 5% de umidade (g);
- m_{30} = massa do corpo de prova com 30% de umidade (g);
- T_1 = tempo de secagem da umidade inicial até 5% (h);
- T_2 = tempo de secagem da umidade inicial até 30% (h);
- T_3 = tempo de secagem da umidade de 30 até 5% (h);
- 100 = área superficial do corpo de prova (cm^2).

Para avaliação de colapso na secagem a 100 °C, o topo do corpo de prova foi fotografado com auxílio de câmera digital com 12 megapixels e mesa estativa fotográfica, antes e após a secagem (Figura 2).

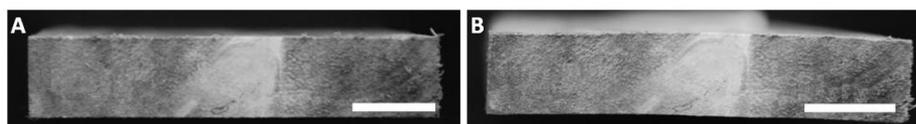


Figura 2 Corpos de prova fotografados para a determinação de presença de colapso. A= imagem antes da secagem, no estado úmido e B= imagem após a secagem, a 100 °C, no estado seco. Barra = 1 cm

As imagens, antes e após a secagem, foram importadas para o programa AutoCAD® e foram determinadas as diferenças entre elas. A intensidade do colapso foi atribuída conforme escores descritos na Tabela 5.

Tabela 5 Classificação de colapso devido à variação da superfície (Δs), antes e após a secagem a 100 °C

Escore	Classificação de colapso
1	Ausente
2	$\Delta s < 0,25$
3	$0,25 < \Delta s < 0,50$
4	$0,50 < \Delta s < 1,00$
5	$\Delta s > 1,00$

Fonte: Adaptado de Barbosa et al. (2005) e Ciniglio (1998). Δs = Variação na área dos corpos de prova, antes e após a secagem (mm²).

As variáveis do programa de secagem listadas na Tabela 3 foram calculadas com base nos valores médios dos corpos de prova ensaiados, que foram aplicados nos modelos matemáticos (Tabela 6) para definir os parâmetros de secagem de temperatura inicial (TI), temperatura final (TF) e gradiente de secagem (GS).

Tabela 6 Modelos matemáticos para a determinação dos programas de secagem

Parâmetro	Modelo matemático
Temperatura inicial	$27,9049 + 0,7881*T_2 + 419,0254*V_1 + 1,9483*R_1$
Temperatura final	$49,2292 + 1,1834*T_2 + 273,8685*V_2 + 1,0754*R_1$
Gradiente de secagem	$1,4586 - 30,4418*V_3 + 42,9653*V_1 + 0,1424*R_3$

Fonte: adaptado de Ciniglio (1998). T_2 = tempo de secagem da umidade inicial até 30% (h); velocidade de secagem da umidade inicial até 5% ($g*cm^{-2}*h^{-1}$); R_1 = escore definido para a rachadura de topo após a secagem até 5% de umidade (adimensional); V_2 = velocidade de secagem da umidade inicial até 30% ($g*cm^{-2}*h^{-1}$); V_3 = velocidade de secagem da umidade inicial de 30% a 5% ($g*cm^{-2}*h^{-1}$); R_3 = escore definido para rachadura de topo após a secagem de 30% até 5% de umidade (adimensional)

3.1.3 Análise estatística

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado em arranjo fatorial. Os fatores analisados foram idades de desbaste (seis, oito e dez anos) e posição radial (medula e câmbio). Os dados foram analisados por estatística descritiva, pela análise de variância (ANOVA) do delineamento estatístico adotado. Foi avaliada a correlação linear simples entre os parâmetros anatômicos e físicos e as variáveis da secagem a 100 °C, para as diferentes idades de desbaste.

3.2 Material para estudo de campo

As árvores de *Tectona grandis* eram provenientes de desbastes de plantações no município de Alta Floresta, MT. Foram utilizadas quinze árvores com DAP médios de 22 cm, 24 cm e 26 cm e alturas comerciais médias de 7,5 m, 8,7 m e 9,0 m, respectivamente nas idades de 9,11 e 13 anos.

Foram utilizadas toras com 2,30 m de comprimento e de cada tora, após a retirada da costaneira, foi retirada apenas a primeira tábua. A partir dessas

tábuas foram realizados corte para a padronização do comprimento e da espessura de 2.300 mm e 35 mm, respectivamente. Devido à variação dos diâmetros das toras, as larguras foram agrupadas em três classes, de 35, 55 e 65 mm.

3.2.1 Caracterização da madeira

3.2.1.1 Classificação dos defeitos

A madeira foi previamente avaliada quanto aos defeitos de nós (Tabela 7) e as rachaduras de topo e superfície e empenamentos, conforme INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL - IBDF, (1983).

Tabela 7 Classificação da quantidade e percentual de sarrafos com nós em madeira juvenil de *Tectona grandis* L.f.

Nós	Quantidade de sarrafos	Percentual
Ausente	-	-
Pequeno ¹	15	7,2
Médio ²	40	19,3
Grande ³	152	73,4

* = 1- nós de até 2 cm de diâmetro; 2- nós de 2 a 5 cm de diâmetro; 3- nós com diâmetro acima de 5 cm.

3.2.1.2 Diâmetro de pontoações

Para a determinação do diâmetro das pontoações, foram retirados discos de madeira na posição do DAP em três árvores nas idades de 9, 11 e 13 anos, nas posições radiais (externa, intermediária e interna). Os corpos de prova com dimensões de 1 cm³ foram acertados em micrótomo no plano tangencial, secos

em estufas a 70 °C e preparados com banho de metal para observação em microscópio eletrônico de varredura (Figura 3). Foram mensuradas 10 pontoações em cada posição radial.

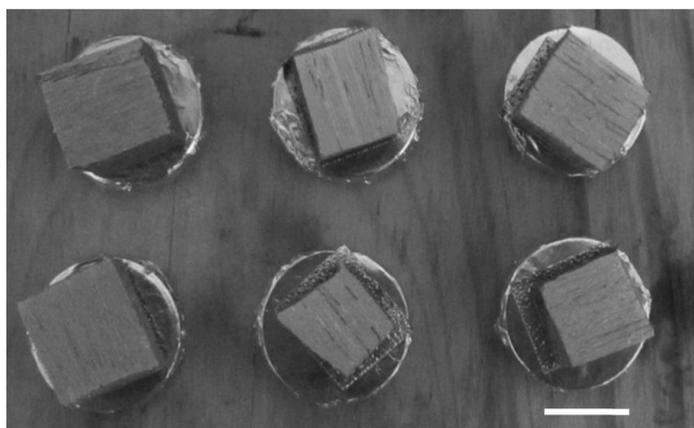


Figura 3 Corpos de prova preparados para observação e mensuração de diâmetro de pontoações intervasculares. Barra = 1 cm

3.2.2 Secagem em estufa convencional

A secagem foi realizada em estufa convencional industrial, utilizando-se o programa de secagem desenvolvido conforme ensaio a 100 °C. Foram utilizados 287 sarrafos de madeira, conforme a amostragem do item 3.2. Na determinação da umidade inicial e no controle de umidade no processo de secagem, foram selecionados, aleatoriamente, 30 sarrafos de madeira e retiradas as amostras determinadoras e controladoras de umidade (Figura 4).

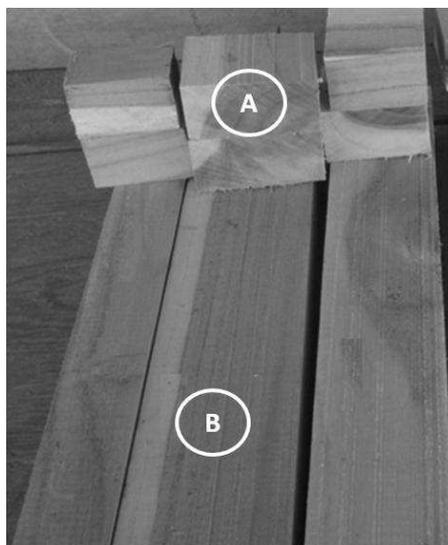


Figura 4 Amostras determinadoras de umidade (A) e amostras controladoras de umidade (B), para o processo de secagem convencional

As amostras determinadoras de umidade foram levadas para estufa de laboratório, à temperatura de (103 ± 2) °C, até atingir massa constante. As amostras controladoras tiveram as extremidades impermeabilizadas para evitar a perda excessiva de umidade e logo foram inseridas na pilha de madeira. Pesagem periódica em balança semianalítica foi realizada para determinar a massa de água removida durante a secagem. Também foi utilizado o medidor elétrico em 10 sarrafos de madeira para a determinação da umidade.

3.8 Análise estatística

O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado. Os dados foram analisados por estatística descritiva, pela análise de variância (ANOVA) e comparados pelo teste de média de Tukey, a 95% de probabilidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Propriedades físicas

A densidade básica da madeira variou de 0,448 a 0,489 g*cm⁻³, com a idade das árvores, embora de forma não significativa (Tabela 8). Floréz (2012) avaliou árvores de *Tectona grandis* plantadas no estado de Minas Gerais, com idade de 13 anos, e observou densidade básica média de 0,527 g*cm⁻³ e valores máximos e mínimos de 0,574 e 0,499 g*cm⁻³, respectivamente. De acordo com Moya et al. (2009), para madeira de *Tectona grandis*, em diferentes sítios e climas, a densidade básica aumenta com a idade, do primeiro ao décimo ano, podendo haver diminuição a partir daí.

Observou-se efeito significativo de posição radial para a densidade básica da madeira, entretanto, o efeito de idade de desbastes não foi significativo (Tabela 1A –Anexo).

Tabela 8 Comparação múltipla das médias da densidade básica (DB), das contrações radial (β_{rd}), tangencial (β_{tg}) e volumétrica (β_{vol}) e do coeficiente de anisotropia (θ) da madeira de desbaste de *Tectona grandis* L. f. de diferentes idades

	DB ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	β_{rd} (%)	β_{tg} (%)	β_{vol} (%)	θ
6 anos (1º desbaste)					
Média	0,448 ^a	2,41 ^a	4,87 ^a	7,73 ^b	2,14 ^a
Mínimo	0,401	1,60	3,97	6,37	1,33
Máximo	0,532	3,39	6,06	9,31	2,87
C.V. (%)	8,6	22,3	13,8	12,6	22,7
8 anos (2º desbaste)					
Média	0,471 ^a	3,48 ^b	5,75 ^a	5,84 ^a	1,82 ^a
Mínimo	0,421	2,40	5,06	4,99	1,13
Máximo	0,517	4,72	6,59	7,06	2,40
C.V. (%)	7,9	26,2	9,5	10,5	24,8
10 anos (3º desbaste)					
Média	0,489 ^a	2,93 ^a	5,34 ^a	6,46 ^a	1,90 ^a
Mínimo	0,402	1,88	3,69	3,42	1,40
Máximo	0,573	3,45	8,56	9,80	2,67
C.V. (%)	10,4	19,0	27,4	26,8	19,9

Médias nas colunas, seguidas por mesma letra, não diferem estatisticamente entre si. Teste de Tukey, a 95% de probabilidade

Outros resultados similares foram encontrados para *Tectona grandis* na literatura, em outras regiões e condições de crescimento. Por exemplo, Roque (2002) estudou a influência da idade cambial sobre a densidade básica da madeira de árvores aos 5, 7 e 9 anos e encontrou valores variando de 0,464 a 0,611 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Moreno e Moya (2006) encontraram densidade básica 0,500 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, para árvores plantadas na Bolívia, com 8 anos de idade. Lima et al. (2011) observaram densidade básica variando de 0,530 a 0,560 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, para plantios com 31 anos, no estado de São Paulo. Assim, esses resultados parecem

indicar que a madeira de *Tectona grandis* proveniente de desbaste apresenta variabilidade para a densidade básica similar aos plantios adultos, com padrão de aumentar a densidade básica no sentido medula-câmbio (Figura 5).

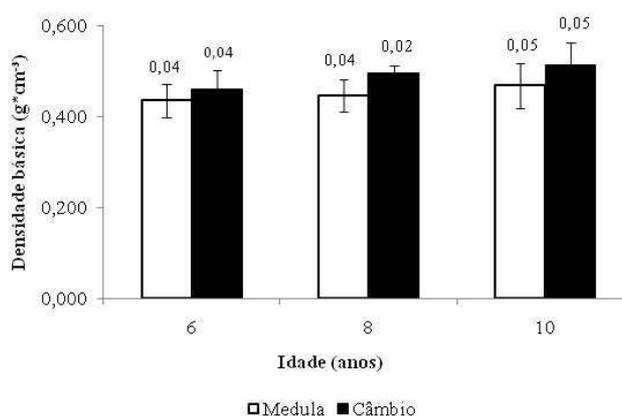


Figura 5 Valores médios da densidade básica da madeira de desbaste de *Tectona grandis*, no sentido radial, em diferentes idades, com desvio padrão

A densidade é uma propriedade importante para destacar as propriedades tecnológicas da madeira e, neste estudo, as densidades básicas entre as idades de desbastes mostraram-se similares e dentro dos padrões de variação para madeira juvenil, indicando que as três idades de desbastes mostraram produção de matéria-prima com qualidade semelhante para exploração comercial.

Em termos de estabilidade dimensional, os resultados observados a partir das árvores oriundas de desbaste foram similares aos observados em madeira juvenil de *Tectona grandis* de outras localidades. Moreno e Roque (2006) encontraram valores médios de contração radial e tangencial de 2,6% e 5,3%, respectivamente, para a madeira de árvores com oito anos de idade, na Bolívia. Roque e Ledezma (2003), em seus estudos, obtiveram

contrações transversais de 2,5% radial e 5,4% tangencial e contração volumétrica de 6,9%, para a madeira de plantios com 10 anos de idade. Os valores de contração observados para *Tectona grandis* foram menores que os descritos para outras espécies de importância comercial. Por exemplo, Gonçalves et al. (2009) avaliaram o híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* e observaram contração radial variando de 5,5% a 7,9%, contração tangencial de 10,26% a 12,11% e contração volumétrica de 15,24% a 21,76%.

Para a estabilidade dimensional, observou-se efeito significativo da idade (desbastes) e da posição radial para a contração radial (β_{rd}), efeito significativo de idade para a contração volumétrica (β_{vol}), mas não houve efeito significativo de idade e da posição radial para a contração tangencial (β_{tg}) e o coeficiente de anisotropia (θ), conforme Tabela 1A, no Anexo.

Neste estudo, as árvores com 6 anos de idade apresentaram a maior contração volumétrica (Figura 6) e as árvores com 8 anos de idade foram as que apresentaram os maiores valores de contração radial (Figura 7). Panshin e De Zeeuw (1970) afirmaram que as contrações da madeira aumentam com aumentos dos valores de densidade básica, porém, esse efeito pode ser influenciado pela presença de extrativos na madeira.

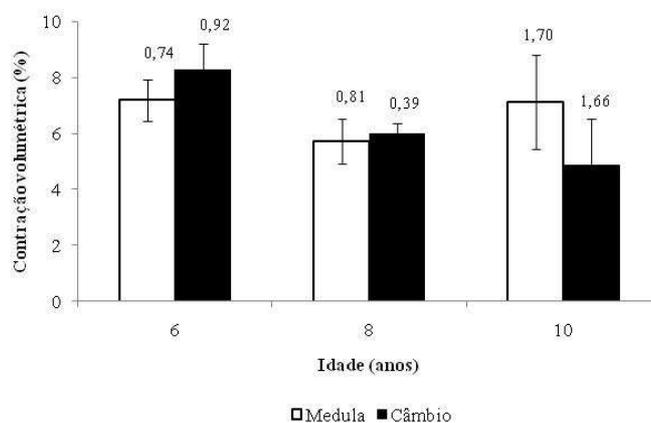


Figura 6 Valores médios da contração volumétrica da madeira de desbaste de *Tectona grandis*, no sentido radial, nas diferentes idades, com o desvio padrão

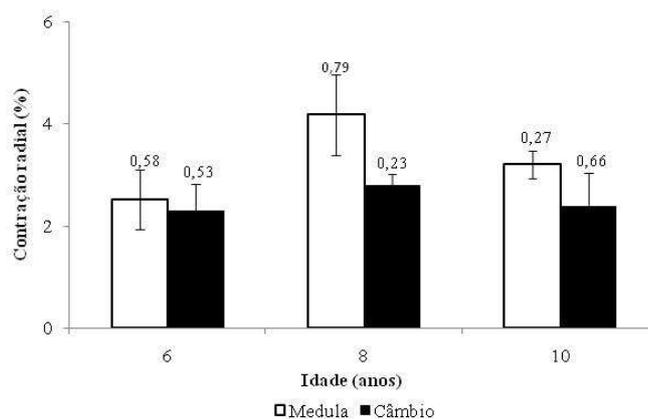


Figura 7 Valores médios da contração radial da madeira de desbaste de *Tectona grandis*, no sentido radial, em diferentes idades, com desvio padrão

Na Figura 6, pode-se observar que, nas árvores de 6 e 8 anos de idade, a contração volumétrica da madeira na posição do câmbio foi superior à posição da medula. Contudo, observa-se também maior homogeneidade para a idade de desbaste de 8 anos. Já as árvores de 10 anos apresentaram a contração volumétrica maior na posição próxima a medula.

Na Figura 7 observa-se que as madeiras oriundas dos desbastes aos 8 anos apresentaram maior contração radial e maior variação entre as posições radiais amostradas. As madeiras de desbastes com 10 e 6 anos não apresentaram efeitos significativos. Também se observa que as maiores contrações radiais ocorrem na posição da medula.

As árvores oriundas de desbaste apresentaram coeficiente de anisotropia inferior aos encontrados por Gutierrez et al. (2008), de 2,63 e 2,96, para *Tectona grandis* plantadas em duas regiões do Equador. Floréz (2012) observou coeficiente de anisotropia médio de 1,82, para madeira de árvores com 13 anos de idade, plantadas no Brasil, valor mais semelhante aos observados neste estudo.

Os resultados obtidos para o coeficiente de anisotropia das madeiras de desbastes de 6, 8 e 10 anos classificam a *Tectona grandis* como madeira normal (Tabela 1), podendo ser utilizadas para diversos fins, com a ressalva de ocorrer pequenos empenhamentos durante a secagem. Contudo, de maneira geral, as contrações observadas foram maiores nas árvores mais jovens e com menores diâmetros, tornando esse material susceptível aos defeitos de secagem.

4.2 Propriedades anatômicas

Observou-se o maior valor médio do comprimento de fibras (827,24 μm) para as árvores com idade de 10 anos, seguidas pelas árvores com idade de 6 anos (791,45 μm). O menor valor em comprimento de fibras foi observado para as árvores com 8 anos de idade (733,20 μm). Nessa característica, as árvores de desbastes de *Tectona grandis*, nas idades de 6 e 10 anos, mostraram-se com tendência de aumentar no sentido medula-câmbio. Já as árvores com idade de 8 anos mostraram-se mais estáveis no comprimento das fibras nas posições medula-câmbio. Quanto à largura das fibras e ao diâmetro do

lume, não houve efeito significativo entre as idades de 6 e 10 anos. A madeira de 8 anos de idade apresentou menor valor de largura de fibra e diâmetro de lume (Tabela 9).

Tabela 9 Comparação múltipla de média para comprimento da fibra (CF), largura da fibra (LF), diâmetro do lume da fibra (DLF), espessura parede da fibra (EPF), fração parede (FP) e ângulo microfibrilar (AMF) da madeira de desbaste de *Tectona grandis* L. f., em diferentes idades

Idade de desbaste	Características anatômicas					
	CF (μm)	LF (μm)	DLF (μm)	EPF (μm)	FR (%)	AMF ($^{\circ}$)
6 anos	791,45 ^b	23,09 ^b	14,71 ^b	4,14 ^a	36,06 ^a	9,80 ^a
8 anos	733,20 ^a	20,52 ^a	13,01 ^a	3,76 ^a	36,69 ^a	9,22 ^b
10 anos	827,24 ^b	22,82 ^b	14,82 ^b	4,0 ^a	35,09 ^a	9,20 ^b

Médias seguidas por mesma letra, nas colunas, não diferem estatisticamente entre si, pelo Teste Tukey, a 95% de probabilidade

Observou-se efeito significativo de comprimento e largura da fibra, diâmetro do lume da fibra (Tabela 2A do anexo) entre as idades de desbastes. Quanto à posição radial, não houve efeito significativo para as características relacionadas à biometria das fibras. A variação nas propriedades anatômicas da madeira no sentido medula-câmbio foi observada por diversos autores, para diferentes madeiras (CARDOSO et al., 2009; GARCIA et al., 2009; LIMA et al., 2011; SILVA et al., 2005, 2007; TOMAZELLO FILHO, 1985). Estes autores concluíram que os elementos anatômicos da madeira apresentam tendência crescente no sentido medula-câmbio, principalmente para a anatomia quantitativa. Contudo, não foi observada essa tendência de aumentar os

elementos anatômicos no sentido medula-câmbio para o comprimento de fibras na idade de desbaste de 8 anos (Figura 8). Observa-se que os valores médios de comprimento de fibra, nessa idade, mantiveram-se mais uniforme nas posições medula-câmbio.

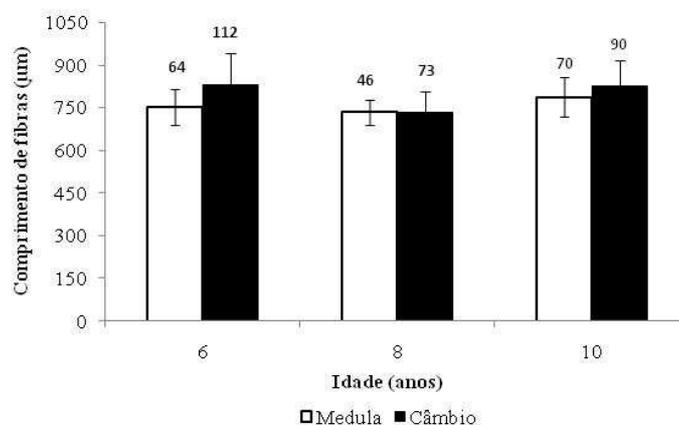


Figura 8 Valores médios do comprimento de fibras da madeira de desbaste de *Tectona grandis*, no sentido radial, em diferentes idades, com desvio padrão

Para as características de espessura da parede da fibra, a fração parede da fibra não teve efeito significativo entre as idades de desbastes e posição radial, indicando que não houve variação nessas características em relação à idade (Tabela 9). Em relação ao ângulo microfibrilar, as árvores de desbastes na idade de 6 anos foram as que apresentaram o maior valor médio do ângulo microfibrilar ($9,8^\circ$). Segundo Donaldson (2008), maiores ângulos microfibrilares são observados em madeira mais jovens. Já segundo Preston (1974 citado por RIBEIRO; MORI; MENDES, 2011), o ângulo microfibrilar tende a diminuir com o aumento no comprimento da fibra, devido à baixa divisão cambial, a qual leva a um maior tempo de expansão celular. Para essa variável houve diferença

significativa, a 5% de significância, entre as idades de desbaste e a posição radial (Tabela 2A do anexo).

Observa-se que as árvores na idade de desbaste de 8 anos apresentaram diminuição nas dimensões das fibras (Figura 8) e também no ângulo microfibrilar (Figura 9). Silva (1992), estudando espécies da Amazônia, encontrou correlação significativa entre as características de ângulo microfibrilar e comprimento de fibra, para as espécies *Andira parviflora* ($R = 0,97$) e *Saccoglottis guianensis* ($R = 0,94$) e ângulo microfibrilar de $15,3^\circ$ e 16° , respectivamente.

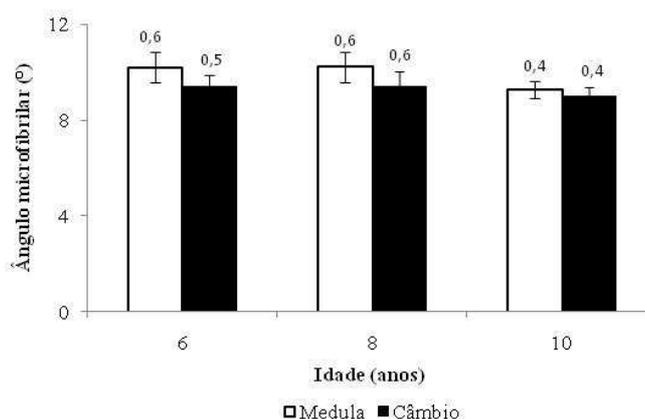


Figura 9 Valores médios do ângulo microfibrilar da madeira de desbaste de *Tectona grandis*, no sentido radial, em diferentes idades, com desvio padrão

Conforme se observa na Tabela 10, os valores máximo ($126 \mu\text{m}$) e mínimo ($70 \mu\text{m}$) para a largura do raio entre as idades dos desbastes foram encontrados nas idades de desbaste de 10 e 8 anos, respectivamente. Quanto à altura do raio, a idade de desbaste de 8 anos apresentou, em média, o menor valor ($313 \mu\text{m}$), diferindo estatisticamente das idades de desbaste de 6 e 10 anos. Estas apresentaram valores máximos de 1.150 e $1.118 \mu\text{m}$, respectivamente, não havendo diferença significativa entre si. Na frequência de raios foram

observados maior valor nas árvores de 6 anos ($13 \text{ raios} \cdot \text{mm}^{-1}$) e menor valor ($2 \text{ raios} \cdot \text{mm}^{-1}$) igualmente nas três idades de desbaste avaliadas. Para o diâmetro do elemento de vaso, os valores máximo e mínimo foram de 267 e 41 μm , para as árvores de 6 anos. O valor máximo observado para a frequência de vasos ($35 \text{ vasos} \cdot \text{mm}^{-2}$) foi na idade de 8 anos e a mínima ($2 \text{ vasos} \cdot \text{mm}^{-2}$), para as idades de 6 e 8 anos.

Tabela 10 Comparação múltipla das médias da largura de raio (LR), da altura do raio (AR), da frequência de raio (FR), do diâmetro de vaso (DV) e da frequência de vasos (FV) da madeira de desbaste de *Tectona grandis* L. f. proveniente de diferentes idades

	LR (μm)	AR (μm)	FR ($\text{n} \cdot \text{mm}^{-1}$)	DV (μm)	FV ($\text{n} \cdot \text{mm}^{-2}$)
6 anos (1º desbaste)					
Média	43,0 ^b	378,0 ^a	5,3 ^b	130,0 ^a	7,3 ^c
Mínimo	20,0	152,0	2,0	41,0	2,0
Máximo	81,3	1150,0	13,0	267,2	24,0
C.V. (%)	30	45	36	32	39
8 anos (2º desbaste)					
Média	35,0 ^c	313,0 ^b	5,7 ^a	122,5 ^b	10,5 ^a
Mínimo	37,5	134,0	2,0	44,0	4
Máximo	70,0	741,0	12,0	234,3	35
C.V. (%)	31	40	30	27	45
10 anos (3º desbaste)					
Média	65,5 ^a	399,4 ^a	5,0 ^c	108,0 ^c	9,0 ^b
Mínimo	29,4	150,0	2,0	41,0	2,0
Máximo	126,0	1118,0	8,0	221,2	34,0
C.V. (%)	30	41	23	31	51

Médias nas colunas seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, a 95% de probabilidade

As características avaliadas, largura e altura de raios, frequência de raios, diâmetro de vasos e frequência de vasos, foram todas significativas

(Tabela 3A, do Anexo). Na posição radial, as características altura do raio e diâmetro de vaso não houve efeito significativo. Quanto à interação (idade x posição radial), somente para a largura do raio este efeito não foi significativo. Lima et al. (2011) observaram diferença significativa para altura do raio e diâmetro de vaso na madeira de *Tectona grandis* com 31 anos de idade.

A fotomicrografia da seção longitudinal tangencial (Figura 10) apresenta as características do raio, quanto à altura e à largura. Observa-se que as árvores de desbaste na idade de 10 anos (Figura 11) apresentaram maior valor médio da largura de raio (65 μm) entre as idades de desbastes e na posição radial (67 μm) na posição do câmbio, seguida pela idade de desbaste de 6 anos, com valor médio da largura do raio (43 μm), e o maior valor observado na posição radial foi de 47 μm também na posição do câmbio. As árvores na idade de desbaste de 8 anos foram as que apresentaram menores valores médios da altura do raio (35 μm) e na posição radial (39 μm). Observou-se que essa característica apresentou tendência de aumentar no sentido medula-câmbio.

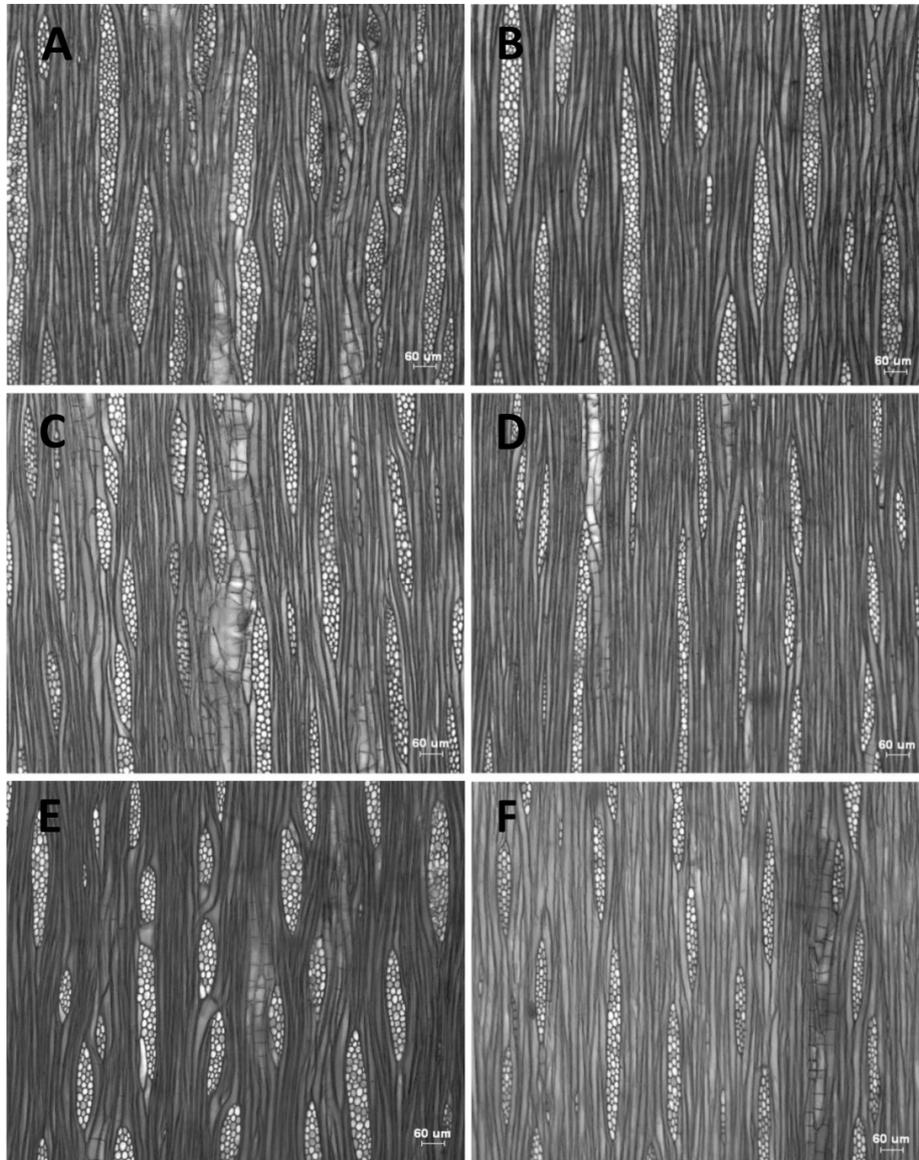


Figura 10 Fotomicrografias do lenho de *Tectona grandis* L. f. nas seções longitudinais tangenciais nas posições medula-câmbio nas três idades de desbastes. A (medula) e B (câmbio) na idade de desbaste de 6 anos; C (medula) e D (câmbio) na idade de desbaste de 8 anos e E (medula) e F (câmbio) na idade de desbaste de 10 anos. Barra = 60 µm

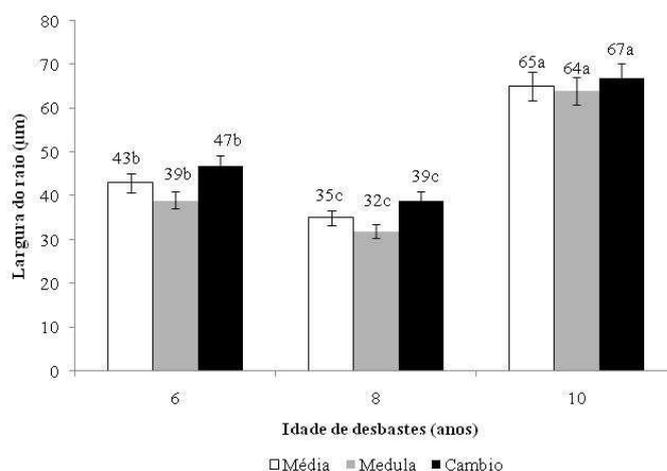


Figura 11 Variação e comparação múltipla dos valores médios da largura do raio da madeira de desbaste de *Tectona grandis*, no sentido radial, nas diferentes idades. Obs.: os valores nas barras iguais, seguidos da mesma letra, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 95% de probabilidade

Estatisticamente, a largura (Figura 11) e a altura (Figura 12) dos raios foram significativamente maiores na idade de 10 anos. Quanto aos valores médios da altura do raio na posição radial, observa-se que as árvores de desbastes, na idade de 10 anos, mantiveram o mesmo padrão de variação, sentido medula-câmbio, com 419 μm na posição do câmbio. Já as árvores nas idades de 6 e 8 anos apresentaram tendência inversa. Na idade de 6 anos, os valores médios nas posições radiais foram de 400 μm (medula) e 356 μm (câmbio). As árvores de 8 anos foram as que apresentaram menores valores médios na posição radial e na média geral, 319 μm (medula) e 307 μm (câmbio). As células de raios são importantes no processo de secagem, devido à ocorrência de rachaduras (MARQUES, 2008).

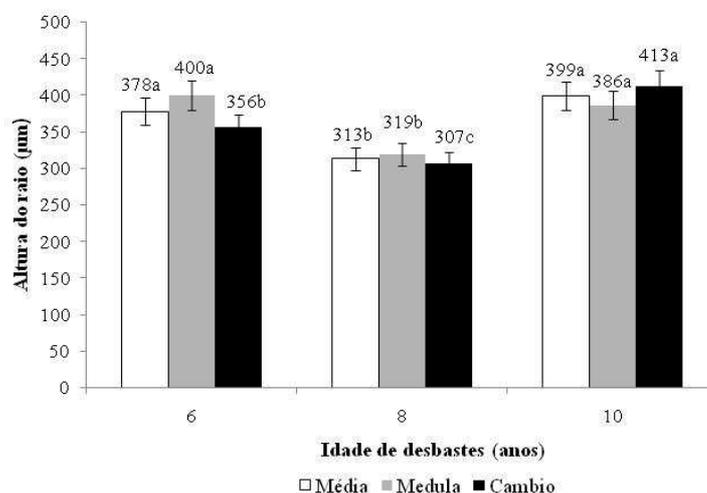


Figura 12 Variação e comparação múltipla dos valores médios da altura do raio da madeira de desbaste de *Tectona grandis*, no sentido radial, em diferentes idades. Obs.: os valores nas barras iguais, seguidos da mesma letra, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 95% de probabilidade

Observa-se, pelos dados da Tabela 13, que as árvores de desbaste de 8 anos de idade apresentaram os maiores valores médios da frequência dos raios, $5,7 \text{ n}^\circ \cdot \text{mm}^{-1}$ e variação radial com tendência de aumentar no sentido do câmbio ($5,1 \text{ n}^\circ \cdot \text{mm}^{-1}$) para a medula ($6,3 \text{ n}^\circ \cdot \text{mm}^{-1}$). Em estudo desenvolvido com madeira de *Tectona grandis* com 13 anos idade, na Costa Rica, observaram-se variação de 15 a 34 raios por milímetro e diminuição rápida da frequência de raio, do primeiro até o quinto ano, posteriormente se mantendo relativamente constante com o aumento na idade da árvore (MOYA et al., 2009). Já neste estudo, observou-se que as idades de 6 e 8 anos apresentaram maiores frequência de raios em relação à madeira de 10 anos. Lima et al. (2011) observaram maior frequência de raios na posição da medula ($4,62 \text{ raio} \cdot \text{mm}^{-1}$), em estudos com plantios com 31 anos de idade. Essa tendência de maior frequência de raios na posição da medula foi observada neste estudo para as

árvores com idades de 6 e 8 anos de idade, diferente das com idade de 10 anos, que apresentaram maior frequência de raios na posição do câmbio ($5,0 \text{ n}^\circ \cdot \text{mm}^{-1}$).

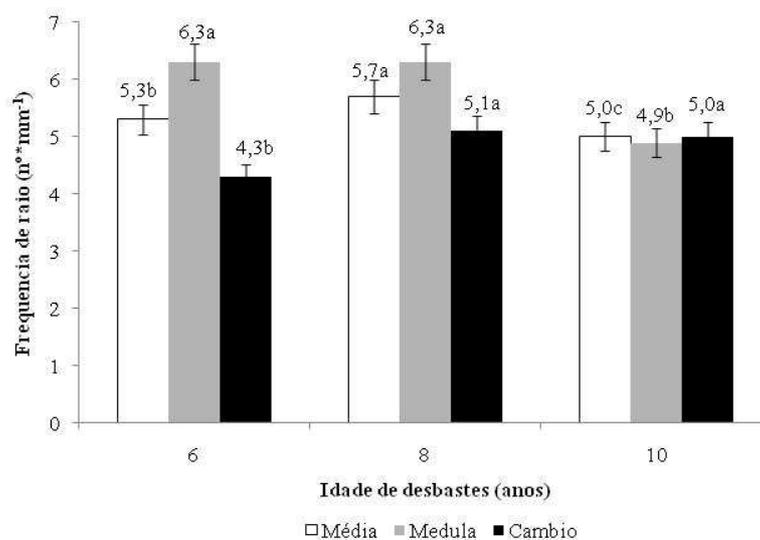


Figura 13 Variação e comparação múltipla dos valores médios da frequência de raio da madeira de desbaste de *Tectona grandis*, no sentido radial, em diferentes idades. Obs.: os valores nas barras iguais seguidos da mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 95% de probabilidade

Em relação ao diâmetro de vaso, o maior diâmetro em valores médios foi observado para a madeira de *Tectona grandis* com 6 anos de idade, na posição da medula (Figura 14). Moya et al. (2009) observaram diâmetro de vaso variando de 100 a 195 μm em plantios na Costa Rica. Govaere, Carpio e Cruz (2009) observaram variações de 190 a 300 μm nos diâmetros de vasos desta espécie e, segundo Bhat, Priya e Rugmini (1998), a estabilização do diâmetro do vaso na madeira ocorre em torno de 20 anos. As características dos vasos são influenciadas pelo tipo de clima e a qualidade dos sítios e das plantações (MOYA et al., 2009). As variações nas dimensões das células

também são influenciadas pela idade da árvore (PANSHIN; DE ZEEUW, 1970; TSOUMIS, 1991).

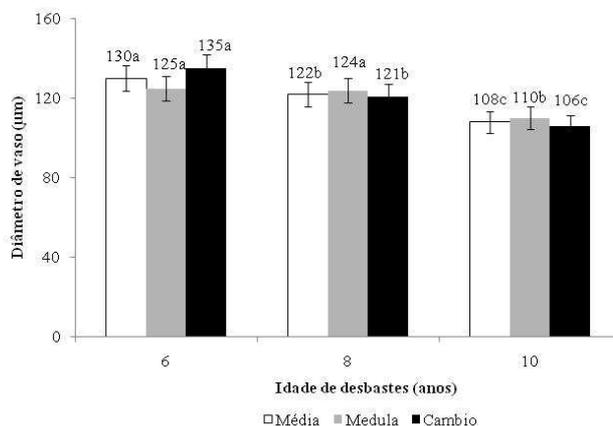


Figura 14 Variação e comparação múltipla dos valores médios do diâmetro de vasos da madeira de desbaste de *Tectona grandis*, no sentido radial, em diferentes idades. Obs.: os valores nas barras iguais seguidos da mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 95% de probabilidade

De acordo com Panshin e De Zeeuw (1980) e Tsoumis (1991), os diâmetros dos elementos de vasos aumentam no sentido medula-câmbio, enquanto a frequência reduz ao longo do desenvolvimento da árvore, tendendo à estabilização das dimensões dos elementos celulares na madeira adulta. Entretanto, essa tendência não foi observada em todas as características anatômicas avaliadas para a madeira de *Tectona grandis* aos 6, 8 e 10 anos de idade. A frequência de vaso que apresentou o aumento no sentido câmbio-medula nas três idades estudadas (Figura 15). A maior frequência de vasos foi observada na posição da medula ($12,3 \text{ n}^{\circ} \cdot \text{mm}^{-2}$), nas árvores de desbastes de 8 anos de idade.

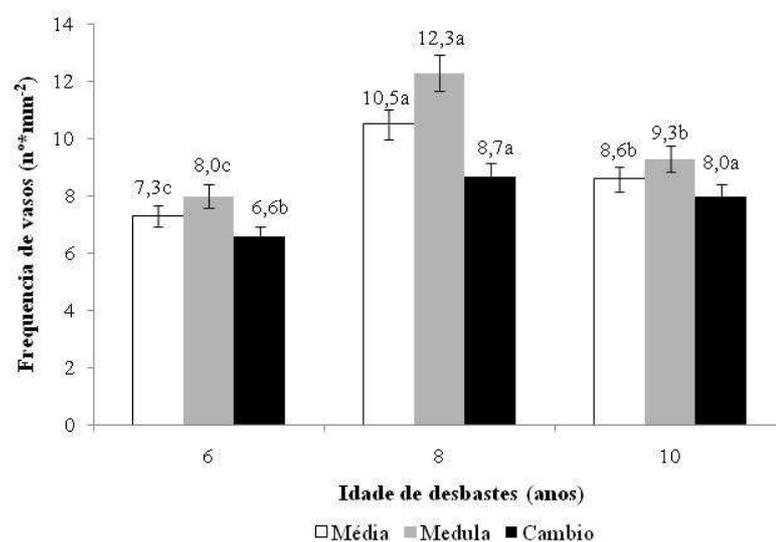


Figura 15 Variação e comparação múltipla dos valores médios de frequência de vasos da madeira de *Tectona grandis*, no sentido radial, nas diferentes idades de desbaste. Obs.: os valores nas barras iguais, seguidos da mesma letra, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 95% de probabilidade

O diâmetro e a frequência de vasos estão relacionados à porosidade e à permeabilidade da madeira. A permeabilidade é uma propriedade com grande importância para a madeira, pois influencia a remoção de água livre durante a secagem (DINWOODIE, 1981). A maior frequência de vaso foi observada para a madeira com 8 anos na posição da medula

A fotomicrografia das seções transversais da madeira de *Tectona grandis* nas posições radiais (Figura 16) permite visualizar o arranjo, o agrupamento e a distribuição dos elementos de vasos entre as idades de desbastes estudadas. Os vasos apresentaram arranjos não definidos do tipo solitários e múltiplos de dois (geminados) e a distribuição, em anéis semiporosos, caracteriza-se por poros do lenho inicial distintamente maiores que os poros do lenho tardio.

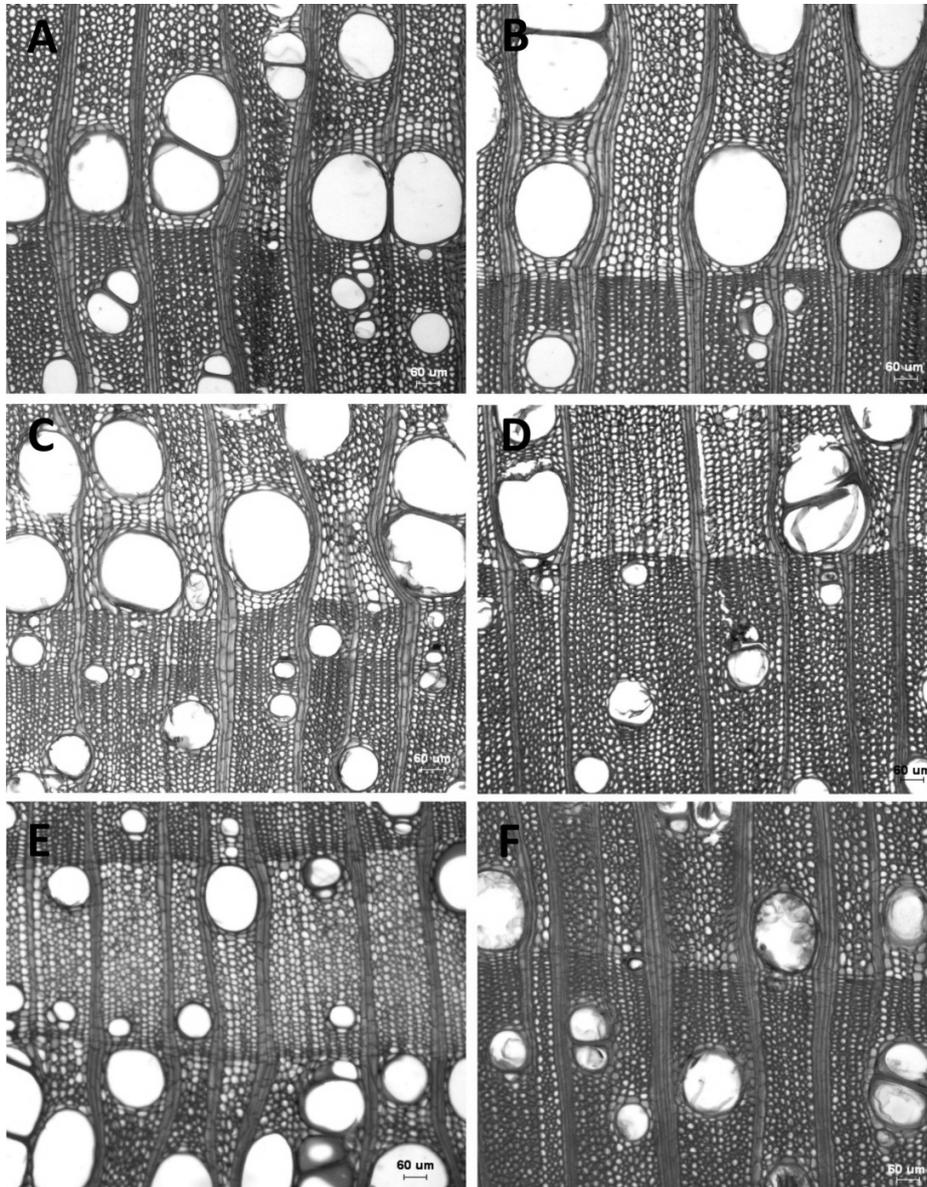


Figura 16 Fotomicrografias do lenho de *Tectona grandis* L. f. nas seções transversais das posições medula-câmbio, nas três idades de desbaste. A (medula) e B (câmbio) na idade de desbaste de 6 anos; C (medula) e D (câmbio) na idade de desbaste de 8 anos e E (medula) e F (câmbio) na idade de desbaste de 10 anos. Barra = 60 μm

Coradin e Camargos (2002) observaram que o número, as dimensões, a distribuição e a quantidade relativa dos elementos celulares constituintes da madeira são importantes caracteres para a identificação de madeiras. Nas folhosas são referenciais o diâmetro e o número de vasos, a largura dos raios e a quantidade de parênquima.

4.2.1 Pontoações intervasculares nos ensaios de campo

Outra característica que influencia a secagem da madeira são as pontoações (Figura 17). Numa análise geral dos dados, foi possível observar que o valor mínimo encontrado para o diâmetro das pontoações foi de 0,64 μm e o valor máximo foi de 4,01 μm , nas idades de desbastes de 11 e 13 anos, respectivamente.

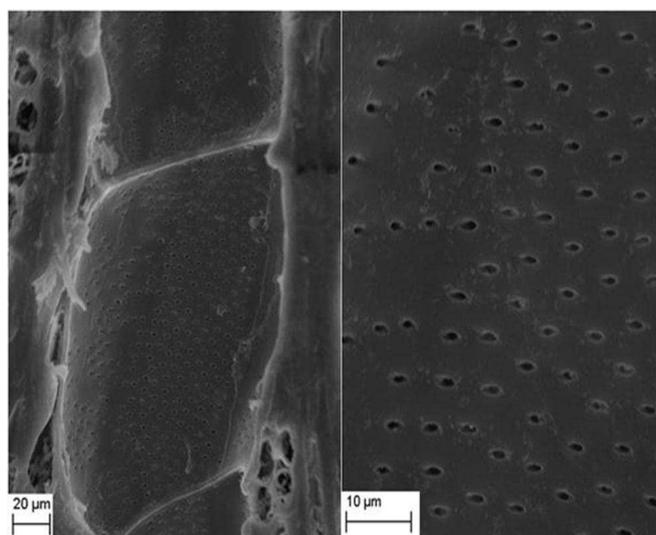


Figura 17 Fotomicrografia eletrônica das pontoações intervasculares na madeira de desbaste de *Tectona grandis* L.f., em diferentes idades

O valor médio do diâmetro das pontoações entre as idades de desbastes variou de 1,3 a 2,0 μm . O menor valor médio do diâmetro das pontoações, de 1,3 μm , foi observado para a madeira de desbaste na idade de 9 anos. Já o maior valor médio do diâmetro da pontoação, de 1,8 μm , foi observado para a madeira de desbaste na idade de 11 anos.

Observa-se que os maiores diâmetros médios das pontoações, de 2,7 e de 2,2 μm (Tabela 11), foram observados na posição próxima da medula, nas idades de desbaste de 11 e 13 anos, respectivamente, sendo iguais estatisticamente. Já a madeira de desbaste na idade de 9 anos apresentou maior diâmetro das pontoações na posição próxima do câmbio (1,8 μm). Observaram-se diferenças significativas entre as idades de desbaste, posições radiais e para a interação entre a idade de desbaste e a posição radial (Tabela 4A).

Tabela 11 Comparação múltipla das médias do diâmetro de pontoações (μm) na madeira de desbaste de *Tectona grandis*, nas posições radiais em diferentes idades

	Diâmetro de pontoações (μm)		
	Posição radial		
	Próxima da medula	Intermediária	Próxima do Câmbio
	9 anos		
Média	1,02 ^b	1,17 ^b	1,76 ^a
Mínimo	0,70	0,93	1,30
Máximo	1,32	1,35	2,61
C.V.(%)	20	14	22
	11 anos		
Média	2,70 ^a	1,94 ^b	1,36 ^c
Mínimo	2,10	1,03	0,64
Máximo	3,43	2,99	2,00
C.V.(%)	17	27	31
	13 anos		
Média	2,23 ^a	1,23 ^b	1,83 ^a
Mínimo	1,46	0,84	0,85
Máximo	3,17	1,74	4,01
C.V.(%)	28	25	50

Médias nas mesmas linhas, seguidas por mesma letra, não diferem estatisticamente entre si. Teste de Tukey, a 95% de probabilidade

Na interação entre as idades de desbaste e posição radial, observou-se que, na madeira de desbaste na idade de 9 anos, não houve diferença significativa para o diâmetro das pontoações nas posições próxima da medula e intermediária, mas houve efeito significativo com a posição próxima do câmbio. Nesta idade de desbaste, observou-se aumento uniforme no diâmetro das pontoações no sentido medula-câmbio. A madeira de desbaste na idade de 11 anos apresentou diferença significativa entre as três posições radiais avaliadas, com diminuição do diâmetro das pontoações no sentido medula-câmbio. Observou-se, para a idade de 13 anos, diminuição do diâmetro das pontoações

da posição próxima da medula para a intermediária e o aumento desta para próximo do câmbio. Na Figura 18 encontra-se a tendência de variação dos valores médios dos diâmetros das pontoações para as diferentes idades de desbaste. Observa-se tendência crescente de forma linear no sentido medula-câmbio para as idades de desbaste de 9 e 13 anos. Observa-se que as árvores nas idades de desbaste de 9 e 13 anos apresentaram a tendência de aumentar o diâmetro das pontoações da posição intermediária para a posição próxima do câmbio. Já para a idade de desbaste de 11 anos, observou-se diminuição do diâmetro das pontoações nas posições próximas da medula para o câmbio.

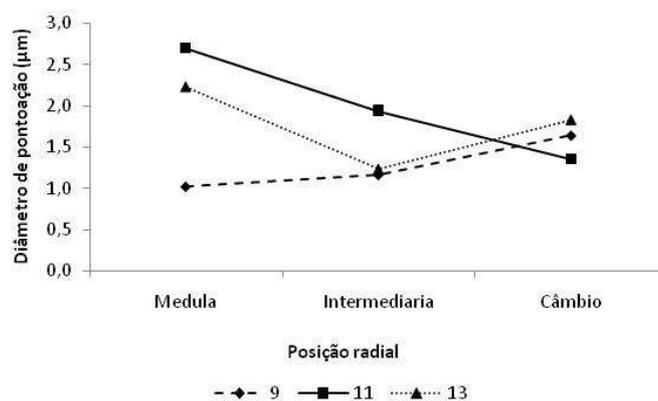


Figura 18 Variação nos diâmetros das pontoações na madeira de desbaste de *Tectona grandis*, nas posições radiais em diferentes idades

Ahmed e Chun (2010) observaram diâmetro das pontoações de 7,1 μm (lenho inicial) e 5,3 μm (lenho tardio) em madeira juvenil de *Tectona grandis*. Conforme Ahmed et al. (2006), quanto maior o número de pontoações com aberturas de maiores diâmetros, maior será o fluxo de líquidos. Os diâmetros das pontoações na madeira de desbaste de *Tectona grandis* são relativamente pequenos (1,7 μm). Embora as pontoações sejam elementos importantes na condução de líquidos na madeira, neste estudo não foi possível quantificar a

influência das mesmas no tempo de secagem convencional. Outros fatores, como elevada umidade da madeira e eficiência no controle do sistema da estufa, também podem ter influenciado o processo de secagem.

4.3 Propriedades químicas

Os teores de extrativos totais aumentaram com a idade das árvores de desbaste de *Tectona grandis*. De acordo com Choong (1969), o fato de os extrativos e da lignina se relacionarem com as fibrilas de celulose reduz os espaços para água, pois aumenta os teores de moléculas fenólicas e diminui a amplitude da contração da madeira, contribuindo para prever o comportamento da madeira durante a secagem. Maiores quantidades de extrativos na madeira garantem maior durabilidade ao ataque de organismos xilófagos, porém, interferem no processo de secagem, devido ao preenchimento das células de condução de líquidos.

Observa-se, pelos dados da Tabela 12, maior proporção de extrativos na madeira com dez anos. Dependendo da quantidade de extrativos na madeira, ocorre obstrução das aberturas das pontuações, dificultando o movimento do ar nas células, relacionando-se com o colapso na madeira (BRAMHAL; WELLWOOD, 1976). Windeisen, Klassen e Wegener (2003), avaliando plantações de *Tectona grandis* com 30 anos de idade em duas regiões, observaram teores de extrativos de 6,8% a 8,8%, para a região de baixa precipitação e de 3,8% a 7,2%, para a região com alta precipitação, com tendência de aumento no sentido medula-câmbio. Thsulasida e Bhat (2007) observaram teores de extrativos para plantios com 35 anos de idade variando de 12,4% a 16,0%.

Tabela 12 Comparação múltipla das médias das propriedades químicas nas madeiras de desbastes da *Tectona grandis* L. f.

	Extrativos (%)	Lignina Insolúvel (%)
6 anos (1º desbaste)		
Média	12,56 ^c	31,33 ^a
Mínimo	12,50	30,98
Máximo	12,62	31,69
C.V. (%)	0,45	1,14
8 anos (2º desbaste)		
Média	14,90 ^b	29,64 ^c
Mínimo	14,69	29,49
Máximo	15,21	29,80
C.V. (%)	1,85	0,52
10 anos (3º desbaste)		
Média	16,81 ^a	30,71 ^b
Mínimo	16,66	30,57
Máximo	17,10	30,79
C.V. (%)	1,50	0,39

Médias nas colunas, seguidas por mesma letra, não diferem estatisticamente entre si. Teste de Tukey a 95% de probabilidade

Os extrativos são importantes para garantir maior durabilidade à madeira. De acordo com os resultados, as idades de 6 e 8 anos apresentaram menores teores de extrativos, o que pode acarretar menor durabilidade natural, porém, possibilidades de melhor desempenho na secagem.

Para os teores de lignina, observou-se diferença entre as idades de desbaste. O maior valor foi observado para a madeira com 6 anos. Pinto (2007) não encontrou diferença significativa para o teor de lignina para madeira de *Tectona grandis* nas idades de 5 anos (33,0%), 10 anos (30,9%) e 30 anos

(33,7%). Flórez (2012) encontrou teor de lignina média de 32,5%, para madeira com treze anos. Comumente, os valores de lignina observados para madeiras de *Eucalyptus* são bem variados; 27,9% até 32,7% (TRUGILHO et al., 2001), 24% a 28% (MOKFIENSKI, 2004), 27,5% até 31,7% (GOMIDE et al., 2005) e 22,8% a 23,5% (SANSÍGOLO; RAMOS, 2011).

4.4 Ensaio de secagem a 100 °C

Observou-se que, pelo ensaio de secagem a 100 °C, o efeito da idade dos desbastes foi significativo para as características umidade, tempos e velocidade de secagem. Já as posições radiais amostradas mostraram-se significativas para o tempo da secagem da umidade inicial até 5% e da umidade de 30% até 5% e também para a velocidade de secagem nos mesmos intervalos de secagem. O efeito da interação entre a idade de desbaste e a posição radial de amostragem foi não significativo, para todas as características avaliadas (Tabela 5A em anexo).

A umidade média inicial apresentou variação, na posição do câmbio, de 46%, 71% e 93% e, na medula, de 55%, 69% e 89%, para as idades de 6, 8 e 10 anos, respectivamente. Madeiras com umidades elevadas exigem maior tempo de secagem e aumentam a susceptibilidade de defeitos de secagem (DEOMANO, 1995; SIMPSON, 1991), corroborando os dados obtidos pela madeira de *Tectona grandis* com idade de 10 anos (Tabela 13) que apresentou, em média, umidade mais elevada (91,2%) e maior tempo de secagem (12,1 horas), até a umidade de 5% e pela madeira com 6 anos que apresentou, em média, menor umidade (50,6%) e, conseqüentemente, menor tempo (6,5 horas).

Tabela 13 Comparação múltipla entre as médias da umidade da madeira e variáveis do ensaio, a 100 °C, para os desbastes da madeira de *Tectona grandis* L.f.

Idade (anos)	U (%)	Tempo de secagem (h)			Velocidade de secagem (g*cm ⁻² *h)		
		T1	T2	T3	V1	V2	V3
6	50,6 ^c	6,5 ^c	1,6 ^c	4,9 ^b	0,022 ^a	0,041 ^a	0,016 ^a
8	69,8 ^b	9,6 ^b	3,6 ^b	6,0 ^{a,b}	0,018 ^b	0,031 ^b	0,010 ^a
10	91,2 ^a	12,1 ^a	5,9 ^a	6,2 ^a	0,021 ^a	0,033 ^a	0,010 ^a

Médias seguidas por mesma letra, nas colunas, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, a 95% de probabilidade. U = umidade; T1 = tempo entre a umidade inicial até umidade de 5%; T2 = tempo entre a umidade inicial até a umidade de 30%; T3 = tempo entre a umidade de 30% até a umidade de 5%; V1 = velocidade de secagem entre a umidade inicial até a umidade de 5%; V2 = velocidade de secagem entre a umidade inicial até a umidade de 30%; V3 = velocidade de secagem entre a umidade de 30% até a umidade de 5%

O tempo de secagem médio entre a umidade inicial até a umidade de 5% foi maior para as árvores com 10 anos de idade (12,1 h). Avaliando-se a posição radial, o maior tempo também foi observado para as árvores com idade de 10 anos na posição da medula (12,4 h). Acredita-se que o menor diâmetro de vaso nas árvores de 10 anos de idade (Figura 14) tenha contribuído para o maior tempo na secagem, aliado aos maiores teores de extrativos (Tabela 12).

Observa-se que houve diferença nas velocidades de secagem entre as idades de desbastes, em que a de 8 anos apresentou menor valor para a secagem entre a umidade inicial até a umidade de 5% (V1 = 0,018 g*cm⁻²*h) e para a secagem entre a umidade inicial até 30% (V2 = 0,033g*cm⁻²*h). Além disso, observou-se a incidência de rachaduras de topo na madeira de desbaste de

8 anos. Este fato pode estar associado à maior frequência de raios observada. Já as idades de 6 e 10 anos não apresentaram diferença para as velocidades de secagem entre a umidade inicial até 5% (V1) e entre a umidade inicial até 30% (V2). Para a velocidade de secagem entre a umidade de 30% até a umidade de 5% (V3) não houve diferenças entre todas as idades de desbaste. Portanto, mesmo se tratando de única espécie, observou-se diferença nas características avaliadas no ensaio de secagem a 100 °C, nas três idades de desbastes de *Tectona grandis*. Resultado semelhante foi obtido por Barbosa et al. (2005), em clones de *Eucalyptus* com baixa velocidade de secagem ($0,0120 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) e alta incidência de defeitos (escore de 1,41) e clones com maior velocidade de secagem ($0,0181 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) e baixa incidência de defeitos (escore de 1,00).

O ensaio de secagem a 100 °C mostrou que o principal defeito foram as rachaduras. A menor incidência (5%) de rachaduras de topo, com comprimento e largura de 0,05 mm, foi observada na madeira de 6 anos, após a secagem da umidade inicial até 30% (R2). Essas rachaduras foram classificadas como escore 2, conforme descrito na Tabela 4. Já as árvores de 8 e 10 anos apresentaram, respectivamente, 20% e 24% de ocorrência de rachaduras com comprimento de 0,05 mm e largura variando de 0,05 mm a 0,20 mm. A presença desses valores de rachaduras ocorreu, respectivamente, para secagem da umidade inicial até 30% (R2) e para secagem de 30% a 5% de umidade (R3). Ambas foram classificadas também com escore 2 (Tabela 4). Dessa forma, admite-se que as idades de desbastes que apresentaram baixa incidência de rachaduras de topo podem suportar secagem mais severa.

É importante destacar que a secagem da madeira de desbaste de *Tectona grandis* com diferentes idades é tecnicamente viável, se a secagem for realizada em único grupo. Entretanto, diante dos resultados dos ensaios de secagem a 100 °C, é preciso estabelecer critérios para a secagem conjunta desse material, porém, esses critérios devem ser controlados pela idade que apresentar

maior tendência a defeitos e menor velocidade de secagem, o que foi indicado pela madeira proveniente do segundo desbaste aos oito anos de idade.

Com o uso das imagens fotográficas dos corpos de prova antes e após a secagem a 100 °C, observou-se que não houve colapso durante o ensaio de secagem (Figura 19). Contrações de 0,4 mm, 0,8 mm e 0,10 mm foram observadas para as idades de 6, 8 e 10 anos, respectivamente. Os corpos de prova representativos das árvores com 10 anos de idade apresentaram maior contração.

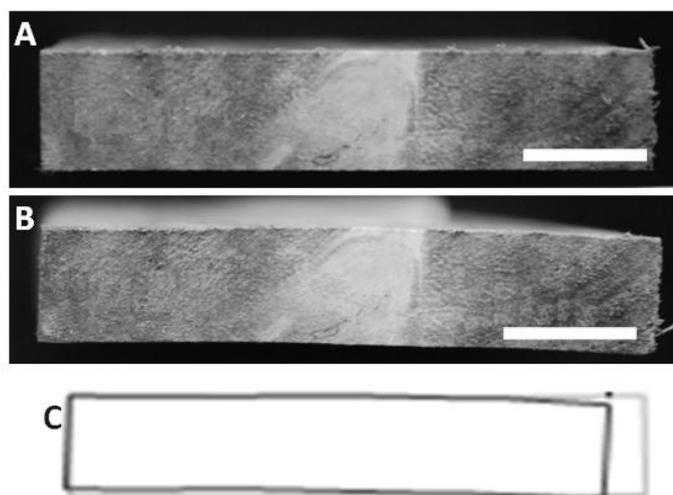


Figura 19 Contrações nos corpos de prova submetidos à secagem a 100 °C. A: corpo de prova úmido; B: corpo de prova seco e C: sobreposição das dimensões dos corpos de prova úmidos e secos. Barra = 1cm

Os parâmetros do programa de secagem, estimados com base nos modelos matemáticos presentes na Tabela 6 e as variáveis do ensaio a 100 °C (Tabela 3), identificando as temperaturas inicial e final e o gradiente de secagem, são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 Parâmetros do programa de secagem no ensaio a 100 °C

Idade do desbaste (anos)	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Gradiente de secagem
Seis	42	68	2,20
Oito	39	62	1,86
Dez	42	66	1,89

As madeiras nas idades de 6 e 10 anos apresentam temperaturas iniciais semelhantes, porém, diferentes quanto à temperatura final. Partindo dessa similaridade, é possível agrupar as duas idades em único programa de secagem. Conforme já mencionado anteriormente, para adequar o programa de secagem com desempenho (tempo de secagem, velocidade de secagem, incidência de rachaduras) às três idades diferentes, deve-se partir da menor temperatura inicial e final, no caso a madeira de desbastes realizados aos 8 anos de idade.

Os parâmetros determinados com os modelos matemáticos são coerentes para prever e elaborar programa de secagem convencional mais adequado com as características da madeira. A partir da secagem de pequenos corpos de prova a 100 °C e, com a utilização dos parâmetros de secagem (Tabela 13), foi possível conhecer o comportamento da madeira juvenil de *Tectona grandis* e, assim, aplicar o programa de secagem em estufa convencional.

Quanto aos elementos celulares que influenciam o processo de secagem, ressaltam-se a altura e a largura dos raios, observados em maior dimensão na madeira de desbaste na idade de 10 anos. Esta madeira apresentou maior intensidade de rachaduras de topo, durante o ensaio de secagem a 100 °C. Esses resultados corroboram a afirmação de Marques (2008) e Tsoumis (1968). As madeiras de desbaste nas idades de 6 e 8 anos apresentaram maiores diâmetros e

frequência de vasos, respectivamente, contudo, não contribuíram para favorecer o fluxo de água na madeira. A madeira de desbastes na idade de 8 anos apresentou a menor velocidade de secagem, mesmo com maior frequência de vasos.

4.4.1 Perfil da secagem

Observa-se o perfil da secagem no ensaio a 100 °C, nas idades de 6 anos (Figura 20), 8 anos (Figura 21) e 10 anos (Figura 22). O tempo total de secagem para a madeira de desbaste de 6 anos foi de 7 horas, partindo da umidade de 50% até atingir 5%. Para a madeira de desbaste aos 6 anos de idade (Figura 20), observa-se que houve diferença na curva de secagem nas posições medula e câmbio, embora, no ajuste do modelo exponencial, a posição da medula apresentou maior valor de $R^2 = (0,959)$. A curva de secagem nas posições medula e câmbio, para as madeiras de desbastes aos 8 e 10 anos, apresentou comportamento mais semelhante entre as posições que a madeira de desbastes na idade de 9 anos. Contudo, novos estudos com testes de outros modelos devem ser avaliados para propor melhores ajustes à curva de secagem de madeira.

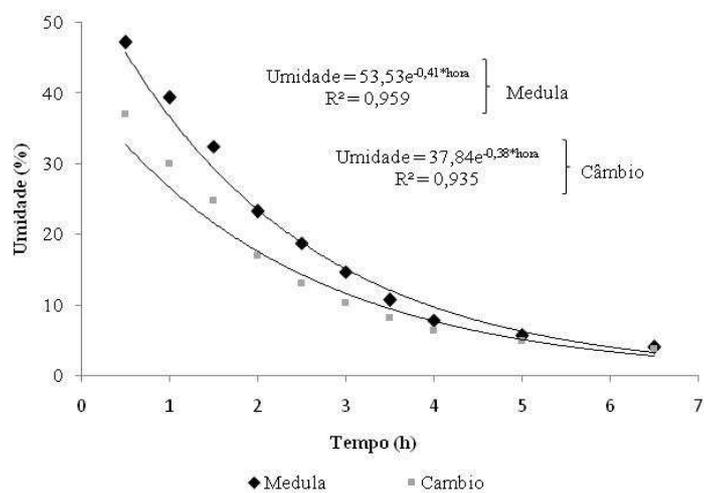


Figura 20 Perfil da secagem da madeira de *Tectona grandis*, oriunda de desbaste aos seis anos, no ensaio a 100 °C

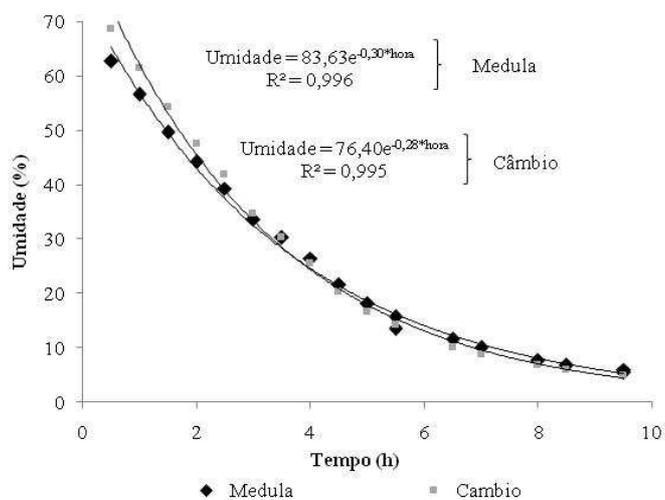


Figura 21 Perfil da secagem da madeira de *Tectona grandis*, oriunda de desbaste aos oito anos, no ensaio a 100 °C

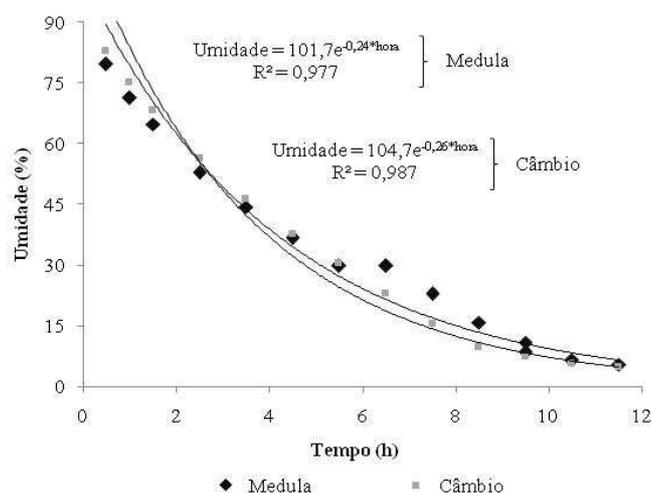


Figura 22 Perfil da secagem da madeira de *Tectona grandis*, oriunda de desbaste aos dez anos, no ensaio a 100°C

Observou-se que a umidade inicial (50%) da madeira na idade de desbaste de 6 anos foi inferior à das demais idades de desbastes. Além disso, observou-se que as madeiras de desbastes nas idades de 8 e 10 anos necessitaram de 2 e de 3 horas, respectivamente, para atingir a umidade de 50%, aumentando seus tempos totais de secagem.

4.5 Correlação entre as variáveis avaliadas

A umidade inicial dos corpos de prova na secagem a 100 °C apresentou correção significativa positiva com a altura do raio (0,5206) e correlação negativa com a contração volumétrica e diâmetro de vaso. A densidade básica, característica importante na qualidade e no comportamento da madeira, não apresentou correlação significativa com as características avaliadas na secagem (Tabela 15). A variável tempo de secagem apresentou correlação negativa com a contração volumétrica e frequência de vasos. Sabe-se que os vasos são os

principais elementos condutores de líquidos na madeira, que influenciam o processo de secagem. Entende-se que a maior frequência de vasos implicaria numa saída de água mais rápida da madeira, no entanto, as árvores de desbaste na idade de 8 anos apresentaram maior frequência de vasos ($10,5 \text{ n}^\circ \cdot \text{mm}^{-2}$) e o segundo maior tempo de secagem, aproximadamente 10 horas. Sendo assim, a frequência de vasos influenciou o processo de secagem em relação ao tempo, associado ao diâmetro de vasos e à umidade inicial da madeira, mas não facilitou a saída de água na madeira.

A variável contração volumétrica apresentou correlação significativa com todas as variáveis avaliadas na secagem, sendo negativa com a umidade da madeira e tempo de secagem e positiva com a taxa de secagem.

Tabela 15 Valores de correlação de Pearson entre as características da madeira de desbaste de *Tectona grandis*, com as características da secagem a 100 °C

Variáveis avaliadas	Umidade	Tempo de secagem	Taxa de secagem
Densidade básica	0,2383	0,3045	-0,0495
Contração tangencial	0,1955	0,1437	0,0243
Contração radial	0,3606	0,2028	0,1016
Contração volumétrica	-0,5082*	-0,6097*	0,5055*
Coefficiente de anisotropia	-0,3390	-0,1213	-0,2610
Comprimento do elemento de vaso	-0,1365	-0,3025	0,2778
Comprimento da fibra	0,1790	0,0929	0,2896
Largura da fibra	-0,1057	-0,1356	0,3570
Diâmetro do lume	0,0861	0,0327	0,1727
Espessura da parede	-0,3264	-0,2997	0,4082
Fração parede	-0,3132	-0,2410	0,1935
Ângulo microfibrilar	-0,4053	-0,1407	-0,3195
Altura do raio	0,5206*	0,3398	0,3208
Largura do raio	0,0869	0,0110	0,2264
Frequência de raios	0,0458	0,3637	-0,5422*
Diâmetro dos vasos	-0,6161*	0,4847	-0,6499*
Frequência dos vasos	0,2749	-0,7181*	0,1793

A umidade da madeira também apresentou correlação positiva e negativa com a altura do raio e diâmetro de vasos, respectivamente. A taxa de secagem apresentou correlação negativa com a frequência de raios e diâmetros de vasos. Acredita-se que a maior frequência de raios implicará em maiores proporções de parede celular, tendendo a reduzir a taxa de secagem na madeira. Já os maiores diâmetros de vasos caracterizam-se por mais canais para a condução de líquidos na madeira.

De maneira geral, observou-se que a umidade inicial da madeira influenciou as variáveis avaliadas na secagem. A altura do raio, o diâmetro de

vasos e a frequência de raios podem ter influenciado o tempo e a taxa de secagem da madeira pela pressuposição do aumento de paredes celulares. O aumento destas pode representar maiores barreiras à movimentação da água.

4.6 Secagem convencional

A temperatura inicial para a secagem em estufa convencional foi de 39 °C e temperatura final de 53 °C. A umidade relativa variou de 100% a 24% (Tabela 16). A umidade média inicial dos sarrafos foi de 76% e foram necessários 14 dias para atingir a umidade final programada de 7%. A taxa de secagem na condição verde até o ponto de saturação das fibras (PSF) foi de 0,46% *h⁻¹ e do PSF até a umidade final de 7% foi de 0,23% *h⁻¹. Esses valores estão altos quando comparados àqueles apresentados na Tabela 17, encontrados para madeira do gênero *Eucalyptus*.

Tabela 16 Programa de secagem elaborado para madeira de desbaste de *Tectona grandis*, em diferentes idades, a partir de pequenas amostras de madeira em secagem, a 100 °C

Umidade da madeira (%)	Temperaturas (°C)		Umidades (%)		Gradiente de secagem
	Bulbo seco	Bulbo úmido	Relativa	de Equilíbrio	
Aquecimento	39,0	39,0	100	26	-
Umidade > 75	39,0	38,5	97	24	3,2
75	39,0	38,0	94	22	3,5
50	39,0	37,5	91	20	2,5
45	39,0	36,6	86	18	2,6
35	39,0	35,5	80	15	2,3
30	41,0	35,5	71	12	2,4
20	42,0	34,5	62	10	2,4
25	43,0	34,5	59	10	2,1
15	44,0	34,0	53	9	1,7
13	46,0	33,0	44	7	1,8
11	48,0	33,0	39	6	1,7
9	50,0	32,0	32	5	1,7
7	53,0	31,0	24	4	1,6

Tabela 17 Parâmetros indicadores de taxa de secagem em programas de secagem convencional elaborados em ensaio a 100 °C

Espécies	Taxa de secagem (%/h)		Autor
	Acima PSF	Abaixo PSF	
<i>Eucalyptus grandis</i>	0,11	0,073	Ciniglio (1998)
<i>Eucalyptus urophylla</i>	0,13	0,083	Ciniglio (1998)
Clones de <i>Eucalyptus</i>	0,15	0,099	Barbosa (2003)

O perfil da secagem convencional para a madeira de desbaste de *Tectona grandis* (Figura 23) utilizou temperaturas iniciais suaves, conforme o programa de secagem elaborado (Tabela 16), contudo, recomendam-se mais

repetições para verificar o adequado comportamento do programa para as madeiras das árvores de desbaste desta espécie, em diferentes idades.

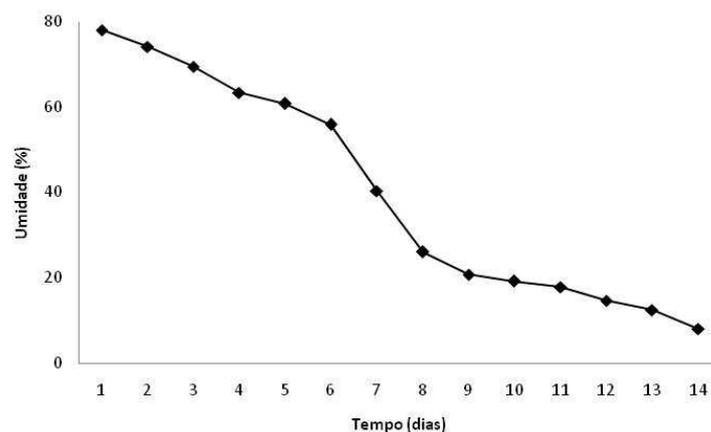


Figura 23 Perfil gravimétrico médio da secagem convencional para a madeira de desbaste de *Tectona grandis* L.f. em diferentes idades

O perfil da secagem apresentou desenvolvimento gradual de perda de umidade. A secagem foi mais suave no intervalo de 78% a 50% de umidade. Abaixo de 55% a umidade decresce com maior intensidade até a umidade de 20% e, a partir daí, torna-se suave até a umidade final de 7%. O perfil da secagem representa um importante parâmetro para possíveis ajustes no programa.

4.7 Defeitos

Antes da secagem, apenas os nós foram avaliados (Tabela 7). Após secagem em estufa convencional, foram avaliadas as rachaduras superficiais nas tábuas, principalmente na região próxima a medula e os empenamentos na forma

de arqueamento e encurvamento (Tabela 18). O valor máximo médio observado para as rachaduras superficiais foi de $0,5 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$, para a madeira de 13 anos.

Tabela 18 Classificação de defeitos quanto ao número e ao percentual de tábuas com rachaduras superficiais, empenamentos do tipo arqueamento e encurvamento após a secagem em estufa convencional, para a madeira juvenil de *Tectona grandis* L.f.

Tipo de defeito*	Quantidade de tábuas	Percentual
Rachaduras superficiais		
Ausente	-	-
Pequeno ¹	20	9,7
Médio ²	32	15,5
Grande ³	7	3,4
Empenamentos		
Arqueamento:		
Ausente	-	-
Pequeno ⁴	-	-
Médio ⁵	48	23,2
Grande ⁶	73	35,3
Encurvamento		
Ausente	-	-
Pequeno ⁴	-	-
Médio ⁵	5	2,4
Grande ⁶	-	-

* = 1- rachaduras de até 5 cm de comprimento; 2- rachaduras de 5 cm a 20 cm de comprimento; 3- rachaduras com comprimento superior a 20 cm; 4- empenamentos com flecha até 2,5% da largura da tábua; 5- empenamentos com flecha de 2,5% a 10% e 6- empenamentos com flecha superior a 10%

A presença de nós na madeira (Figura 24) contribuiu para o aparecimento de rachaduras nessas regiões. As medidas das rachaduras variaram de 20 mm a 100 mm. A presença de rachaduras superficiais foi pequena, se comparada com a madeira de clones *Eucalyptus* (4,63% a 5,32%), avaliada na secagem com três métodos de corte (BARBOSA, 2003). Sequência de

rachaduras superficiais foi observada em única tábua após a secagem (Figura 24B), contudo, foi o defeito de maior magnitude nas peças de madeira de desbaste de *Tectona grandis*, em diferentes idades.



Figura 24 Defeitos na madeira após a secagem convencional em estufa industrial. A: rachadura superfície; B: rachaduras de superfícies; C: nós; D: rachadura de nó

Os empenamentos na forma de arqueamento foram o defeito mais presente após a secagem da madeira de desbaste de *Tectona grandis*, em diferentes idades, com 35,3% do percentual de sarrafos, com flecha superior a 10%. O arqueamento é um tipo de defeito difícil de ser controlado durante a secagem, notadamente em madeira de baixo diâmetro e presença de lenho juvenil. Esse tipo de defeito ocorre na lateral das peças, resultado das contrações longitudinais que ocorrem entre as duas fases opostas, principalmente na posição

da medula. Esse defeito dificulta a utilização total da peça, podendo ser corrigido pela redução do tamanho das mesmas.

Observou-se baixa susceptibilidade de encurvamento da madeira de desbaste de *Tectona grandis* em diferentes idades (2,4%) após a secagem, podendo ser minimizado com a aplicação de peso sobre a pilha de madeira.

Com base nos resultados observados na secagem a 100 °C, a partir de pequenos corpos de prova e na secagem convencional, propõe-se o programa de secagem (Tabela 19) para árvores de desbastes de *Tectona grandis*, em diferentes idades, com temperaturas mais elevadas e a indicação da pré-secagem da madeira, emprego de lotes de peças com dimensões mais uniformes e controle rigoroso no sistema de secagem, na estufa convencional.

Tabela 19 Programa de secagem proposto para teste em árvores de desbaste de *Tectona grandis*, em diferentes idades, em estufa convencional

Umidade da madeira (%)	Temperaturas (°C)		Umidades (%)		Gradiente de secagem
	Bulbo seco	Bulbo úmido	Relativa	de Equilíbrio	
Aquecimento	45	40	100	26	-
U > 35	45	40	76	14	2,6
30	50	42	65	11	2,8
20	53	43	60	9	2,2
25	55	44	57	9	2,9
15	62	43	38	6	2,6
13	62	39	30	5	2,7
11	62	38	29	5	2,4
9	62	35	24	4	2,2

Pela baixa susceptibilidade da madeira de desbaste de *Tectona grandis* a colapso e rachaduras, é possível testar programas de secagem com temperaturas mais elevadas, permitindo agilidade e uniformidade no processo de secagem.

A indicação de programa de secagem para a madeira de desbaste de *Tectona grandis* permite melhor aproveitamento dessa matéria-prima, aliado ao controle eficaz, preciso e rigoroso do sistema na estufa convencional, para que o programa de secagem seja empregado adequadamente, durante o processo de secagem.

5 CONCLUSÕES

As árvores de desbaste de *Tectona grandis* apresentaram características satisfatórias, com densidade básica variando de 0,401 a 0,573 g*cm⁻³; contração radial média entre 2,4% e 3,5%; contração tangencial entre 4,9% e 5,8% e coeficiente de anisotropia entre 1,82 e 2,14. A biometria dos elementos anatômicos e a composição química variaram entre as idades, mas dentro dos padrões observados em madeiras comerciais.

Dentre as características avaliadas nas árvores de desbaste de *Tectona grandis* em diferentes idades que podem influenciar o processo de secagem, destacam-se os diâmetros de vasos, frequência de vasos e raios, altura do raio e a umidade inicial da madeira.

O programa desenvolvido experimentalmente pelo ensaio de secagem a 100 °C foi coerente para a madeira de desbaste de *Tectona grandis*, em diferentes idades. Mas, é necessário traçar modelos experimentais específicos para a espécie.

As temperaturas iniciais e finais utilizadas no processo de secagem em estufa convencional foram de 39 °C e 53 °C, respectivamente, para árvores de desbastes de *Tectona grandis*, em diferentes idades. A taxa de secagem na condição verde foi de 0,46%*h⁻¹ e abaixo do ponto de saturação das fibras foi de 0,23%*h⁻¹. O perfil de secagem apresentou três fases de perda de umidade: perda de umidade suave até a umidade de 50%, abaixo dessa umidade, decréscimo intenso até 20% e, logo, decréscimo suave até 7% de umidade.

A madeira de desbaste de *Tectona grandis* nas diferentes idades avaliadas não apresentou susceptibilidade ao colapso e baixa incidência de rachaduras de topo. Contudo, apresentou predisposição aos defeitos de arqueamento e encurvamento em maior intensidade na secagem convencional.

REFERÊNCIAS

ACOSTA, F. M. Secado de la madera aserrada. **Revista Forestal**, San José, v. 5, n. 13, p. 1-6, 2008.

AHMED, S. A.; CHUN, S. K. Permeability of *Tectona grandis* L. f. as affected by wood struture. **Wood Science and Technology**, Madison, v. 45, p. 487-500, May 2010.

AHMED, S. A. et al. Ray parenchyma and ray tracheid structure of four Korean pine wood species. **Journal of the Korea Furnit Society**, Seoul, v. 17, n. 4, p. 101-107, 2006.

AHMED, S. A.; HONG, S. D.; CHUN, S. K. Essential oil penetration depth in *Prunussargentii* Rehder. **Journal of the Korea Furniture Society**, Seoul, v. 18, n. 4, p. 307-311, 2007.

ANDRADE, A.; JANKOWSKY, I. P.; DUCATTI, M. A. Grupamento de madeiras para secagem convencional. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 59, p. 89-99, 2001.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7989**: pasta celulósica e madeira: determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro, 2010a. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: densidade básica da madeira. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853**: determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro, 2010b. 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTOS DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da Associação Brasileira de Produtos de Florestas Plantadas**: 2012, ano base 2011. Brasília, 2012. 150 p.
- BARBOSA, C. G. **Incidência dos defeitos de secagem como índice de qualidade e de seleção genética para madeira de *Eucalyptus***. 2003. 71 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.
- BARBOSA, C. G. et al. Elaboração de programa de secagem para madeiras de clones híbridos de *Eucalyptus* spp. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 1, p. 40-48, 2005.
- BHAT, K. M. A note on heartwood proportion and wood density of 8-year-old Teak. **Indian Forester**, Dehra Dun, v. 121, n. 6, p. 514-517, 1995.
- BHAT, K. M. Timber quality of teak from managed tropical plantations with special reference to Indian plantations. **Bois et Forêts des Tropiques**, Paris, v. 263, n. 1, p. 5-29, 2000.
- BHAT, K. M.; PRIYA, P. B.; RUGMINI, P. Characterisation of juvenile wood in teak. **Wood Science and Technology**, Madison, v. 34, n. 6, p. 517-532, Nov. 2001.
- BOND, B. H.; HAMNER, P. C. **Wood identification for hardwood and softwood species native to Tennessee**. Knoxville: University of Tennessee, 2002. 15 p.
- BRAMHAL, G.; WELLWOOD, R. W. **Kilndrying of western Canadian lumber**. Vancouver: Western Forest, 1976. 112 p.

BRANDÃO, A. de O. **Determinação de metodologia para a identificação de programas de secagem de madeiras**. 1989. 100 p. Dissertação (Mestrado em ciências florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1989.

BROWN, H. P.; PANSHIN, A. J.; FORSAITH, C. C. Wood in relation to moisture. In: TEXTBOOK of wood technology. New York: McGraw-Hill, 1952. v. 2, p. 61-98.

CALONEGO, F. W. et al. Qualidade da secagem de *Eucalyptus grandis* mediante vaporização simultânea em toros e em madeira serrada. **Silva Lusitana**, Oeiras, v. 14, n. 2, p. 169-180, 2006.

CARDOSO, S. et al. Variabilidade anatômica da *Tectona grandis* (*Tectona grandis*) de Timor-Leste. In: CONGRESSO FLORESTAL NACIONAL, 6., 2009, Ponta Delgada. **Anais...** Ponta Delgada: SNF, 2009. p. 536-543.

CAVALCANTE, A. de A. **Ocorrência do colapso na secagem da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna***. 1991. 76 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Piracicaba, Piracicaba, 1991.

CECCANTINI, G. **Anatomia ecológica do lenho de espécies de cerrado e mata: *Casearia sylvestris* sw. E. *Machaerium villosum* Vog.** 1996. 117 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

CHOONG, E. T. Effect of extractives on shrinkage and other hygroscopic of ten southern pine woods. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 1, n. 2, p. 124-133, 1969.

CINIGLIO, G. **Avaliação da secagem de madeira serrada de *E. grandis* e *E. urophylla***. 1998. 73 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Madeira) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1998.

CORADIN, V. T. R.; CAMARGOS, J. A. A. **A estrutura anatômica da madeira e princípios para a sua identificação**. Brasília: LPF, 2002. 28 p.

CRUZ, C. R. et al. Application of stress waves to estimate moisture content in *Eucalytus* wood. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 4, p. 430-438, 2009.

DEOMANO, E. C. **Influence of some anatomical structures and physical properties on the drying rates of selected industrial tree plantation species.** 1995. 111 p. Thesis (Master of Science) - College of Forestry, Los Baños, 1995.

DINWOODIE, J. M. **Timber: its nature and behaviour.** Wokingham: V. N. Reinhold, 1981. 190 p.

DONALDSON, L. Microfibril angle: measurement, variation and relationship: a review. **IAWA Journal**, Utrecht, v. 29, p. 387-396, 2008.

DRESCHER, R. **Crescimento e produção de *Tectona grandis* Linn F, em povoamentos jovens em duas regiões do Estado de Mato Grosso, Brasil.** 2004. 133 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

DURLO, M. A.; MARCHIORI, J. N. C. **Tecnologia da madeira: retratibilidade.** Santa Maria: CEPEF/FATEC, 1992. 33 p. (Série Técnica, 10).

ELEOTÉRIO, J. R.; SILVA, C. M. K. Comparação de programas de secagem de Cumaru (*Dipteryx odorata*), Jatobá (*Hymenaeaspp*) e Muiracatiara (*Astronium lecointei*) obtidos por diferentes métodos. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 96, p. 537-545, 2012.

FLÓREZ, J. B. **Caracterização tecnológica da madeira juvenil de Teca (*Tectona grandis* L. f.).** 2012. 85 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

FRANKLIN, G. L. Preparation of thin sections of synthetic resins and wood: resin composites, and a new macerating method for wood. **Nature**, London, v. 155, n. 3924, p. 51, 1945.

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

GARCIA, R. et al. Influência do espaçamento e da posição radial na variação de elementos anatômicos da madeira de *Tectona grandis* Linn.f. **Instituto Florestal Série Registro**, São Paulo, n. 40, p. 51-56, 2009.

GOMEZ, P.; MOYA, R. Comportamiento y costos de secado al aire y preservación por inmersión difusión de madera de *Tectona grandis* L.f. y *Bombacopsis quinata* (Jacq.) Dugand de plantaciones de rápido crecimiento em el norte de Costa Rica. **Kurú: Revista Forestal**, San José, v. 5, n. 13, p. 1-13, 2008.

GOMIDE, J. L. et al. Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de *Eucalyptus* do Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 1, p. 129-137, jan./fev. 2005.

GONÇALVES, F. G. et al. Densidade básica e variação dimensional de um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 33, n. 2, p. 277-288, mar./abr. 2009.

GOVAERE, G.; CARPIO, I.; CRUZ, L. **Descripción anatómica, durabilidad y propiedades físicas y mecánicas de *Tectona grandis***. San José: Universidad de Costa Rica; INISEFLOR, 2009. 15 p.

GUTIÉRREZ, R. C. et al. Análisis comparativo de las propiedades físico-mecánicas de la madera de *Tectona grandis* (*Tectona grandis* L. F.) de Quevedo y Balzar. **Revista Ciencia y Tecnología**, San José, v. 1, p. 55-63, feb. 2008.

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

IIIC, J.; NORTHWAY, R.; PONGRACIC, S. **Juvenile wood characteristics effects and identificacion literature review**: forest and wood products research and development corporation al rights reserved. Victoria: Austrialian Government, 2003. 23 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL.
Norma para medição de madeira serrada de folhosas. Brasília, 1983. 67 p.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMISTS. IAWA list of microscopic features for hardwood identification. **IAWA Bulletin**, Leiden, v. 10, n. 3, p. 221-332, 1989.

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

KLITZKE, R. J. **Secagem da madeira**. Curitiba: UFPR, 2003. 98 p.

KOWALSKI, S. J.; PAWLOWSKI, A. Drying of wood with air of variable parameters. **Journal Chemical and Process Engineering**, London, v. 31, n. 1, p. 135-147, 2010.

LEHRINGER, C. et al. A review on promising approaches for liquid permeability improvement in softwoods. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 41, n. 4, p. 373-385, 2009.

LENEY, L. A technique for measuring fibril angle using polarized light. **Wood Fiber Science**, Madison, v. 13, p. 13-16, 1981.

LIMA, I. L. et al. 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. 61-68, 2011.

MACEDO, R. L. G. et al. Desenvolvimento inicial de *Tectona grandis* L. f. (*Tectona grandis*) em diferentes espaçamentos no município de Paracatu, MG. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 1, p. 61-69, mar. 2005.

MARQUES, M. H. B. **Agrupamento de 41 espécies da Amazônia para secagem baseado em características anatômicas e físicas**. 2008. 125 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

MARQUES, M. H. B.; MARTINS, V. A. **Secagem da madeira**: curso para capacitação de agentes multiplicadores em valorização da madeira e resíduos vegetais. Brasília: LPF, 2002. 47 p.

MARTINS, V. A. **Secagem de madeira serrada**. Brasília: IBDF/LPF, 1988. 89 p.

MENDES, A. S. **A secagem da madeira**. Manaus: INPA, 1996. 62 p.

MOKFIENSKI, A. **Importância relativa da densidade básica e da constituição química de madeira de *Eucalyptus* spp. no rendimento, branqueabilidade e qualidade da polpa Kraft**. 2004. 136 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2004.

MORENO, J. R.; MOYA, R. Propriedades físico-mecânicas de lamadera de *Tectona grandis* Linn. F. (*Tectona grandis*), proveniente de uma plantación de choaños de edad em Cochabamba, Bolivia. **Kurú: Revista Forestal**, San José, v. 3, n. 9, p. 1-14, 2006.

MOYA, R. et al. Variación radial de la anatomía, densidad y durabilidad de lamadera de *Tectona grandis* (*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.

MOYA, R.; MUÑOZ, F. Wetpocketsinkiln-dried *Gmelinaarborea* lumber. **Journal of Tropical Forest Science**, Kepong, v. 22, n. 3, p. 317-328, 2008.

MOYA, R.; TENÓRIO, C.; MEYER, I. Influence of wood anatomy on moisture content shrinkage and during defects in *Vochysiaguatemalensis* Donn. Sm. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 49, p. 249-258, 2012.

MURMANIS, L. Formation of tyloses in felled *Quercus rubra* L. **Wood Science and Technology**, New York, v. 9, p. 3-14, 1975.

NOCK, H. P.; RICHTER, H. G.; BURGER, L. M. **Tecnologia da madeira**. Curitiba: UFPR, 1975. 216 p.

OBST, J. R.; SACHS, I. B.; KUSTER, T. A. The quality and type of lignin in tyloses of Bur Oak (*Quercus macrocarpa*). **Holzforschung**, Berlin, v. 42, n. 4, p. 229-231, 1988.

OLIVEIRA, J. T. S. **Estudo das propriedades físicas e tecnológicas da madeira da pindaíba (*Xylopia sericea* St. Hill)**. 1988. 106 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1988.

PALMA, H. A. L.; LEONELLO, E. C.; BALLARIM, A. W. Demarcação da madeira juvenil e adulta de *Corymbia citriodora*. **Cerne**, Lavras, v. 16, p. 141-148, jul. 2010. Suplemento.

PANG, S. Mathematical modelin of kiln drying of softwood timber: model development, validation, and practica application. **Drying Technology**, New York, v. 25, n. 3, p. 421-431, Mar. 2007.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1970. v. 1, 722 p.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 4th ed. New York: McGraw Hill, 1980. 722 p.

PINTO, M. L. **Propriedades e características da madeira de *Tectona grandis* (*Tectona grandis*) em função da idade**. 2007. 124 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

PONCE, R. H.; WATAI, L. T. **Manual de secagem**. Brasília: IPT, 1985. 70 p.

QUIRÓS, V. C.; MONTERO, J. R. S. Influencia del espaciamiento de siembra y otros factores sobre el desarrollo de torceduras y grietas en madera proveniente de plantaciones de *Tectona grandis* (*Tectona grandis* L. f.). **Revista Forestal**, San José, v. 1, n. 3, p. 1-12, 2004.

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.

RONDON, E. V. Estudo da biomassa de *Tectona grandis* L.f. sob diferentes espaçamentos no Estado de Mato Grosso. **Revista árvore**, Viçosa, MG, v. 30, n. 3, p. 337-341, maio/jun. 2006.

ROQUE, R. M. Influencia de la edad del cambium, tasa de crecimiento y nivel de precipitación sobre la densidad básica de *Tectona grandis* em Costa Rica. **Madera y Bosques**, Xalapa, v. 8, n. 1, p. 39-49, 2002.

ROQUE, R. M.; LEDZEMA, V. A. Efecto del espaciamiento en plantación sobre las propiedades físicas de madera de *Tectona grandis* a lo largo del fuste. **Madera y Bosques**, Xalapa, v. 9, n. 2, p. 17-25, 2003.

SANWO, S. K. The characteristics of the crown formed and stem formed wood in plantation grown teak (*Tectona grandis* L.f.) in Nigéria. **Journal Institute Wood Science**, London, v. 11, p. 85-88, 1987.

SANWO, S. K. The relations between rate of growth and strength in plantation grown Teak (*Tectona grandis* L. f.). **Journal Tropical Forestry Resources**, Ibadan, v. 2, p. 9-13, 1990.

SANSÍGOLO, C. A.; RAMOS, E. S. Quality of wood and pulp from a clone of *Eucalyptus grandis* planted at three locations. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 1, p. 47-60, 2011.

SEVERO, E. T. D. Qualidade da secagem de madeira serrada de *Eucalyptus dunnii*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 109-124, 2000.

SHIMATIZU, J. Y.; KLEIN, A.; OLIVEIRA, J. R. V. de. **Diagnóstico das plantações florestais em Mato Grosso**. Cuiabá: UFMT, 2007. 33 p.

SIAU, J. F. **Flow in wood**. Hardcover: Syracuse University, 1971. 131 p. (Syracuse Wood Science Serie).

SIAU, J. F. **Transport processes in wood**. Berlin: Springer, 1984. 131 p.

SILVA, A. C. Nota sobre ângulo microfibrilar no xilema de *Andira parviflora* Ducke e *Saccoglotis guianensis* Benth da Amazônia: notas e comunicações. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 22, n. 3, p. 479-482, 1992.

SILVA, J. C. et al. Influência da idade e da posição radial nas dimensões das fibras e dos vasos da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 1081-1090, 2007.

SILVA, J. R. M. et al. Relação da usinabilidade com a morfologia das fibras da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex maiden. **Revista árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 3, p. 479-487, maio/jun. 2005.

SIMPSON, W. T. **Dry kiln operator's manual**. Madison: USDA, 1991. 274 p. (USDA. Agriculture Handbook, 188).

SIMPSON, W. T.; BAAH, C. K. **Grouping tropical wood species for kiln drying**. Madison: USDA, 1989. 14 p.

SIMPSON, W. T.; SAGOE, J. A. **Relative drying times of 650 tropical woods:** estimation by green moisture content, specific gravity, and green weight density: FPL-GTR-71. Madison: USDA, 1991. 274 p.

TENORIO, C.; MOYA, R. Kiln drying of *Acacia mangium* Willd wood: considerations of moisture content before and after drying and wet pocket. **Drying Technology**, Philadelphia, v. 29, n. 15, p. 1845-1854, 2011.

THULASIDA, P. K.; BHAT, K. M. Chemical extractive compounds determining the Brown-rot decay resistance of teak wood. **Holzals Rohund Werkstoff**, Berlin, n. 65, p. 121-124, 2007.

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis*. **IPEF**, Piracicaba, n. 29, p. 37-45, 1985.

TORGOVNIKOV, G.; VINDEN, P. High-intensity microwave wood modification for increasing permeability. **Forest Products Journal**, Madison, v. 59, n. 4, p. 84-92, Apr. 2009.

TRUGILHO, P. F. et al. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 104-114, 2001.

TSOUMIS, G. **Science and technology of wood:** structure, properties, utilization. Davis: V. N. Reinhold, 1991. 491 p.

TSOUMIS, G. **Wood as raw material:** source, structure, chemical composition, growth, degradation and identification. Michigan: Pergamon, 1968. 297 p.

WINDEISEN, A.; KLASSEN, G.; WEGENER, G. On the chemical characterization of plantation teakwood from Panama. **Holzals Rohund Werkstoff**, Berlin, v. 61, n. 6, p. 416-418, Dec. 2003.

ZOBEL, B. J.; JETT, J. B. **Genetics of wood production**. Syracuse: Springer-Verlag, 1995. 337 p.

ANEXOS

Tabela 1A Resumo da análise de variância para densidade básica da madeira (DB), contração radial (β_{rd}), tangencial (β_{tg}) e volumétrica (β_{vol}) e coeficiente de anisotropia (θ) da madeira de *Tectona grandis* L. f.

Fonte de variação	GL	Quadrado médio				
		DB	β_{rd}	β_{tg}	β_{vol}	θ
Idade (desbaste)	2	0,004 ^{ns}	2,90*	1,96 ^{ns}	9,32*	0,28 ^{ns}
Posição radial	1	0,012*	3,88*	1,66 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,52 ^{ns}
Erro	26	0,001	0,35	0,94	1,5	0,8
C.V%		8,08	20,02	18,19	18,3	21,84

= significativo a 95% de probabilidade e ^{ns} = não significativo a 95% de probabilidade

Tabela 2A Resumo da análise de variância para comprimento da fibra (CF), largura da fibra (LF), diâmetro do lume da fibra (DLF), espessura parede da fibra (EPF), fração parede (FP) e ângulo microfibrilar (AMF) da madeira de *Tectona grandis* L. f.

Fonte Variação	GL	QM					
		CF	LF	DLF	EPF	FP	AMF
Idade (desbaste)	2	22529*	19,03*	10,28*	0,38 ^{ns}	6,43 ^{ns}	1,15*
Posição radial	1	28187 ^{ns}	0,39 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,25 ^{ns}	11,42 ^{ns}	1,27*
Erro	16	6106	1,20	1,53	0,17	14,4	0,28
CV _e %		9,97	9,46	8,74	10,34	10,55	5,59

* = significativo a 95% de probabilidade; ^{ns} = não significativo a 95% de probabilidade, CV_e = coeficiente de variação experimental

Tabela 3A Resumo da análise de variância das características anatômicas: altura do raio (AR), largura do raio (LR), frequência do raio (FR), diâmetro (DV) e frequência de vaso (FV), para a madeira de desbaste de *Tectona grandis* L.f.

Fonte de variação	GL	Quadrado médio				
		AR	LR	FR	DV	FV
Idade (desbaste)	2	607739*	73837*	39*	37924*	794*
Posição radial	1	20626 ^{ns}	9543*	239*	55 ^{ns}	960*
Idade x posição radial	2	94090*	536 ^{ns}	85*	4427*	125*
Erro	894					
CV _e (%)		42,4	30,6	27,6	30,4	44,4

* = significativo a 95% de probabilidade; ^{ns} = não significativo a 95% de probabilidade, CV_e = coeficiente de variação experimental

Tabela 4A Resumo da análise de variância de pontoações na madeira de desbaste de *Tectona grandis* L.f.

Fonte de variação	GL	Quadrado médio
		Pontoações
Idade (desbaste)	2	3615898*
Posição radial	2	2203978*
Idade x posição radial	4	3181029*
Erro	81	
CV _e (%)		29,3

* = significativo a 95% de probabilidade; CV_e = coeficiente de variação experimental

Tabela 5A Resumo da análise de variância para as variáveis do ensaio de secagem a 100 °C, umidade da madeira (U), tempo de secagem (T1, T2 e T3), velocidade de secagem (V1, V2 e V3) na madeira de *Tectona grandis* L. f.

Fonte variação	GL	QM						
		U	Tempo de secagem			Velocidade de secagem		
			T1	T2	T3	V1	V2	V3
Idade (desbaste)	2	11534**	227*	131*	15*	0,00011*	0,00077*	0,0003*
Posição Radial	1	18,33 ^{ns}	31,6*	0,002 ^{ns}	31*	0,00016*	0,000002 ^{ns}	0,0002*
Idade x Posição radial	2	354 ^{ns}	1,91 ^{ns}	1,56 ^{ns}	1,86 ^{ns}	0,000013 ^{ns}	0,00005 ^{ns}	0,00001 ^{ns}
Erro	78							
CVe (%)		21,39	26,12	25,79	35,22	23,85	17,09	39,14

* = significativo a 95% de probabilidade; ^{ns} = não significativo a 95% de probabilidade, CVe = coeficiente de variação experimental