

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

Felipe Susin

**CARACTERIZAÇÃO E SECAGEM DA MADEIRA DE 12 ESPÉCIES
AMAZÔNICAS**

Santa Maria, RS, Brasil.
2018

Felipe Susin

CARACTERIZAÇÃO E SECAGEM DA MADEIRA DE 12 ESPÉCIES AMAZÔNICAS

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Tecnologia da Madeira, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Florestal**.

Orientador: Prof. Dr. Elio José Santini

Santa Maria, RS, Brasil.
2018

Susin, Felipe
Caracterização e secagem da madeira de 12 espécies
amazônicas / Felipe Susin.- 2018.
125 p.; 30 cm

Orientador: Elio José Santini
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2018

1. Taxa de secagem 2. Agrupamento de madeiras
tropicais 3. Programas de secagem I. Santini, Elio José
II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

© 2018

Todos os direitos autorais reservados a Felipe Susin. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: felipets_86@yahoo.com.br

Felipe Susin

CARACTERIZAÇÃO E SECAGEM DA MADEIRA DE 12 ESPÉCIES AMAZÔNICAS

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Tecnologia da Madeira, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Florestal**.

Aprovado em 28 de março de 2018:

Elio José Santini, Dr.
(Presidente/Orientador)

Diego Martins Stangerlin, Dr. (UFMT)

Luciano Denardi, Dr. (UFSM)

Magnos Alan Vivian, Dr. (UFSC)

Silviana Rosso, Dra. (UNIPAMPA)

Santa Maria, RS, Brasil
2018

A Deus
A minha família
A todos que contribuíram de
alguma forma para a realização
deste trabalho

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, pois sem Ele nada disso teria sido possível.

Gostaria de agradecer aos meus pais, Maria Helena Torezzan Susin e Alvides Luiz Susin, minha irmã Camila Susin, minha avó Donália Z. Torezzan e demais familiares pelo apoio, carinho, incentivo e compreensão; assim como pelas preces da minha mãe e da minha avó, que me deram fé e força em momentos difíceis.

Ao meu orientador, Prof. Elio J. Santini, pela oportunidade e confiança na minha capacidade e no meu trabalho, além do seu apoio e orientação.

Aos professores Diego, Luciano, Magnos e Silvana, por aceitarem o convite para integrarem a comissão julgadora.

Ao seu Ivo, da serraria Dois Irmãos, pela sua colaboração e prestatividade na obtenção e desdobro do material.

As responsáveis pelo Laboratório de Solos da Unemat – Alta Floresta, professor Gustavo e ao técnico de laboratório Guilherme, por cederem a estufa e o espaço para realização de parte deste trabalho.

Ao professor Diego, da UFMT – Sinop, pela inestimável colaboração desde a concepção do projeto até as etapas finais, e também por ceder o espaço do Laboratório de Química da Madeira para realização dos ensaios de parte do estudo.

A minha namorada Camila C. Carvalho pelo seu amor, carinho, compreensão e companheirismo durante toda essa jornada.

Aos colegas e amigos, Laura Sanches, Kaiqui Silva e Carleane Leite, pela colaboração na avaliação e condução dos experimentos.

Aos Programas de Pós Graduação em Ciências Florestais da Unicentro, em Engenharia Florestal da UFSM, e em Engenharia Florestal da UFPR.

Aos amigos Pedro Paulo G. Oliveira, Edberto M. Lima e Manoela M. Duarte, pelo apoio, amizade e por me acolherem quando estive em Irati e Curitiba.

Aos colegas do LPF-UFSM, pelo auxílio e pela prestatividade quando necessitei de algo para que este trabalho pudesse ser desenvolvido.

A minha irmã Camila Susin pelas correções de português da minha tese, pelas estadias em sua casa quando precisei me deslocar e pelo seu carinho.

A todos aqueles que não citei e que contribuíram, de alguma forma, para a realização deste trabalho, os meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

CARACTERIZAÇÃO E SECAGEM DA MADEIRA DE 12 ESPÉCIES AMAZÔNICAS

AUTOR: Felipe Susin

ORIENTADOR: Elio José Santini

A secagem da madeira é uma etapa fundamental para agregar qualidade a esta, visando à produção de bens duráveis. A relação existente entre determinadas características específicas da madeira e seu comportamento durante a secagem demanda que estudos sejam realizados, almejando entender e consolidar tais relações e como elas influenciam na secagem. Desse modo, o objetivo do presente estudo foi agrupar espécies similares com base nos ensaios preliminares de secagem, em virtude do comportamento da madeira na secagem em programas adequados. Para isso, utilizaram-se madeiras de *Euxylophora paraensis*, *Ocotea aciphylla*, *Astronium lecointei*, *Couratari guianensis*, *Couratari stellata*, *Hymenolobium petraeum*, *Goupia glabra*, *Vochysia guianensis*, *Qualea paraensis*, *Trattinnickia burserifolia*, *Apuleia leiocarpa* e *Dipteryx odorata*. De tais madeiras, avaliaram-se as propriedades físicas e químicas e o comportamento na secagem a 60°C, utilizando amostras de tamanho reduzido. A densidade das espécies utilizadas apresentou variação de 0,41 g.cm⁻³ para *Trattinnickia burserifolia* até 0,92 g.cm⁻³ para *Dipteryx odorata*, enquanto os menores valores de retratibilidade, em média, foram verificados para a madeira de *Couratari guianensis*. As espécies apresentaram significativas diferenças entre as taxas de secagem, nas quais as madeiras, como *Ocotea aciphylla* e *Goupia glabra*, externaram valores baixos, indicando serem espécies de secagem lenta, com propensão a defeitos, no caso da última espécie. As madeiras que apresentaram secagem mais rápida, como *Apuleia leiocarpa* e o *Qualea paraensis*, manifestaram tendência a defeitos, tanto empenos quanto rachaduras de topo. Um grupo com 83% de similaridade foi formado pelas madeiras de *Hymenolobium petraeum*, *Ocotea aciphylla* e *Dipteryx odorata*. Para este grupo, elaborou-se um programa de secagem que pode permitir a secagem das espécies de modo conjunto, mostrando que a análise de agrupamento possibilitou a formação de um grupo com alta similaridade entre as espécies, baseando-se em seu comportamento na secagem.

Palavras chave: Taxa de secagem. Agrupamento de madeiras tropicais. Programas de secagem.

ABSTRACT

WOOD DRYING AND CHARACTERIZATION OF TWELVE AMAZON SPECIES

AUTHOR: Felipe Susin
ADVISOR: Elio José Santini

Drying wood is a fundamental step to adding quality to it, aiming the manufacture of durable products. The existing relation between some specific characteristics of wood and its behaviour during the drying process requires that studies be carried with the purpose to understand and consolidate such relations and how they influence drying. Therefore, the objective of this study was to group similar species based on preliminary essays on drying, as a result of the behaviour of the wood for the species *Euxylophora paraensis*, *Ocotea aciphylla*, *Astronium lecointei*, *Couratari guianensis*, *Couratari stellata*, *Hymenolobium petraeum*, *Goupia glabra*, *Vochysia guianensis*, *Qualea paraensis*, *Trattinnickia burserifolia*, *Apuleia leiocarpa* e *Dipteryx odorata*. Physical-chemical properties, as well as the behaviour of wood were evaluated under drying process at 60°. Reduced-size samples were used in this procedure. The density of the species used showed variation from 0,41 g.cm⁻³ for *Trattinnickia burserifolia* until 0,92 g.cm⁻³ for *Dipteryx odorata*, while the average lowest values of retractability were checked for the wood *Couratari guianensis*. The species showed significant differences in the drying rates. Wood such as *Ocotea aciphylla* and *Goupia glabra* revealed low values, when compared to that those low-speed-drying species and the last species with propensity for defects. The species of wood showing the fastest drying process, such as *Apuleia leiocarpa* and *Qualea paraensis* attested tendency to defects such as warps and top cracks. A group 83% similar was formed with the woods *Hymenolobium petraeum*, *Ocotea aciphylla* and *Dipteryx odorata*. For this group a drying program that allows the species to dry continuously was created, showing that the group analysis enabled the grouping of highly similar species, in what concerns to their behavior under the drying process.

Keywords: Drying rate. Group of tropical wood. drying programs.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Espécies de madeira utilizadas	47
Tabela 2 – Densidade básica e contrações das madeiras	55
Tabela 3 – Propriedades químicas das madeiras: teor de lignina, cinzas, extrativos e holocelulose	58
Tabela 4 – Grau de colapso	74
Tabela 5 – Taxa de secagem das peças de madeira.....	80
Tabela 6 – Defeitos de secagem do tipo empenamento nas peças de madeira.	82
Tabela 7 – Rachaduras de topo, de superfície e internas durante a secagem das madeiras em estufa	87
Tabela 8 – Equações para determinação dos parâmetros do programa de secagem.....	100
Tabela 9 – Programa de secagem elaborado para as madeiras do grupo angelim-pedra, canelão e cumaru	105

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Dendrograma da análise de agrupamento com base nas características físicas das madeiras.....	60
Figura 2 – Dendrograma da análise de agrupamento com base nas características químicas das madeiras	61
Figura 3 – Confecção das amostras para o ensaio preliminar de secagem de madeira	67
Figura 4 – Amostras de madeira alocadas na estufa para secagem a 60°C.....	68
Figura 5 – Procedimento para mensuração do arqueamento	71
Figura 6 – Procedimento para mensuração do encurvamento.....	71
Figura 7 – Procedimento para mensuração do encanoamento.....	72
Figura 8 – Procedimento para medição das rachaduras de topo	73
Figura 9 – Procedimento para mensuração do colapso em peças de madeira.....	74
Figura 10 – Curva de secagem das 12 espécies de madeira.....	77
Figura 11 – Amostra de amarelinho com empenamento do tipo torcimento	86
Figura 12 – Rachaduras de superfície em peças de madeira de muiracatiara.....	89
Figura 13 – Vista do topo de uma peça após poucas horas de secagem e ao final da etapa.	90
Figura 14 – Colapso celular em muiracatiara	91
Figura 15 – Dendrograma da análise de agrupamento das espécies	101

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	19
2	OBJETIVOS	21
2.1	OBJETIVO GERAL.....	21
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
3.1	PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA	23
3.1.1	Densidade da madeira	23
3.1.2	Retratibilidade	25
3.2	PROPRIEDADES QUÍMICAS DA MADEIRA	27
3.3	SECAGEM.....	29
3.3.1	Taxa de secagem	31
3.3.2	Secagem em estufa convencional	32
3.3.3	Defeitos de secagem	33
3.4	AGRUPAMENTO DE ESPÉCIES PARA SECAGEM	37
3.5	ELABORAÇÃO DE PROGRAMAS DE SECAGEM.....	40

CAPÍTULO I – PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DA MADEIRA

1	INTRODUÇÃO	45
2	MATERIAIS E MÉTODOS	47
2.1	COLETA E PREPARO DO MATERIAL	47
2.2	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS	49
2.2.1	Densidade básica	49
2.2.2	Contrações longitudinal, radial e tangencial	49
2.2.3	Contração volumétrica e coeficiente de anisotropia	50
2.3	PROPRIEDADES QUÍMICAS	51
2.3.1	Determinação do teor da fração holocelulósica	51
2.3.2	Determinação do teor de lignina insolúvel	51
2.3.3	Determinação do teor de extrativos	52
2.3.4	Determinação do teor de cinzas	53
2.4	AGRUPAMENTO DAS MADEIRAS.....	53
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
3.1	PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA	55
3.2	PROPRIEDADES QUÍMICAS DA MADEIRA	58
3.3	AGRUPAMENTO DE MADEIRAS	60
4	CONCLUSÃO	63

CAPÍTULO II – CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA EM ENSAIOS PRELIMINARES DE SECAGEM

1	INTRODUÇÃO	65
2	MATERIAIS E MÉTODOS	67
2.1	ENSAIO PRELIMINAR DE SECAGEM	67

2.2	DETERMINAÇÃO DA TAXA, TEMPO DE SECAGEM E TEOR DE UMIDADE INICIAL DA MADEIRA.....	69
2.3	DEFEITOS NA SECAGEM	70
2.3.1	Empenamentos	70
2.3.2	Rachaduras.....	72
2.3.3	Colapso celular	74
2.4	TEOR DE UMIDADE FINAL DAS AMOSTRAS	74
2.5	ANÁLISES ESTATÍSTICAS	75
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	77
3.1	TEOR DE UMIDADE E TEMPO DE SECAGEM.....	77
3.2	TAXA DE SECAGEM.....	79
3.3	DEFEITOS DE SECAGEM	82
3.3.1	Empenos	82
3.3.2	Rachaduras.....	87
3.3.3	Colapso	91
4	CONCLUSÃO	93

CAPÍTULO III – AGRUPAMENTO E ELABORAÇÃO DO PROGRAMA DE SECAGEM

1	INTRODUÇÃO	95
2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	97
2.1	AGRUPAMENTO DAS ESPÉCIES E PROGRAMAÇÃO DA SECAGEM	97
2.2	SECAGEM DRÁSTICA	98
2.3	VARIÁVEIS PARA ESTIMATIVA DOS PROGRAMAS DE SECAGEM	99
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	101
3.1	AGRUPAMENTO DAS ESPÉCIES.....	101
3.2	ELABORAÇÃO DO PROGRAMA DE SECAGEM	105
4	CONCLUSÃO	109
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	111
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113

1 INTRODUÇÃO GERAL

A secagem da madeira de modo adequado sob o aspecto técnico e financeiro está diretamente relacionada à sua qualidade e ao rendimento que irá apresentar, sendo possível obter um produto de maior valor agregado, com custos mais reduzidos, de acordo com a sua utilização. No processo de secagem de madeira, existem princípios básicos que devem ser respeitados para que essa etapa tenha êxito.

Em estufas, o processo de secagem de madeiras tropicais nativas é considerado de difícil gerenciamento, em virtude da quantidade e da variabilidade das espécies exploradas comercialmente. As espécies madeireiras utilizadas com fins comerciais podem passar de 70, atualmente, considerando toda a Amazônia, além de a variabilidade dessas espécies serem muito grande. Como parâmetro para indicar parte desta variabilidade, a densidade da madeira das espécies em questão pode variar de 0,34 a 0,97 g.cm⁻³ (Nascimento et al. 1997).

O agrupamento de espécies com as mesmas características para compor cargas que preencham todo o volume da câmara de secagem industrial é uma das alternativas para esta situação. Para Andrade et al. (2001), o agrupamento das espécies pode ser realizado de diversas formas e vale-se de várias características para isso, como densidade, grã, textura, além de aspectos anatômicos, teor de umidade inicial, permeabilidade da madeira a fluidos, retração transversal e radial, taxa de secagem e defeitos de secagem.

De modo geral, a densidade da madeira é associada a sua facilidade ou dificuldade de secagem. Todavia, isso deve ser tratado com ressalvas, pois há outras características que influenciam no processo de secagem, como a permeabilidade da madeira. Conhecer tais características e o comportamento da madeira nesse processo é fundamental para que esta etapa seja realizada de modo adequado, bem como para possibilitar o agrupamento de espécies diversas.

Madeiras com maior densidade possuem a parede celular mais espessa e um lume de menor volume, contendo relativa quantidade maior de água higroscópica, cuja movimentação é mais lenta. Por outro lado, as de menor densidade possuem maior quantidade de água capilar, cuja movimentação depende, principalmente, do raio dos capilares (ANDRADE, 2000).

De acordo com relatório do SNIF (2017), 11.450.693 m³ de madeira em toras foram explorados e convertidos em madeira serrada de diversas espécies nativas, o que ressalta a importância do segmento. Diante desse considerável volume de madeira, a possibilidade de agrupar espécies de modo adequado deve ser considerada como uma ferramenta interessante pelas indústrias que processam ampla gama de espécies de madeira. O agrupamento pode resultar em economia de recursos, possibilitando obter um produto final de maior qualidade. Para tal, faz-se necessário conhecer as características de cada madeira, estabelecer uma relação entre elas e, ainda, ter conhecimento sobre o comportamento durante o processo de secagem. Assim, pode-se verificar a hipótese de submeter diferentes espécies utilizando um mesmo programa de secagem ou fazendo uso da secagem de cargas mistas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estabelecer o agrupamento de madeiras amazônicas para secagem com base em ensaios preliminares.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar as espécies madeireiras quanto às propriedades físicas - densidade básica e retratibilidade - e químicas - teor de holocelulose, lignina, extrativos e cinzas;
- Elaborar um programa de secagem empregando a metodologia de secagem drástica para o grupo de espécies com maior valor de similaridade.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA

3.1.1 Densidade da madeira

A densidade da madeira é uma das propriedades físicas mais importantes, sendo considerada uma das características que melhor expressa as propriedades da madeira (JATI et al., 2014). Isso é atribuído, pois é da densidade que depende a maior parte das propriedades físicas e tecnológicas, além de ser considerado um parâmetro que serve de referência para a classificação e qualidade da madeira (MORESCHI, 2010). Tal atribuição ocorre por apresentar forte correlação com a massa, composição celular e outras propriedades, tais como físicas, mecânicas, térmicas, acústicas e elétricas (BATISTA, 2012). Todavia, a densidade não pode ser avaliada isoladamente, devendo ser estudada juntamente com outros parâmetros, como a composição química e as características anatômicas (PAES et al., 2013).

As relações existentes entre densidade e umidade são de fundamental importância para um aproveitamento mais eficiente da matéria prima (Rezende et al., 1998). As propriedades físicas possuem associação expressiva com várias características anatômicas, principalmente aquelas que estão relacionadas às dimensões das fibras e as dimensões, frequência e arranjo dos vasos (OLIVEIRA et al., 2006).

Paula (2003), em estudos da caracterização anatômica da madeira de espécies da Amazônia, verificou que a densidade aumenta do centro da porção do xilema secundário em direção ao alburno. Dentre as características anatômicas, os vasos apresentam relação direta com a densidade da madeira, pois ela está relacionada com a porosidade que, conseqüentemente, corresponde ao volume vazio dos poros (BOWYER et al., 2003). Algumas espécies apresentam fibras com paredes muitas vezes mais espessas do que as de outras espécies, e a densidade está relacionada também com a espessura da parede absoluta de qualquer tipo de célula (DINWOODIE, 1981).

Diferenças significativas entre a densidade em posições radiais foram encontradas por Lima et al. (2011), em estudo realizado com a variação radial da densidade e dimensões celulares da madeira de *Cariniana legalis* em função da

procedência. No estudo citado, os autores verificaram que ocorreu uma tendência de aumento no sentido medula-casca para o comprimento das fibras, espessura da parede das fibras, comprimento dos elementos, diâmetro dos vasos; porém, para a frequência de elementos de vaso, tendeu a diminuir no sentido da medula-casca.

A densidade é uma característica considerada complexa, sendo o resultado da combinação de fatores genéticos e ambientais. Assim como as características anatômicas, a densidade da madeira pode variar entre gêneros, entre espécies de um mesmo gênero, dentro de uma mesma espécie e até mesmo entre diferentes partes de uma mesma árvore, seja no sentido longitudinal ou radial (SILVA et al., 2004). Além disso, as contrações podem variar mais de 10 vezes entre diferentes espécies florestais e cerca de duas vezes dentro de uma mesma espécie (STAMM, 1964). Na base da árvore, encontra-se a madeira mais densa, com diminuição gradual à medida que se desloca em direção à copa da árvore (DESCH; DINWOODIE, 1981).

A densidade da madeira é determinada principalmente pela espessura da parede celular e, portanto, pode-se supor que as madeiras com altos valores de densidade tenham fibras de paredes grossas, ao passo que as de valores baixos para esta propriedade física tenham fibras de paredes finas (CHOWDHURY et al., 2012).

A densidade da madeira pode variar de 0,13 a 1,40 g.cm⁻³ (BURGER; RICHTER, 1991), e pode ser dividida em grupos, como no estudo da classificação da densidade de espécies florestais da Amazônia, em que foram utilizados três grupos de densidade, sendo ela: leve (menor que 0,5 g.cm⁻³), moderadamente pesada (0,5 a 0,8 g.cm⁻³) e pesada a muito pesada (maior que 0,8 g.cm⁻³) (FERRAZ et al., 2004). Sendo assim, é possível encontrar espécies com densidade baixa, como a madeira de Paricá (*Schizolobium parahyba var. amazonicum*), com valor de 0,30 g.cm⁻³ (ALMEIDA et al., 2013), e espécies com alta, como o Cumaru (*Dipteryx odorata*), com 0,92 g.cm⁻³ (CATANHEDE; GARCÍA; DÍAZ, 1997).

As principais causas dessas variações são ocasionadas por ações indiretas, como a modificação de outras características da própria madeira ou, ainda, modificações que o próprio ambiente exerce sobre o crescimento e desenvolvimento da árvore (LATORRACA; ALBUQUERQUE, 2000).

Além das diferenças já citadas, Cruz et al. (2003), em estudo com sete clones de *Eucalyptus*, verificou a existência de variações radiais nas toras, na direção

medula-casca, e que essa variação é maior do que as variações na direção da base para o topo das árvores, tanto para propriedades físicas quanto para as mecânicas. Assim, Valente et al. (2013) também verificaram que as propriedades físicas da madeira de angico-vermelho (*Anadenanthera peregrina*) apresentaram padrões de variação mais evidentes no sentido radial, porém não observaram padrão definido de variação no sentido longitudinal. No entanto, Araújo et al. (2016), estudando a espécie pau-mulato (*Calycophyllum spruceanum*), verificaram que não ocorreram diferenças na densidade tanto em função da posição no fuste como em função do diâmetro.

3.1.2 Retratibilidade

A madeira é um material altamente higroscópico e a perda ou absorção de umidade abaixo do PSF resulta em contração e inchamento, respectivamente, provocando variações em termos dimensionais (BURGER; RICHTER, 1991). Além disso, quando há uma diminuição da umidade da madeira, ocorre tanto a perda de massa quanto o volume, conhecida como retratibilidade volumétrica parcial ou simplesmente retratibilidade volumétrica (REZENDE; ESCOBEDO, 1988).

A variação da umidade no intervalo higroscópico de 0% de umidade até o ponto de saturação das fibras promove uma alteração das dimensões da madeira (LOGSDON; FINGER; PENNA, 2008). Isso ocorre devido à quantidade de água existente na parede celular, a qual tanto a contração quanto o inchamento podem causar deformações na madeira, acarretando a perda de qualidade do produto final (GLASS; ZELINKA, 2010).

A razão entre as contrações tangencial e radial é chamada coeficiente de anisotropia; e, quanto maior essa relação, maior será a tendência de se obter fendilhamento e empenamento. O valor ideal do coeficiente de anisotropia seria 1,0, pois indicaria que as alterações seriam iguais nos diferentes sentidos, mas isso não pode ser observado para a madeira (MORESCHI, 2009), e, quanto mais próximo estiver de 1,0, maior será a estabilidade dimensional da madeira (OLIVEIRA; SILVA 2003).

Como exemplo de alterações dimensionais, o estudo realizado por Logsdon, Finger e Borges (2008) demonstra que a madeira de peroba-mica (*Aspidosperma populifolium*) é considerada normal e pode ser utilizada na fabricação de móveis que

aceitem pequenos empenamentos, como mesas, cadeiras, estantes. Essa indicação tem como base os coeficientes de anisotropia dimensional realizados para essa espécie, cujos valores obtidos no inchamento (1,9803) e na retração (1,9131) demonstram que a espécie pode ser indicada para os diversos usos. Os mesmos autores também avaliaram os coeficientes de anisotropia dimensional de inchamento (2,0945) e retração (1,9965) da madeira de Cedro-marinho (*Guarea trichilioides*), sinalizando a espécie como normal, com indicações de uso na fabricação de móveis que aceitem pequenos empenamentos, como mesas, cadeiras, estantes, entre outros.

As alterações dimensionais da madeira podem ocorrer de forma diferente, devido a apresentar estruturas desuniformes nos planos de corte, em que a maior alteração ocorre no plano tangencial, seguido do plano radial, e, por fim, no plano longitudinal, mas essas alterações neste plano são geralmente mínimas, não oferecendo empecilhos quanto ao uso da madeira (MELO et al., 2008). Poubel et al. (2011) avaliaram o *Eucalyptus pellita* quanto à estrutura anatômica e às propriedades físicas da madeira e verificaram que a contração volumétrica tendeu a diminuir com o aumento da largura dos raios e com a redução do comprimento dos vasos.

Existe uma variação nas características de retração da madeira de espécie para espécie. No modo de secagem e no comportamento da madeira, eles são diferentes e podem promover alterações da forma, como a formação de rachaduras e empenamentos. (OLIVEIRA; TOMAZELLO FILHO; FIEDLER, 2010).

Almeida (2006), em seu estudo sobre o efeito dos elementos anatômicos na retração de espécies de madeiras de folhosas tropicais e temperadas, mostrou que o diâmetro do lume das fibras foi um fator importante para elucidar a estabilidade dimensional das madeiras estudadas. Além disso, o autor verificou influência da dimensão dos vasos na retratibilidade, em que espécies que apresentam elementos de vasos com maiores dimensões possuem menor retratibilidade.

Durlo e Marchiori (1992) apresentaram critérios de classificação da madeira quanto ao coeficiente anisotrópico: com valores entre 1,2 e 1,5, a madeira é considerada excelente; com valores entre 1,6 a 1,9, normal; e, acima de 2,0, de baixa qualidade. Os mesmos autores, na pesquisa realizada por eles, classificaram as seguintes espécies estudadas como excelentes: madeiras de cedro (*Cedrella fissilis*), sucupira (*Bowdichia* spp.), mogno (*Swietenia macrophylla*) e balsa

(*Heliocarpus popayanensis*); normais: ipê (*Tabebuia* spp.), pinus, araucária (*Araucaria angustifolia*), peroba-rosa (*Aspidosperma polyneuron*) e teca (*Tectona grandis*); e ruins: imbuia (*Ocotea porosa*), álamo (*Populus tremuloides*) e jatobá (*Hymenaea courbaril*).

Assim como Durlo e Marchiori (1992), Almeida (2013) também classificou, em seu estudo, sete espécies tropicais. Dentre as espécies, a madeira de tauari (*Couratari* sp.) e a de ipê (*Handroanthus* spp.) foram consideradas como de excelente estabilidade; já as madeira de guajuvira (*Cordia* sp.) e de muiracatiara (*Astronium lecointe*) foram consideradas como normais; e a madeira de amendoim (*Pterogyne nitens*), e a de jatobá (*Hymenaea courbaril*) foram consideradas de baixa estabilidade.

A madeira de teca (*Tectona grandis*) apresenta alta estabilidade dimensional, o que justifica a sua ampla utilização. Os valores encontrados para a retração radial, tangencial e volumétrica foram de 1,99%, 3,81% e 6,21%, respectivamente, permitindo o seu uso para a produção de produtos que não toleram empenamentos e torções, como janelas, móveis, pisos, entre outros (LOIOLA, 2015).

3.2 PROPRIEDADES QUÍMICAS DA MADEIRA

As propriedades químicas têm influência na escolha da madeira para determinadas finalidades, pois algumas propriedades organolépticas são determinadas pela presença de substâncias químicas (SILVA et al., 2017). Em relação à composição química elementar da madeira, esta é constituída basicamente por 50% carbono, 44% oxigênio e 6% hidrogênio, valores que não se alteram muito em função da espécie (PETTERSEN, 1984). A variação na composição elementar da madeira se manterá quase que constante independente da espécie, das diferenças genéticas ou da idade (PENEDO, 1980).

A madeira é definida quimicamente como um biopolímero tridimensional, pois é formada por celulose, hemicelulose e lignina, as quais são denominadas componentes fundamentais. Além desses componentes, encontram-se outras substâncias, tais como os extrativos e os materiais inorgânicos, mas em menor quantidade (ROWELL et al., 2005). A diversidade das propriedades (morfológicas, físicas, mecânicas e biológicas), quando avaliadas do ponto de vista químico,

explica esta variação da composição e da organização dos componentes de alto e baixo peso molecular na ultraestrutura da madeira (PALA, 2007).

Sendo assim, toda madeira é composta de celulose, hemicelulose, lignina, extrativos e pequeno teor de minerais, mas apresenta variação em sua quantidade, e certas características intrínsecas de diferentes espécies têm estreita relação com a composição química da madeira. Dentre os componentes da madeira, a celulose é o principal, com valores entre 40% e 50% da constituição química da madeira (KLOCK et al., 2005). A celulose é caracterizada por ser um homopolímero de estrutura linear com elevado grau de polimerização (FENGEL; WEGENER, 1984).

Diferente da celulose, as hemiceluloses - ou polioses - são heteropolissacarídeos altamente ramificados, amorfos e com baixo grau de polimerização, apresentando, em sua constituição, a presença de diferentes unidades de açúcares (SJOSTROM, 1993); além disso, estão intimamente associados à celulose nos tecidos das plantas (FENGEL; WEGENER, 1989). As espécies de folhosas, de maneira geral, contêm maior teor de polioses que as coníferas, e sua a composição é diferenciada (KLOCK et al., 2005).

A lignina é uma macromolécula amorfa, composta basicamente por unidades de fenilpropano, contendo subestruturas fenólicas (10-20%) e não fenólicas (80-90%) (FENGEL; WEGENER, 1984). A lignina é incorporada durante o desenvolvimento das células, sendo o último componente da parede, interpenetrando as fibrilas e, assim, fortalecendo e enrijecendo as paredes celulares (KLOCK et al., 2005). A macromolécula apresenta um importante papel no transporte de água, de nutrientes e de metabólitos; protegendo os tecidos contra o ataque de microrganismos, é responsável pela resistência mecânica de vegetais. Isso ocorre devido à estrutura da lignina poder se relacionar de acordo com a sua natureza fenólica, o que promove o aumento da rigidez da parede celular, a diminuição da permeabilidade da madeira e a proteção dela contra agentes xilófagos (KLOCK et al., 2005).

Os extrativos são os componentes não estruturais da madeira, e geralmente estão concentrados no cerne e são biossintetizados com a árvore em pé (TAYLOR et al., 2002). Esses componentes são considerados constituintes secundários, possuindo baixa massa molecular, sendo solúveis em água ou em solventes orgânicos neutros (BUCHANAN, 1981; MORAIS et al., 2005; OLIVEIRA et al., 2005). Os extrativos são os principais responsáveis pela resistência ao ataque de insetos e

fungos; apesar de estarem presentes, na madeira, em pequenas quantidades, entre 1 e 10%, de modo geral, esses extrativos apresentam grande influência em diferentes propriedades na qualidade de processamento das madeiras (BUCHANAN, 1981; OLIVEIRA et al., 2005). Assim, os extrativos da madeira contribuem para a sua durabilidade sem adição de qualquer preservante (KIRKER et al., 2013).

Algumas madeiras podem ser caracterizadas pela natureza e quantidade de seus extrativos, uma vez que existe uma variação nas proporções e, muitas vezes, esses componentes são encontrados em quantidades significativas somente em algumas espécies ou gêneros (KLOCK et al., 2005). Longuiet et al. (2010) verificaram que, para a espécie pau-jacaré (*Piptadenia gonoacantha*), também ocorre variação no teor de extrativos, com um aumento significativo no sentido medula-casca.

De acordo com a classificação de Lepage (1986), de um ponto de vista químico, pode-se dividir os extrativos em: terpenos, compostos alifáticos, compostos fenólicos e substâncias inorgânicas, além de algumas frações de carboidratos (mono e dissacarídeos) e compostos nitrogenosos (proteínas e aminoácidos).

Além dos extrativos que são substâncias de material orgânico temos também os inorgânicos. Esses são obtidos das cinzas da madeira, e os principais íons minerais normalmente encontrados são: cálcio, magnésio, potássio (FREDDO, 1997); ainda, fora estes, temos também os íons em baixas quantidades, tais como: sódio, manganês, alumínio, ferro; e alguns radicais, como: silicatos, carbonatos, cloretos, sulfatos. Encontram-se também outros elementos, como zinco, cobre e cromo, dentre outros. Essa variação ocorre de acordo com a espécie, a necessidade individual, a disponibilidade no solo e a época do ano.

3.3 SECAGEM

A secagem da madeira é o processo que consiste na redução da umidade, com o objetivo de atingir um teor pré-determinado, com o mínimo de defeitos, no menor tempo possível, e de modo economicamente viável para o uso a que se destina (MARTINS, 1988). Do ponto de vista físico, a secagem da madeira pode ser definida como um balanço dinâmico entre a transferência de calor do ar para a

madeira, a evaporação superficial, a difusão de umidade através da madeira e o fluxo de massa da água capilar (HART, 1965).

De acordo com Kollmann e Côté (1968), Siau (1971) e Skaar (1988), entre outros, existem diferentes formas de água na madeira, sendo que as principais são a água capilar e a higroscópica. A primeira está no estado líquido, contida nos espaços intra e intercelulares, principalmente no lume dos vasos, das fibras, dos traqueídeos e de outros elementos anatômicos. A segunda está absorvida na superfície e no interior da parede celular, ligada aos componentes básicos da madeira, sobretudo por pontes de hidrogênio.

Durante a secagem, é possível dizer que os mecanismos de movimentação por difusão de vapor d'água e de água higroscópica são realizados simultaneamente (OLIVEIRA, 1981).

Madeiras com maior densidade são de secagem mais difícil quando comparadas com as de menor densidade. Isso é explicado porque as primeiras possuem a parede celular mais espessa e um lume de menor volume, contendo uma quantidade maior de água higroscópica, cuja movimentação é mais lenta. Por outro lado, as de menor densidade possuem uma maior quantidade de água no estado líquido (RASMUSSEN, 1961). Para Hart (1965), o tempo de secagem da umidade superficial é diretamente proporcional à densidade e, na difusão da umidade do interior da madeira até sua superfície, é diretamente proporcional ao quadrado da densidade.

O processo de secagem em estufa é influenciado pela própria madeira utilizada, além da temperatura, umidade relativa e velocidade do ar no interior da câmara de secagem. As madeiras de maior densidade e as peças com maior espessura necessitam de mais tempo para secar. Embora os métodos para secar madeira não tenham mudado significativamente ao longo da última década, houve muitos avanços na melhoria da tecnologia e na compreensão do processo (BOND; ESPINOZA, 2016).

Almeida et al. (2007) analisaram a distribuição de água em madeira com vários níveis de umidade de equilíbrio. Os autores observaram que a água capilar ainda estava presente no volume vazio da madeira em valores baixos de umidade de equilíbrio. Mesmo em condições equilibradas, existe uma região onde a perda de água líquida e de água da parede celular ocorre simultaneamente, a depender das características de cada madeira.

3.3.1 Taxa de secagem

A quantidade de água retirada em um determinado intervalo de tempo, em relação à área de evaporação da madeira, é denominada taxa de secagem. Por meio da taxa de secagem, pode-se determinar o tempo de secagem de uma madeira desde o início do processo (madeira verde) até o seu final (teor de umidade requerido). O tempo de secagem é influenciado por fatores da própria madeira e inerentes ao ambiente em que a madeira está condicionada (SANTINI, 1980).

Para Martins (1988), a densidade está relacionada com a permeabilidade da madeira, que é um dos fatores que mais influenciam na secagem. Contudo, para Andrade (2000), essa afirmativa é discutível, visto que uma maior densidade implica em maior espessura da parede celular e, conseqüentemente, menor volume do lume. Desse modo, madeiras de maior densidade possuem maior quantidade de água higroscópica, cuja movimentação é mais lenta. Por outro lado, uma menor densidade indica uma maior quantidade de água no estado líquido, cuja movimentação depende principalmente do raio dos capilares, através dos quais se verifica o escoamento do fluido. Devido à estrutura do material madeira, os capilares de menor raio serão as pontoações que interligam os lumes dos diversos elementos anatômicos.

Embora a densidade seja muito utilizada para inferir no processo de secagem, o teor de umidade inicial e a taxa de secagem são aspectos muito importantes que devem ser levados em consideração. Steiner et al. (2011) estudaram os efeitos da velocidade do ar para determinar quando e quanto pode ser reduzida sem afetar a taxa de secagem da madeira de spruce (*Picea abies*) da Noruega, seca a 70°C. Eles determinaram que uma redução da velocidade do ar muito cedo ou muito nítida resulta em uma taxa de secagem reduzida e grande variação no teor de umidade. No entanto, uma redução na velocidade do ar pode ocorrer em 40 e 20% de teor de umidade, sem mudanças consideráveis no cronograma de secagem, mas resultou em um aumento na variação final do teor de umidade.

Além disso, a espessura das peças também influencia no processo, porque o incremento na espessura implica também no aumento da proporção entre a massa de água a ser retirada e a superfície de evaporação, tornando o processo mais lento. De acordo com Tomaselli (1980), a velocidade de secagem é inversamente

proporcional à espessura das tábuas. Rasmussem (1961) complementa que as peças mais espessas tendem a apresentar mais defeitos.

3.3.2 Secagem em estufa convencional

De acordo com Andrade (2000), a secagem em estufa convencional é considerada uma etapa crítica no beneficiamento da madeira, visto que requer um investimento inicial considerável e apresenta um custo operacional relativamente significativo. Aliado a isso, o elevado nível de perdas, em virtude da falta de informações sobre as espécies e sobre os procedimentos adequados para essa etapa, revela a dificuldade em conduzir a secagem, sobretudo para espécies cujas informações são escassas ou para madeiras refratárias.

Cada espécie, ou tipo de madeira, apresenta comportamento particular durante a secagem, por isso é tão importante o uso da secagem artificial, a qual promove o equilíbrio entre a velocidade de evaporação da água na superfície da madeira, a taxa de movimentação interna (tanto de calor quanto de umidade) assim como também as reações da madeira durante o processo. Além disso, promove a secagem o mais rápido possível com um nível de perdas ou um padrão de qualidade aceitável para o produto que se pretende (JANKOWSKY, 1995).

As espécies de madeira mais densas são mais difíceis de secar e são mais susceptíveis a defeitos (SIMPSON; BAAH, 1989); apresentam menor teor de umidade capilar, demandando menor tempo de secagem, até atingir 30% de umidade, e maior tempo, entre 30 e 12%, de umidade em relação a espécies com menor densidade (MARQUES, 2008). Silveira, Rezende e Vale (2013), citam que madeiras que possuem maior densidade necessitam de maiores cuidados no processo de secagem para evitar defeitos na madeira.

A secagem convencional de madeiras utilizando estufas emprega temperaturas que variam entre 45 e 90°C (SIMPSON, 1991), dependendo de uma série de aspectos, como a espécie utilizada, o teor de umidade desejado, a espessura da madeira, a qualidade desejada, entre outros. Segundo Tuset e Duran (1986), a secagem em estufa apresenta como principais vantagens: independência das condições climáticas, menor duração em relação à secagem ao ar livre, maior controle sobre os defeitos e umidade final, adequação a todo tipo de madeira, e

ampla experimentação disponível. Devido a estas vantagens, a secagem em estufa é o processo mais empregado industrialmente no Brasil.

A secagem convencional caracteriza-se por utilizar câmaras que dispõem de um sistema de aquecimento, um sistema de umidificação do ar, um conjunto de “*dampers*” – que permitem a troca de ar entre o interior do secador e o meio externo –, e um sistema de ventilação que promove a circulação do ar entre as peças de madeira em secagem (MARTINS, 1988). A secagem da madeira se realiza seguindo um programa previamente estabelecido, com etapas progressivamente mais secas e quentes. O controle das condições climáticas é realizado mediante termômetros de bulbo úmido e seco (psicrômetro) e sensores do equilíbrio do conteúdo de umidade que permitem conhecer a temperatura e a umidade relativa do ar dentro da estufa (KLITZKE, 2005).

O processo de secagem artificial nas indústrias brasileiras é uma etapa crítica dentro do processamento e beneficiamento da madeira, pois se trata de uma operação que requer considerável investimento prévio e representa parcela significativa do custo operacional. O nível de perdas de madeira gerado pela falta de informações sobre as espécies e as secagens mal conduzidas é elevado. Além disso, quando o processo é realizado em secadores adequados e conduzido de maneira correta, obtém-se considerável redução do tempo de secagem e maior controle sobre os defeitos (ANDRADE, 2000).

3.3.3 Defeitos de secagem

A retirada da água do interior da madeira provoca o aparecimento de esforços internos, causados pela tensão capilar e pela retração volumétrica, resultando, na maioria das vezes, em defeitos de secagem (BRANDÃO, 1989; DURAND, 1985; SIMPSON, 1992). Complementarmente, conhecer o comportamento da madeira, quando exposta às condições de secagem, também traz benefícios para o controle dos defeitos que surgem (MARQUES, 2008).

O nível de tensão de secagem depende de vários fatores, tais como: padrões de corte e dimensões da madeira, permeabilidade e difusividade da madeira, coeficientes de contração, rigidez, e propriedades da madeira (PANG, 2007). Portanto, de acordo com Brandão (1989), o defeito de secagem é toda e qualquer

alteração que venha a ocorrer na estrutura da madeira, dificultando seu reprocessamento em uma fase posterior.

Os defeitos resultantes da secagem, além de reduzirem o valor de mercado da madeira, geram desinteresse quanto à utilização de espécies refratárias. Esse fato contribui, em parte, para a exploração seleta e de um pequeno número de espécies (MARTINS, 1988). De acordo com Santini (1992), para obtenção de um maior valor agregado da madeira serrada, é de grande importância adotar procedimentos adequados de secagem, como baixas temperaturas e alta umidade relativa nas etapas iniciais, visando minimizar a incidência de defeitos.

De acordo com Hildebrand (1970) e Galvão e Jankowsky (1985), para reduzir o período de secagem e minimizar os defeitos, a recomendação geral é secar uma espécie por vez, com peças de mesma espessura e qualidade. Além disso, a madeira da carga deve ter, aproximadamente, a mesma umidade no início da secagem. Então, o cronograma de secagem, o teor de umidade da madeira, a microestrutura de diferentes espécies de madeira e a dimensão das amostras testadas irão influenciar na formação de fissuras na madeira durante a secagem (OLTEAN; TEISCHINGER; HANSMANN, 2007). As rachaduras de superfície, desenvolvidas durante os primeiros estágios de secagem ou mesmo durante o aquecimento, geralmente são muito pequenas e não visíveis a olho nu, mas podem crescer em fissuras visíveis mais profundas e mais longas em um estágio posterior (HANHIJÄRVI et al., 2003).

Para Ponce e Watai (1985), outra recomendação durante a secagem seria a seleção e o uso adequado dos separadores que reduzem sensivelmente os empenamentos das tábuas, favorecendo que a secagem transcorra de maneira mais rápida e uniforme. Para reduzir os empenamentos das tábuas durante a secagem, as fileiras de separadores devem ser alinhadas verticalmente.

De acordo com Mendes et al. (1998), os principais defeitos gerados durante o processo de secagem são os empenos, as rachaduras, o colapso e o endurecimento superficial. De acordo com Oliveira (1981) e Galvão e Jankowsky (1985), as rachaduras aparecem como consequência da diferença de retração nas direções radial e tangencial da madeira, e da diferença de umidade entre regiões contíguas de uma peça, durante o processo de secagem. Santini (1992) complementa afirmando que as rachaduras são separações dos elementos constituintes da madeira no sentido longitudinal da grã.

Existem três tipos de rachaduras: de topo, superficiais e internas. As rachaduras superficiais e de topo ocorrem nos estágios iniciais, devido aos gradientes de umidade (DENIG et al., 2000), enquanto as rachaduras internas manifestam-se ao final do processo, geralmente associadas ao prolongamento das rachaduras superficiais (SANTOS, 2002).

As rachaduras de superfície ocorrem com maior frequência em tábuas orientadas tangencialmente (SIMPSON, 1991). Melo (1999) afirma que as rachaduras surgem, no decorrer da secagem, sempre que existe um elevado gradiente de umidade entre a parte central e a superfície da madeira, e se desenvolvem forças de tração, em virtude da contração abaixo do PSF. Normalmente, as rachaduras superficiais ocorrem nos tecidos que compõem os raios, os quais são constituídos de células parenquimáticas (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

As rachaduras de topo ocorrem em razão do gradiente de umidade que se forma ao longo do comprimento da peça, visto que os topos das tábuas secam mais rapidamente do que o meio, desenvolvendo tensões nos topos (SIMPSON, 1991).

Madeiras com altos teores de umidade levam mais tempo para secar e são, frequentemente, mais suscetíveis a alguns defeitos de secagem (SIMPSON, 1991). Gradientes muito elevados de umidade da madeira se constituem em uma das causas de defeitos de secagem, como os empenamentos e rachaduras (OLIVEIRA; HELLMEISTER; TOMAZELLO FILHO, 2005).

Sinteticamente, Oliveira (1981) define o empenamento como qualquer distorção ocorrida na madeira em relação ao seu plano original. Rasmussen (1961), Pratt (1974), Oliveira (1981), Galvão e Jankowsky (1985), Martins (1988), dentre outros citam que existem cinco formas comuns de empenos:

- a) Arqueamento: causado pela diferença na contração longitudinal entre as laterais da mesma peça de madeira;
- b) Encurvamento: também ocorre devido às diferenças de retração nas faces da peça quando uma delas sofre mais secagem do que a outra, às irregularidades da grã e às tensões desenvolvidas durante o crescimento da árvore;
- c) Encanoamento: manifesta-se quando ocorre secagem mais rápida de uma face ou quando uma face se contrai mais do que a outra, mesmo com secagem uniforme, devido ao plano em que foi feito o corte da peça de madeira (radial ou tangencial);

d) Torcimento: as causas podem ser as mesmas do encanoamento, podendo também ser gerado pela combinação de contrações diferentes e desvios da grã (espiralada, diagonal, intercruzada, ondulada);

e) Forma diamante: defeito característico de peças com secção quadrada, resultante da diferença entre as contrações tangencial e radial, quando os anéis de crescimento vão, diagonalmente, de um canto ao outro da secção.

Oliveira (1981) recomenda que as técnicas de prevenção dos empenamentos sejam iniciadas após a operação de desdobro. Na preparação das pilhas para secagem, recomenda-se a formação de pilhas planas, utilizando separadores com idênticas dimensões e observando o correto posicionamento dos mesmos.

Mudanças bruscas de temperatura e umidade relativa podem favorecer os aparecimentos de defeitos (ANDRADE, 2000). O colapso é um defeito que acontece frequentemente em madeiras com teor de umidade alta, ocorrendo acima do ponto de saturação das fibras e, por isso, se dá, geralmente, no início da secagem (KEEY et al., 2000), no qual a remoção da água livre do lúmen é muito rápida, o que resulta em colapso da célula devido às forças capilares. O colapso, então, caracteriza-se por ser uma forma de contração anormal e irregular, o qual se manifesta durante a retirada da água capilar, resultando na deformação interna das células (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968; SANTINI, 1992). Yang et al. (2014) realizaram pesquisas com *Eucalyptus urophylla* e, ao secar, com o uso de um processo de secagem intermitente (secagem seguida de temperatura mais baixa e períodos mais altos de umidade), foi observada a diminuição do encolhimento total e do colapso em um terço, em comparação com um processo de secagem contínua. No entanto, isso requer um tempo de secagem total mais longo.

De acordo com Jankowsky (1995), o colapso trata-se de uma retração anormal da madeira, caracterizado por ondulações nas superfícies das peças, as quais podem se apresentar bastante distorcidas. A principal causa do colapso é a tensão capilar, que se manifesta nas fases iniciais de secagem, quando a umidade da madeira está acima do PSF. Além disso, o pequeno diâmetro dos capilares e das pontoações, as elevadas temperaturas no início da secagem, a elevada densidade da madeira e a alta tensão superficial do líquido removido da madeira colaboram para o desenvolvimento do colapso celular.

Redman et al. (2016) obtiveram resultados indicando que, quando comparamos certos dados relacionados à degradação de secagem, é possível

explicar a dificuldade observada na secagem para diferentes espécies, sendo que as características geométricas da fibra podem ser usadas para fornecer uma indicação de propensão ao colapso. Por isso, é considerado um defeito grave que deve ser evitado, se possível. O uso de programas de secagem especiais, planejados para minimizar esse defeito, é recomendado (SIMPSON, 1991).

3.4 AGRUPAMENTO DE ESPÉCIES PARA SECAGEM

O conhecimento das características da madeira das diferentes espécies utilizadas será fundamental para, posteriormente, serem indicadas as suas aplicações e usos comuns; porém, a caracterização tecnológica da madeira geralmente a restringe para apenas uma ou poucas variáveis, sejam anatômicas, químicas, físicas ou mecânicas. Existem várias espécies comercialmente desconhecidas com densidade e propriedades mecânicas equivalentes a muitas das espécies comercialmente conhecidas (NASCIMENTO; GARCIA; DIÁZ, 1997). Por esses motivos, torna-se importante o conhecimento das relações funcionais dessas propriedades, possibilitando a classificação e o agrupamento das espécies (ARAÚJO, 2007).

De acordo com Andrade (2000), cada espécie ou tipo de madeira apresenta comportamento próprio durante o processo de secagem; entretanto, existem espécies com características similares e que podem ser agrupadas em um mesmo programa de secagem. Sabe-se que, na região Amazônica, são inúmeras as espécies exploradas, o que dificulta o processo de secagem, quando realizado com uma espécie por câmara de secagem, demonstrando que ocorre a necessidade de agrupar as espécies que possuem características semelhantes. O agrupamento de espécies com as mesmas características, para compor cargas que preencham todo o volume da câmara de secagem industrial, é uma das alternativas para esta situação.

O agrupamento das espécies pode ser realizado de diversas formas e utiliza-se de várias características, tais como densidade, grã, textura, além de aspectos anatômicos, teor de umidade inicial, permeabilidade da madeira a fluidos, retração transversal e radial, taxa de secagem e defeitos de secagem (ANDRADE et al. 2001; MARQUES, 2008). Dentre as características utilizadas para agrupar espécies, a densidade e o teor de umidade são as variáveis mais fáceis de determinar e as que

mais influenciam a secagem da madeira; todavia, apresentam certa restrição quanto a sua eficiência (SIMPSON; BAAH, 1989; NASCIMENTO et al., 1997). O agrupamento de espécies com base na densidade e no teor de umidade é uma prática comum em muitos países e essencial para o uso significativo da madeira (DÁVALOS; BÁRCENAS, 1999; ALI et al., 2008).

Simpson e Baah (1989) afirmam que o agrupamento de espécies deve ser considerado como alternativa pelas indústrias, pois o fornecimento de matéria-prima, principalmente da floresta tropical, está ficando comprometido devido às crescentes dificuldades para a exploração das reservas existentes. Para as empresas, essa possibilidade apresenta vantagens, como redução do estoque, pois deixa de ser necessário manter estoques elevados para carregar o secador com material homogêneo, além de favorecer a utilização de um número maior de espécies, incluindo as não tradicionais ou de baixa frequência na floresta.

O agrupamento de madeiras pode ser procedido de diversas formas; dentre as principais, destaca-se três métodos empregados: realizado com base na experiência e no tempo de secagem; com base nas propriedades anatômicas, físicas e de secagem; e através da secagem drástica. Independente do método empregado, todos buscam relações entre características de diferentes espécies que permitam formar grupos para que a secagem ocorra de modo conjunto.

Nascimento, Garcia e Diáz (1997) agruparam 87 espécies madeireiras da Amazônia em cinco grupos diferentes por meio de análise multivariada. No estudo, os autores utilizaram espécies desconhecidas com propriedades equivalentes às espécies comercialmente conhecidas, em função da densidade básica e das propriedades mecânicas. Estudos semelhantes também foram desenvolvidos por Chowdhury et al. (2013), utilizando 79 espécies de árvores das florestas de Bangladesh, onde as espécies de madeira foram categorizadas em quatro grupos diferentes com base nas propriedades de densidade e de resistência mecânica. Os pesquisadores buscaram promover espécies de Bangladesh, selecionando madeiras menos conhecidas na indústria madeireira, mas potencialmente adequadas para usos versáteis, incluindo materiais estruturais.

De acordo com Andrade, Jankowsky e Ducatti (2001), é possível agrupar espécies em um mesmo programa de secagem; entretanto, devem-se levar em consideração algumas características específicas, tais como: o teor de umidade inicial; a velocidade de secagem; e a tendência aos defeitos. Além dessas

características, Lobão et al. (2010) mostraram também que as dimensões de fibras, diâmetro, frequência, porcentagem dos vasos e densidade são parâmetros de qualidade e de uso final da madeira, os quais permitem o agrupamento de espécies por meio de similaridades. As madeiras foram distribuídas em quatro diferentes grupos, sendo eles distribuídos nas diferentes formas de uso, que vão desde materiais esportivos e aeromodelismo até pisos e construção civil pesada.

A análise estatística multivariada é muito utilizada quando o objetivo da pesquisa científica é o agrupamento (JOHNSON; WICHTERN, 1988). Isso foi verificado por Lobão et al. (2011), os quais demonstraram que as características e os testes estatísticos de Análise de Componentes Principais (multivariada) são mais eficientes do que o Teste Scott-Knott (univariada) no agrupamento e na preconização do uso da madeira de espécies nativas e exóticas.

No trabalho realizado por Melo et al. (2013), os autores comprovaram a eficiência do agrupamento das propriedades físicas e mecânicas da madeira de diferentes espécies florestais. No estudo, foram avaliadas 30 espécies e as inter-relações destas por análises de similaridade; na análise de inter-relações entre as propriedades, a densidade foi a que obteve o maior número de correlações significativas. Contudo, a densidade, isoladamente, não é um bom parâmetro para indicação de programas e de grupamento de espécies para secagem (ANDRADE; JANKOWSKY; DUCATTI, 2001).

Como a madeira é um material com elevada complexidade, não devemos levar em consideração os parâmetros isolados, pois não seria suficiente para uma indicação do emprego adequado do material. Sendo assim, a solução mais adequada para o uso da madeira é a determinação de diversas propriedades e a sua análise conjunta (MELO et al., 2010).

Cada espécie, ou tipo de madeira, apresenta comportamento particular durante a secagem. Existem espécies, no entanto, com características similares que, a princípio, poderão ser agrupadas em um único programa de secagem, tornando-se uma alternativa para as indústrias (LOUZADA; MARCOS; SILVA, 2002). É possível, também, o agrupamento de diferentes tipos de material. Estudos realizados por Klitzke et al. (2008), com a espécie *Hymenaea sp*, demonstraram que, a partir de algumas características das fibras e propriedades físico-químicas da madeira, é possível fazer este agrupamento para a secagem com lenhos de transição, ou seja,

que possuem tanto cerne quanto alburno, e madeiras apenas com cerne, para a secagem em uma mesma carga da madeira.

3.5 ELABORAÇÃO DE PROGRAMAS DE SECAGEM

Uma das metodologias mais difundidas para elaboração de programas de secagem baseia-se na hipótese formulada por Terazawa (1965), cuja metodologia foi desenvolvida por Brandão (1989), adaptada por Ciniglio (1998) e utilizada por diversos autores (ANDRADE, 2001; ARRUDA, 2014; BARBOSA et al., 2005; ELEOTÉRIO; SILVA, 2012; ELEOTÉRIO; LOIOLA, 2015; SILVA, 2014; SUSIN, 2012), que consiste na aplicação da secagem drástica a 100°C.

Essa foi uma alternativa de resolver, de forma prática, o problema de secagem; pesquisadores têm desenvolvido diversas pesquisas em escala laboratorial com o objetivo de reproduzir o comportamento da secagem convencional em escala industrial (ANDRADE et al., 2001; BARBOSA et al., 2005; BATISTA et al., 2012; CINIGLIO, 1998; MATTOS et al., 1999; SANTOS, 2002). Estes autores têm seguido a mesma linha da pesquisa de Terazawa (1965), o qual preconizou que pequenas amostras de madeira submetidas à secagem drástica apresentam defeitos em nível proporcional aos que ocorreriam durante a secagem convencional.

É através dessas pesquisas, com pequenas amostras de madeira submetidas à secagem a 100 °C em estufas de esterilização, que se obtêm curvas de secagem das espécies, além de informações para a elaboração de programas de secagem, tais como temperatura inicial, temperatura final e potencial de secagem.

Um programa de secagem consiste em um plano para se aplicar a combinação adequada de temperatura e umidade relativa à carga de madeira na estufa, visando reduzir a umidade da madeira até um teor pré-determinado, com o mínimo de defeitos (MARTINS, 1988; GALVÃO; JANKOWSKY, 1985). Já para Oliveira (1981), o programa de secagem é uma sequência de interferências ou ações que são realizadas durante a secagem por meio dos controles da temperatura e da umidade relativa. O programa de secagem é elaborado experimentalmente, sendo seus objetivos a secagem rápida da madeira e a garantia de qualidade do material ao final da secagem.

Entre as metodologias para a elaboração de programas de secagem, destacam-se aquelas baseadas em equações empíricas, cuja variável independente

é a densidade, e as baseadas na avaliação da secagem de pequenas amostras em condições drásticas, considerando parâmetros como rachaduras, velocidades e taxas de secagem.

Eleotério et al. (2015) verificaram que a secagem drástica permite a definição de programas de secagem para madeira de eucalipto de diferentes espécies, mas se deve levar em consideração o comportamento da espécie durante a secagem, já que as temperaturas iniciais recomendadas em sua pesquisa variaram em função da espécie.

Segundo Klitzke (2005), os programas de secagem modificam-se em função da espécie, da espessura e da qualidade desejada, e as mudanças de temperatura e umidade relativa dentro da estufa variam à medida que o teor de umidade médio da madeira reduz. A umidade relativa do ar e a temperatura são fatores fundamentalmente necessários para conduzir adequadamente a secagem. Para uma perfeita condução da secagem da madeira, o equipamento deverá ser capaz de manter as condições preestabelecidas pelo programa, e o operador deverá conhecer as características do material que irá secar e o funcionamento do equipamento.

Quando cargas heterogêneas forem submetidas à secagem, deve-se adotar o programa mais suave, isto é, o programa correspondente à madeira com maior dificuldade de secagem (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

De uma forma geral, podem ser conhecidas três fases distintas nos programas de secagem: fase de aquecimento inicial, fase de secagem propriamente dita, e fase de uniformização e condicionamento (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985). Os programas do tipo umidade-temperatura são os mais comuns na secagem convencional, nos quais a temperatura e a umidade relativa do ar no interior do secador são ajustadas em função do teor de umidade da madeira (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985; HILDEBRAND, 1970; PRATT, 1974). Os programas de secagem, de acordo com autores supracitados, apresentam, de modo geral, três fases diferentes, a saber:

1. Aquecimento: a madeira é aquecida sem começar o processo de secagem propriamente dito. Inicialmente, o ar é esquentado até atingir a temperatura desejada e a queda na umidade relativa é compensada com umidificação. Posteriormente, promove-se o equilíbrio térmico entre o ar e a madeira. Como nessa fase não é desejável que a madeira inicie o processo de secagem, utilizam-se umidades relativas elevadas (próximas a 100%);

2. Secagem propriamente dita: nessa fase, ocorre a retirada de umidade da madeira. Inicialmente, procede-se à remoção da água capilar, a baixas temperaturas e altas umidades relativas, para minimizar a ocorrência de colapso e rachaduras. A umidade relativa inicial dependerá da espécie em secagem. Recomenda-se que a temperatura inicial seja mantida até que toda a água capilar da madeira seja removida. A retirada da água higroscópica caracteriza-se pela elevação da temperatura com a redução simultânea da umidade relativa. O período de tempo a ser despendido com a remoção da água higroscópica irá variar de acordo com a densidade da espécie, a espessura das peças, a temperatura utilizada, o potencial de secagem e o gradiente de umidade;
3. Uniformização e condicionamento: são etapas para homogeneizar a umidade entre as peças e dentro das peças, respectivamente. Tem por objetivo eliminar/reduzir as tensões internas, por meio do umedecimento das camadas superficiais. As tensões internas podem ser eliminadas com a redução do gradiente de umidade.

Simpson e Verrill (1997) estudaram a possibilidade de empregar a densidade para elaborar programas de secagem. Em geral, os resultados obtidos foram satisfatórios; entretanto, os autores comentam a existência de exceções. Por essa razão, esse método de estimativa deve ser aplicado apenas quando não são conhecidas outras informações sobre a madeira.

Brandão (1989), a partir de estudos desenvolvidos por Terazawa (1965), propôs uma metodologia de indicação de programas de secagem baseada na relação entre os defeitos decorrentes de uma secagem a 100°C e os parâmetros do programa de secagem (temperatura inicial, temperatura final e potencial de secagem).

Ciniglio (1998) desenvolveu programas de secagem para *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, adaptando a metodologia descrita por Brandão (1989). Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, com reduzida ocorrência de defeitos. Outros autores utilizaram a mesma metodologia para o desenvolvimento de programas de secagem (ANDRADE et al., 2001; BARBOSA et al., 2005; KLITZKE; BATISTA, 2010).

No estudo realizado por Klitzke e Batista (2010), foi utilizada a metodologia da secagem drástica a 100 °C, associada a um método de caracterização de escores

de defeitos, aplicado em amostras de pequenas dimensões da madeira de *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*. Os autores esperavam que as amostras de madeira, quando submetidas a secagens drásticas, apresentassem comportamento proporcional à secagem convencional. No entanto, Batista et al. (2016), dando continuidade à pesquisa, verificou que o resultado está diretamente associado à densidade e à contração volumétrica total das espécies estudadas. Sendo assim, foi rejeitada a hipótese de se poder utilizar o escore de defeitos do ensaio de secagem drástica a 100°C como forma de prever a qualidade da secagem convencional das espécies estudadas, com base na metodologia utilizada. Contudo, os autores acreditam que, para pesquisas futuras, a hipótese ainda possa ser validada pela modificação da metodologia de obtenção do escore de defeitos da secagem convencional.

Em estudos realizados por Eleotério et al. (2015), avaliando a secagem drástica de madeiras de *Eucalyptus* e *Corymbia*, verificou uma relação inversa entre a densidade e o teor de umidade inicial, durante a caracterização das condições iniciais das amostras. Tal característica, com relação exponencial negativa entre a densidade e o teor de umidade inicial, já foi constatada por Simpson (1996). Para Gorvard e Arganbright (1979), o teor de umidade inicial é um dos parâmetros importantes que podem ser utilizados para calcular um índice que expressa a intensidade do programa de secagem utilizado.

CAPÍTULO I – PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DA MADEIRA

1 INTRODUÇÃO

O uso ao qual se destina a madeira exige distintos padrões de qualidade para a mesma, o que faz com que, para determinada finalidade, algumas características sejam mais relevantes. As propriedades físicas, químicas, anatômicas e mecânicas da madeira possuem relevância distinta em virtude da finalidade dada à madeira. Complementarmente, para Rezende (2003), o estudo das variações dimensionais nos diferentes sentidos da madeira apresenta importância considerável para a sua utilização industrial.

Como a madeira é utilizada para múltiplas finalidades, a densidade e a retratibilidade são as propriedades físicas consideradas de maior relevância. Todavia, Logsdon e Calil Junior (2002) salientam que as propriedades físicas da madeira dependem do seu teor de umidade, o que torna a sua secagem um processo importante para garantir a qualidade do produto madeireiro.

De acordo com Tsoumis (1991) e Nisgoski (1999), as propriedades químicas estão relacionadas aos componentes da madeira, entre eles os compostos elementares e acidentais, cuja quantidade é variável entre espécies e indivíduos de mesma espécie. Os componentes elementares correspondem à celulose, hemicelulose e lignina, enquanto os componentes acidentais englobam os extrativos e compostos minerais. Além disso, a soma da fração celulose e hemicelulose é denominada fração holocelulósica.

A madeira é considerada um material heterogêneo e as variações nas características físicas e químicas são expressivas entre espécies, embora também ocorra dentro da mesma espécie, principalmente em função da idade, dos fatores genéticos e dos ambientais. Sendo assim, é relevante conhecer as características de cada espécie para que todas as operações que envolvam a madeira, como processamento, secagem, colagem e aplicação de acabamentos, resultem em peças de qualidade elevada (DIAS JÚNIOR et al., 2013; DOWNES, 1997; SILVA 2002).

Diante da importância de conhecer as características da madeira de diferentes espécies, o presente capítulo tem como objetivo avaliar propriedades físicas e químicas de 12 madeiras amazônicas e agrupá-las com base em suas características.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 COLETA E PREPARO DO MATERIAL.

Para o presente estudo, foram utilizadas 12 espécies florestais madeireiras exploradas comercialmente por meio de planos de manejo florestal sustentável, os quais são aprovados pela Secretaria Estadual de Meio Ambiente do Estado de Mato Grosso. As espécies foram selecionadas de acordo com sua relevância e representatividade no mercado de madeiras do norte do estado de Mato Grosso. Ainda, buscou-se englobar, no presente estudo, espécies que, além de comercialmente importantes, apresentassem variabilidade quanto ao uso da madeira, evitando a concentração em espécies de alto valor de mercado ou tradicionais pela qualidade de sua madeira.

Foram selecionadas, no mínimo, três árvores de cada espécie estudada, utilizando-se a primeira tora para a realização dos ensaios no presente estudo. A seleção de amostras de material de todas as toras comerciais buscou obter representatividade daquilo que é encontrado no mercado por indústrias e consumidores finais.

As espécies selecionadas no presente estudo são apresentadas na Tabela 1, com seus respectivos nomes popular e científico, além da família.

Tabela 1 – Espécies de madeira utilizadas

Nome popular	Nome científico	Família
Amescla	<i>Trattinnickia burserifolia</i> Mart.	Burseraceae
Rosinha	<i>Vochysia guianensis</i> Aubl.	Vochysiaceae
Tauari	<i>Couratari guianensis</i> Aubl.	Lecythidaceae
Canelão	<i>Ocotea aciphylla</i> (Nees & Mart.) Mez	Lauraceae
Angelim-pedra	<i>Hymenolobium petraeum</i> Ducke	Fabaceae
Cambará	<i>Qualea paraensis</i> Ducke	Vochysiaceae
Amarelinho	<i>Euxylophora paraensis</i> Huber	Rutaceae
Cupiúba	<i>Goupia glabra</i> Aubl.	Goupiaceae
Tauari-duro	<i>Couratari stellata</i> A.C.Sm.	Lecythidaceae
Garapeira	<i>Apuleia leiocarpa</i> (Vogel) J.F.Macbr.	Fabaceae
Muiracatiara	<i>Astronium lecointei</i> Ducke	Anacardiaceae
Cumaru	<i>Dipteryx odorata</i> (Aubl.) Willd.	Fabaceae

As árvores foram abatidas utilizando motosserra, transformadas em toras, as quais foram extraídas com trator florestal *skidder* adaptado até a explanada. Em seguida, as toras foram carregadas em um caminhão e transportas até o município de Alta Floresta, sendo desdobradas utilizando serra fita, adotando o sistema de cortes tangenciais de modo sucessivo – sistema predominante para desdobro de toras de madeira nativa. As toras utilizadas apresentaram diâmetro mínimo médio de 46 cm e máximo de 85 cm, sendo esta variação, principalmente, oriunda das características de cada espécie.

Após o desdobro, foram obtidas pranchas com dimensões de 15 a 30 cm de largura e de 2,5 a 7,5 cm de espessura, de acordo com a dimensão possível de ser obtida. Todas as peças inicialmente tinham comprimento igual ao comprimento da tora, variando entre 3,20 e 5,40 metros; em seguida, foram serradas em uma destopadeira de pêndulo com comprimento de 1,50 metros a partir da base da tora, marcando-se a extremidade referente à base da árvore.

As pranchas obtidas no desdobro, com 1,50 metros de comprimento, foram cortadas em peças com 1,0m, sendo este material destinado para a secagem em estufa, com temperatura constante de 60°C. A porção restante foi destinada à confecção de amostras para os ensaios de propriedades químicas e físicas da madeira. Estes corpos de prova são provenientes da posição correspondente ao DAP das árvores, com intervalo de variação de 20cm.

Devido a grande variabilidade existente nas propriedades das madeiras de cerne e alburno, além da redução no valor comercial atribuída a peças com presença de alburno, esse tipo de lenho foi descartado para as análises, bem como a porção que incluía medula e peças que podiam ter qualquer tipo de defeito, como descolamento de camadas da madeira (acebolamento), ataque de insetos, presença de fungos, rachaduras e nós.

Faz-se necessário salientar que os procedimentos de coleta do material nas áreas de plano de manejo foram realizados individualmente para cada espécie, visto que a coleta de material de duas ou mais espécies poderia incorrer em influências no conteúdo de umidade das amostras, o que não é desejável.

2.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS

Os ensaios para determinação das propriedades físicas da madeira foram realizados no Laboratório de Tecnologia da Madeira da Universidade Estadual de Mato Grosso, no campus de Alta Floresta. Para determinação das propriedades físicas, utilizou-se 12 corpos de prova de 10x3x2 cm, indicando, respectivamente, comprimento, largura e espessura, orientados radial ou tangencialmente, com inclinação máxima de 6% das fibras em relação ao plano de corte, de acordo com o disposto na NBR 7190 (ABNT, 1997) para cada espécie.

2.2.1 Densidade básica

Mediante os valores determinados para as amostras submetidas à secagem, as dimensões da madeira em estado saturado e a massa seca a 0% de umidade, estimou-se a densidade básica (Equação 1).

$$D_b = \left(\frac{M_{SECA}}{Vol_{SAT}} \right) \quad (1)$$

D_b : Densidade básica (g/cm^3);

M_{SECA} : Massa seca da amostra (g);

Vol_{SAT} : Volume saturado (cm^3);

Para obtenção da massa seca, os corpos de prova foram submetidos à secagem em estufa de circulação de ar à temperatura de 103°C, até apresentarem massa constante. As mensurações das dimensões foram realizadas com paquímetro digital com precisão de 0,001 milímetros, efetuando-se três medidas em cada seção da peça, utilizando o valor médio das três medições.

2.2.2 Contrações longitudinal, radial e tangencial

As retrações totais no sentido longitudinal (β_L), radial (β_R) e tangencial (β_T) foram estimadas de acordo com o descrito na norma NBR 7190 (ABNT, 1997), utilizando as equações 2, 3 e 4, respectivamente.

$$\beta_L = \left(\frac{L1_{sat} - L1_{seca}}{L1_{sat}} \right) * 100 \quad (2)$$

β_L : Retração no sentido longitudinal (%);
 L1sat: Dimensão saturada no plano axial (mm);
 L1seca: Dimensão seca no plano axial (mm).

$$\beta_R = \left(\frac{L2_{sat} - L2_{seca}}{L2_{sat}} \right) * 100 \quad (3)$$

β_R : Retração no sentido radial (%);
 L2sat: Dimensão saturada no plano radial (mm);
 L2seca: Dimensão seca no plano radial (mm).

$$\beta_T = \left(\frac{L3_{sat} - L3_{seca}}{L3_{sat}} \right) * 100 \quad (4)$$

β_T : Retração no sentido tangencial (%);
 L3sat: Dimensão saturada no plano tangencial (mm);
 L3seca: Dimensão seca no plano tangencial (mm).

2.2.3 Contração volumétrica e coeficiente de anisotropia

A variação volumétrica (Δ_{vol}) foi determinada em função das dimensões dos corpos de prova, nas condições saturada e seca, utilizando a equação 5, de acordo com a norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

$$\Delta_{vol} = \left(\frac{Vol_{sat} - Vol_{seco}}{Vol_{seco}} \right) * 100 \quad (5)$$

Δ_{vol} : Variação volumétrica (%);
 Volsat: Volume saturado (mm³);
 Volseco: Volume seco a 0% de umidade (mm³).

O coeficiente anisotrópico foi estimado por meio da equação 6, pela razão entre a retração no sentido tangencial e no radial.

$$CA = \frac{\beta_T}{\beta_R} \quad (6)$$

CA: Coeficiente anisotrópico;

β_T : Retração no sentido tangencial (%);
 β_R : Retração no sentido radial (%).

2.3 PROPRIEDADES QUÍMICAS

Os ensaios de propriedades químicas da madeira foram realizados no Laboratório de Química da Madeira da Universidade Federal de Mato Grosso, localizado no campus universitário de Sinop. Para caracterização das espécies utilizadas, as propriedades químicas avaliadas compreenderam a determinação do teor da fração holocelulósica, lignina insolúvel, extrativos e cinzas.

Inicialmente, as amostras de madeira foram fragmentadas em pequenos palitos para facilitar a trituração das mesmas a fim de obter a serragem a ser utilizada para a determinação de propriedades químicas. As amostras foram trituradas em um moinho de facas tipo *Willey*, sendo peneiradas, posteriormente, utilizando peneiras de malha 20, 40, 60 e 80 *mesh*. Por fim, utilizou-se a porção de serragem que passou pela peneira de 40 *mesh* e que ficou retida na peneira de 60 *mesh*, conforme recomendações da NBR 14660 da ABNT (2003a). Os ensaios de caracterização química das espécies foram realizados em duplicata.

2.3.1 Determinação do teor da fração holocelulósica

Com relação ao teor de holocelulose, o mesmo foi definido como sendo a diferença entre a composição química total e a composição da fração não-carboidrato (Equação 7).

$$Thol = 100 - (Text + Tlig + Tcz) \quad (7)$$

Thol: Teor de holocelulose (%);
 Text: Teor de extrativos (%);
 Tlig: Teor de lignina (%);
 Tcz: Teor de cinzas (%).

2.3.2 Determinação do teor de lignina insolúvel

Para a determinação do teor de lignina, utilizou-se a serragem de madeira livre de extrativos, isolando-a como resíduo usando, para isso, ácido sulfúrico a

72%, de acordo com a NBR 7989 da ABNT (2003c). A lignina foi removida por simples filtração, conforme descrito a seguir: pesou-se 1g de serragem de madeira, a qual foi transferida para um frasco de béquer de 50mL, adicionando-se 15mL de ácido sulfúrico a 72%. Após este procedimento, as partículas em solução foram maceradas com o ácido por um período de duas horas, com intervalos de quinze minutos.

Ao término, o material foi transferido para um béquer e a solução foi diluída com água destilada até completar 500ml. As amostras foram colocadas em processo de banho-maria por um período de quatro horas. Filtrou-se o resíduo (lignina insolúvel) em funil filtrante juntamente com uma bomba de vácuo. Após, o resíduo foi colocado para secagem em estufa a 100°C por 12 horas. As amostras foram pesadas e foi determinado o teor de lignina pela equação 8:

$$L_i = \frac{m_r}{m_a} \cdot 100 \quad (8)$$

L_i : Teor de lignina da amostra (%);

m_r : Massa de resíduo (g);

m_a : Massa da amostra seca (g).

2.3.3 Determinação do teor de extrativos

O teor de extrativos foi determinado pelo método de extração com álcool etílico, de acordo com os procedimentos metodológicos da NBR 14853 da ABNT (2002). Primeiramente, foram pesadas amostras de 2g de serragem, as quais foram colocadas em envelopes de papel filtro para a extração no aparelho extrator do tipo "Soxhlet". Após, foram adicionados 200ml do solvente etanol 99,8% juntamente com um envelope da amostra em cada extrator. A temperatura foi aumentada 10°C em intervalos de oito minutos até atingir 80°C, permanecendo nessa temperatura por um período de seis horas.

Ao término da extração, as amostras foram retiradas e colocadas em estufa durante 12 horas para a obtenção da massa seca e, por diferença de massa, determinou-se o teor de extrativos.

2.3.4 Determinação do teor de cinzas

Para a determinação do teor de cinzas, utilizaram-se cadinhos de porcelana previamente aquecidos na mufla a 525°C por duas horas. Após o aquecimento, o cadinho foi resfriado em dessecador até massa constante. Com o auxílio de balança de precisão 0,01g, foram pesadas amostras de 2g, as quais foram levadas novamente à mufla, à temperatura de 525°C, por um período de quatro horas.

As amostras foram colocadas em dessecador para resfriamento até massa constante e, posteriormente, pesadas. Obtidos os valores de massa das amostras seca e massa de cinzas, pode-se determinar o teor de cinzas com a equação 9.

$$Cinzas = \frac{m_1}{m_2} \cdot 100 \quad (9)$$

Cinzas: Teor de cinzas em percentual (%);

m_1 : Massa de cinzas (g);

m_2 : Massa de amostra seca antes da pirólise (g).

2.4 AGRUPAMENTO DAS MADEIRAS

Posteriormente à realização dos ensaios físicos e químicos, a madeira das 12 espécies utilizadas foi agrupada por meio da análise de *cluster*, utilizando as características físicas e químicas. O agrupamento das espécies foi realizado com o uso do *software Minitab 17*, empregando-se o método de análise de agrupamento por distância euclidiana. Os dados foram previamente padronizados através da equação 10 para minimizar o efeito da grandeza das variáveis utilizadas, de acordo com as recomendações de Vicini (2005).

$$A_{PAD} = \frac{(Média_A - Média_E)}{Desvio\ Padrão_E} \quad (10)$$

A_{PAD} : Valor padronizado da variável “x” para cada espécie;

$Média_A$: Valor médio da variável “x” para a espécie;

$Média_E$: Média da variável “x” de todas as espécies;

$Desvio\ Padrão_E$: Desvio padrão da variável “x” para todas as espécies.

A análise de agrupamento foi aplicada de modo individual para as características físicas e para as características químicas das madeiras avaliadas.

Consideraram-se grupos similares, com base nas características físicas e químicas, aqueles que apresentaram, no mínimo, 80% de similaridade entre as espécies de madeira.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA

Na Tabela 2, estão apresentados os valores médios de densidade, contrações totais no sentido longitudinal, radial, tangencial, e volumétrico, além do coeficiente anisotrópico das 12 espécies estudadas.

Tabela 2 – Densidade básica e contrações das madeiras

Espécie	Densidade (g.cm ⁻³)	Contrações totais (%)				CA
		L	R	T	V	
Amescla	0,41 A	0,15 ABC	4,60 F	7,37 DE	13,09 DE	1,61 BCD
Rosinha	0,44 A	0,19 BC	2,80 A	7,37 DE	11,28 BC	2,69 G
Tauari	0,50 B	0,18 BC	3,87 CDE	4,73 A	9,41 A	1,25 A
Canelão	0,57 C	0,38 D	3,29 ABC	7,77 E	12,55 CDE	2,39 G
Angelim-pedra	0,59 CD	0,12 AB	4,24 DEF	8,33 E	14,14 EF	2,03 EF
Cambará	0,59 CD	0,11 AB	3,91 CDE	6,65 CD	11,66 BCD	1,83 DEF
Amarelinho	0,61 D	0,12 AB	3,12 AB	6,26 BC	10,26 AB	2,08 F
Cupiúba	0,66 E	0,12 AB	4,51 EF	7,62 DE	13,54 E	1,74 CDE
Tauari-duro	0,72 F	0,22 C	5,68 G	8,18 E	15,75 F	1,45 ABC
Garapeira	0,76 G	0,15 ABC	3,69 BCD	6,72 CD	11,50 BCD	1,84 DEF
Muiracatiara	0,76 G	0,31 D	4,27 DEF	7,99 E	13,90 E	1,91 DEF
Cumarú	0,92 H	0,07 A	3,91 CDE	5,47 AB	10,24 AB	1,38 AB

Onde: L: Longitudinal; R: Radial; T: Tangencial; V: Volumétrica; CA: Coeficiente Anisotrópico. Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula na vertical não diferem entre si, pelo teste de LSD com 5% de significância.

O valor médio da densidade apresentou grande variação entre as espécies, sendo que a madeira de cumarú apresentou o maior valor (0,92 g.cm⁻³), enquanto as madeiras de amescla e rosinha apresentaram menores valores (0,41 e 0,44 g.cm⁻³, respectivamente). As espécies estudadas são classificadas quanto a sua densidade, desde leve (0,40 a 0,49 g.cm⁻³) até pesada (0,80 a 0,95 g.cm⁻³), de acordo com a classificação sugerida por Carvalho (1996).

Sabe-se que a densidade e o teor de umidade, assim como outros fatores inerentes à madeira, exercem influência direta na estabilidade dimensional. Siau (1984) cita que, além da densidade básica, o ponto de saturação das fibras (PSF) está diretamente associado com a variação dimensional da madeira. Kollmann e

Cotê (1968) afirmaram que, quanto mais alta a densidade da madeira, maior a sua contração ou expansão. Glass e Zelinka (2010) também afirmam que a maior contração está associada com uma maior densidade; entretanto, isso não foi observado como uma tendência nas espécies avaliadas. As madeiras avaliadas que apresentaram elevada densidade, como o cumaru e a garapeira, apresentaram baixos valores médios de contração longitudinal, tangencial e volumétrica.

Verificou-se que os valores determinados para a massa específica das espécies avaliadas neste estudo estão próximos de valores obtidos por outros autores, tais como em estudo realizado por Araújo (2007), que verificou massa específica para o amarelinho de $0,69 \text{ g.cm}^{-3}$; angelim-pedra, $0,59 \text{ g.cm}^{-3}$; cupiúba, $0,71 \text{ g.cm}^{-3}$; rosinha, $0,54 \text{ g.cm}^{-3}$; garapeira, $0,75 \text{ g.cm}^{-3}$; cumaru, $0,91 \text{ g.cm}^{-3}$; tauari, $0,52 \text{ g.cm}^{-3}$. Em estudo realizado por Marques (2008), a autora obteve, para o amarelinho, $0,69 \text{ g.cm}^{-3}$, enquanto Eleotério e Silva (2012) obtiveram, para as madeiras de muiracatiara, $0,84 \text{ g.cm}^{-3}$, e de cumaru $0,93 \text{ g.cm}^{-3}$, próximo ao obtido por Nascimento, Garcia e Diáz (1997), que foi de $0,92 \text{ g.cm}^{-3}$. Castro et al., (2015) estudando o angelim-pedra, obtiveram o valor de $0,61 \text{ g.cm}^{-3}$ para a densidade, ligeiramente superior ao deste estudo.

O trabalho realizado por Araújo (2007) atingiu valores próximos ao verificados neste estudo para a contração radial de angelim-pedra (4,1%), cupiúba (4,5%), tauari (3,6%), muiracatiara (4,6%) e contração tangencial muiracatiara (7,6%). Para a contração tangencial, valores inferiores foram encontrados para o angelim-pedra (6,3%) e valores maiores para cupiúba e cumaru, ambas com 8,4%, e muiracatiara 6,1%. Para Araújo (2007), a madeira de rosinha apresentou valores superiores tanto para contração radial (5,0%) como tangencial (11,5%), assim como para a garapeira (6,5% e 10,1%) e o amarelinho (6,5% e 7,8%). Marques (2008) verificou contração volumétrica de 13,56% para o amarelinho, superior a encontrada neste estudo.

Os estudos realizados por Araújo (2007); Marques (2008); Almeida (2015); e Almeida (2013) corroboram com o presente estudo, visto que as contrações radiais e tangenciais encontradas pelos autores são próximas para as diferentes espécies avaliadas.

Considerando somente o parâmetro do coeficiente de anisotropia, verifica-se que a madeira de tauari apresentou a melhor relação entre as variações tangencial e radial (1,25). Isto se justifica, porque valores mais próximos de 1,0 indicam que a madeira possui melhor estabilidade dimensional. Além disso, a mesma espécie

apresentou menor contração volumétrica 9,41%, indicando essa como a espécie que apresenta melhor comportamento quanto às variações dimensionais. Por outro lado, as madeiras de canelão (2,39), rosinha (2,69) e angelim-pedra (2,03) obtiveram maior coeficiente anisotrópico e maiores contrações volumétricas, indicando que apresentam maior propensão a desenvolver fendilhamento e empenamentos durante as alterações dimensionais, geradas pela variação dimensional durante o processo de secagem.

Em concordância com esses resultados, Almeida (2013), constatou valores semelhantes ao apresentado para o tauari (*Couratari* spp.), cujo coeficiente anisotrópico foi de 1,28, permitindo ser considerado pelo autor como excelente. Castro et al. (2015) verificaram em seu estudo que a madeira de angelim-pedra apresentou baixa estabilidade dimensional, com valor de CA de 2,45.

De acordo com os critérios de classificação de Durlo e Marchiori (1992) quanto ao coeficiente anisotrópico, as espécies cumaru, tauari e tauari-duro são categorizadas como excelentes. As madeiras de amescla, cambará, cupiúba, garapeira, muiracatiara são consideradas normais, e amarelinho, angelim-pedra, canelão e rosinha são de baixa estabilidade dimensional.

As contrações das madeiras avaliadas foram inferiores nos sentidos longitudinais a 0,38%, seguido do plano radial com 5,68%, tangencial de 8,33% e volumétrica de 15,75%. Para Karlsen (1967), estas variações ocorrem de forma diferenciada em cada uma das três direções principais: longitudinal (aproximadamente 0,1%), radial (3 a 6%) e tangencial (6 a 12%). Neste estudo, verificou-se, para todas as espécies, que a retratibilidade tangencial foi superior à retratibilidade radial. De acordo com Durlo e Marchiori (1992), isso ocorre devido os raios estarem dispostos perpendicularmente ao sentido das fibras, promovendo menores contrações. Oliveira e Silva (2003) afirmam que a contração na direção tangencial é, aproximadamente, duas vezes maior do que na direção radial, sendo que valores mais baixos de variação dimensional são importantes para o uso da madeira maciça.

3.2 PROPRIEDADES QUÍMICAS DA MADEIRA

Os resultados obtidos nos ensaios de propriedades químicas das madeiras são apresentados na Tabela 3, compreendendo os valores médios dos teores de holocelulose, lignina, extrativos e cinzas.

Tabela 3 – Propriedades químicas das madeiras: teor de lignina, cinzas, extrativos e holocelulose

Espécie	Lignina (%)	Cinzas (%)	Extrativos (%)	Holocelulose (%)
Amarelinho	31,52	0,65	9,07	58,57
Amescla	24,33	0,65	2,74	74,58
Angelim-pedra	29,64	0,12	4,21	66,02
Cambará	31,55	0,78	3,41	64,27
Canelão	31,87	0,35	4,76	63,03
Cumaru	32,19	0,27	10,19	55,58
Cupiúba	30,71	0,40	5,52	63,38
Garapeira	26,35	0,91	10,90	61,84
Muiracatiara	26,56	0,59	4,96	66,90
Rosinha	24,82	0,92	4,43	69,82
Tauari	30,95	0,33	4,57	64,15
Tauari-duro	31,80	0,65	4,30	63,24

Os valores mínimos de lignina foram encontrados para as madeiras de amescla e rosinha, sendo 24,33% e 24,82%, respectivamente, enquanto o maior valor foi obtido para o cumaru, com 32,19% de sua composição compreendendo a fração de lignina insolúvel. Stangerlin (2012) descreveu valores inferiores para a madeira de cumaru (28,30%), enquanto Santana e Okino (2007) e Castro et al. (2015) encontraram valores semelhantes para o teor de lignina de angelim-pedra 30,3% e 31,77%, respectivamente e para cumaru de 32,7% (Castro et al., 2015).

Quanto ao teor de cinzas, o menor valor foi encontrado para o angelim-pedra, com média de 0,12%, ao passo que os maiores foram obtidos para as madeiras de rosinha (0,92%) e garapeira (0,91%). Em seus estudos, Santana e Okino (2007) e Castro et al. (2015) verificaram que a madeira de angelim-pedra apresentou valores médios de 0,40% e 0,56%, respectivamente, sendo superiores aos obtidos neste estudo. Os autores referidos encontraram, para o teor de cinzas

da madeira de cumaru, 0,6%, enquanto que, no presente trabalho, foi obtido o valor médio de 0,27%.

Neste estudo, o teor de cinzas das espécies apresentou uma amplitude de 0,8%, considerado baixo, pois, segundo Chen (2014), a variação no teor de cinzas ocorre de acordo com a espécie e tipo de solo, visto que cada parte da planta exerce uma função específica em seu crescimento, e a deposição de minerais varia de acordo com a exigência nutricional do vegetal. Zau et al. (2014) ressaltam que os teores de cinzas podem variar em decorrência de alguns fatores, como as características do solo. De acordo com Klock et al. (2005), o teor de cinzas de madeiras de climas tropicais pode chegar até 5%.

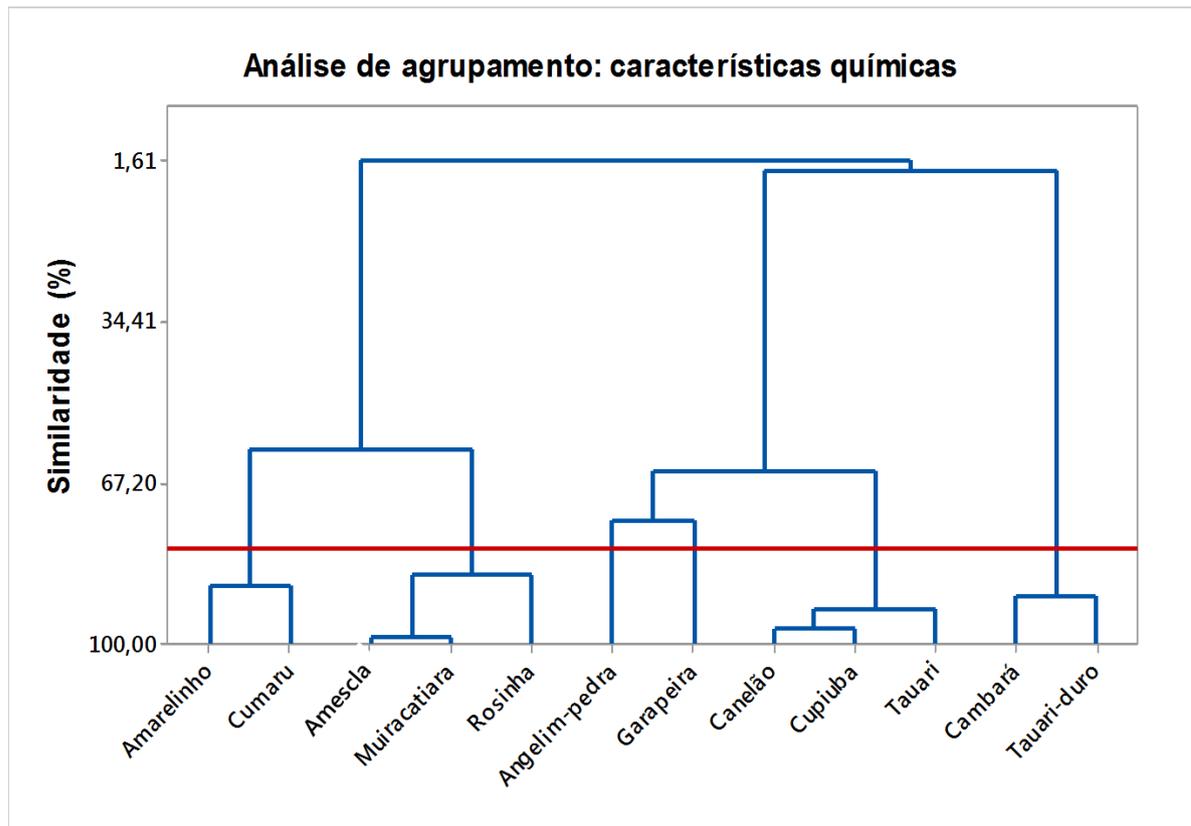
O teor de extrativos variou de 2,74% a 10,90% para as madeiras estudadas. Em pesquisa realizada por Stangerlin (2012), o mesmo verificou que a madeira de cumaru apresentou elevado teor de extrativos (9,20%), se assemelhando aos resultados obtidos por Santana e Okino (2007), com valor médio de 9,7%, similar ao verificado no presente estudo. Para o angelim-pedra, Santana e Okino (2007) obtiveram teor de extrativos de 4,4%, enquanto Castro *et al.* (2015) encontraram 11,52% de extrativos na composição da espécie. Para o tauari, Almeida (2013) encontrou quantidades inferiores ao verificado neste estudo, sendo que o autor relata ter obtido o valor de 3,40%. De acordo com Zau et al. (2014), o teor de extrativos pode variar em decorrência de alguns fatores, tais como as características do solo. Além disso, a idade da árvore, as condições de sítio e climáticas, além do método de extração, pode influenciar na determinação do teor de extrativos.

Dentre as espécies estudadas por Duarte (2017), o cumaru foi o que apresentou o maior teor de extrativos, com aproximadamente 13%, o que pode estar relacionado ao fato de ser uma espécie que apresentou odores mais marcantes quando comparada com as demais. Segundo Jankowsky e Galvão (1979), o teor de extrativos não é fator dominante na higroscopicidade da madeira, e sua influência varia de acordo com a espécie.

Dentre as espécies avaliadas, o cumaru apresentou a menor quantidade de holocelulose (55,58%), enquanto o maior valor foi encontrado para a madeira de amescla, com 72,58%. Stangerlin (2012) descreveu maior teor de holocelulose para a madeira de cumaru comparativamente a este trabalho, com valor de 62,04%, ao passo que Castro et al. (2015) verificaram, para o angelim-pedra, teor de holocelulose de 56,15%, valor inferior ao obtido neste estudo.

A análise de agrupamento utilizando as características químicas da madeira (Figura 2) destaca a formação de dois grupos, com três espécies, cada com similaridade acima de 80%.

Figura 2 – Dendrograma da análise de agrupamento com base nas características químicas das madeiras



O agrupamento utilizando os teores de holocelulose, lignina, extrativos e cinzas formou dois grupos distintos entre si, com similaridade superior a 80%, sendo que um desses grupos foi composto pelas madeiras de canelão, cupiúba e tauari, as quais apresentaram similaridade de 92,92%. Valores elevados de similaridade entre madeiras indicam que as mesmas possuem características químicas semelhantes, o que pode ser observado na Tabela 3. Considerando este grupo ainda, houve similaridade apenas entre a cupiúba e o canelão, ao analisar o agrupamento por meio das propriedades físicas.

Do mesmo modo que para as três madeiras supracitadas existem similaridade de 86,08% entre as madeiras de amescla, muiracatiara e rosinha. Comparativamente, no agrupamento por meio das características físicas, as três

espécies não apresentaram similaridade, sendo dispostas distantes no eixo das abscissas (Figura 2).

A formação de grupos por meio da similaridade de características da madeira pode levar a não formação de grupos com alta proximidade entre as espécies ou a formação de grupos reduzidos com duas ou três espécies. Madeiras agrupadas com base em um conjunto de características podem não apresentarem tal similaridade quando são incluídas outras características.

4 CONCLUSÃO

As madeiras utilizadas apresentaram grande variação entre si, tanto para a densidade quanto para as contrações, sendo que as madeiras de tauari, cumaru e tauari-duro apresentaram ótima estabilidade dimensional e baixas contrações.

A maior densidade foi da madeira de cumaru, assim como o maior teor de lignina e menor teor de holocelulose, enquanto a amescla foi a de menor densidade, menor teor de lignina e maior teor de holocelulose, sendo que todas as espécies apresentaram teor de cinzas inferior a 1%, e a madeira de garapeira apresentou o teor de extrativos mais elevado, próximo a 11%.

Os grupos formados com base nas características físicas e químicas da madeira foram compostos por, no máximo, duas e três espécies, respectivamente.

CAPÍTULO II – CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA EM ENSAIOS PRELIMINARES DE SECAGEM

1 INTRODUÇÃO

A secagem da madeira é uma das etapas que mais demanda conhecimento e cautela, visto que as espécies apresentam distintos comportamentos ao serem submetidas à secagem, especialmente quando se emprega métodos artificiais. O conhecimento das características de cada espécie é imprescindível para a condução de um processo de secagem visando reduzir o tempo e, conseqüentemente, os custos, aliado à obtenção de madeira seca com o mínimo possível de defeitos.

Para Martins (1988), a etapa de secagem da madeira, independente do método empregado, consiste em reduzir a umidade, com o objetivo de atingir um teor de umidade predeterminado, com o mínimo de defeitos, no menor tempo possível, e de modo economicamente viável para o uso final da madeira.

Diversos fatores influenciam a secagem da madeira, sejam eles intrínsecos ao próprio material, que são mais difíceis de controlar, ou aqueles intrínsecos ao ambiente, como a temperatura, a umidade relativa e o vento. Conhecer a influência das variáveis ambientais é primordial para compreender como determinada espécie de madeira comporta-se durante a secagem, tanto em relação a sua facilidade de perder umidade como a sua propensão ao surgimento de defeitos. De acordo com Mendes et al. (1998), os principais defeitos gerados durante o processo de secagem são os empenos, as rachaduras, o colapso e o endurecimento superficial.

Uma das alternativas para conhecer as características da madeira em relação a sua velocidade de secagem e sua propensão a defeitos são os ensaios de secagem empregando peças de tamanho reduzido. Este tipo de ensaio tem como vantagem a possibilidade de fornecer informações precisas em um intervalo de tempo reduzido comparativamente à secagem convencional, além de necessitar de um volume menor de madeira. De acordo com Terasawa (1968), peças de tamanho reduzido, quando submetidas à secagem, apresentam comportamento similar ao que apresentarão na secagem convencional.

Apesar do crescente interesse científico por conhecer e desenvolver novas tecnologias no âmbito da secagem, inclusive com estudos referentes às espécies nativas comerciais oriundas da Amazônia, ainda é recorrente a escassez de

informações para um número considerável de espécies. Isso se faz mais notável, em especial, com aquelas espécies cuja exploração iniciou-se mais recentemente, motivada pela redução da disponibilidade, nas florestas, de espécies madeireiras tradicionais.

Desse modo, o objetivo do presente capítulo foi entender o comportamento da madeira de 12 espécies florestais submetidas à secagem, estimando as suas respectivas taxas de secagem e os defeitos apresentados.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ENSAIO PRELIMINAR DE SECAGEM

Para realização do ensaio preliminar de secagem, foram confeccionados corpos de prova a partir das pranchas obtidas através do desdobro utilizando serra fita. Posteriormente, as mesmas foram aplainadas utilizando uma plaina desengrossadeira até a espessura de 2,5cm, para a obtenção de peças de dimensões padronizadas. Em seguida, realizou-se o refilo das peças em serra circular de mesa, para que as mesmas tivessem a largura nominal de 15 cm, e, por fim, houve a padronização quanto ao seu comprimento.

Foram selecionadas 20 peças de cada espécie, livres de quaisquer tipos de defeito, tais como rachaduras, empenos e nós, para a realização do ensaio preliminar de secagem. As peças utilizadas não possuíam padrão quanto à orientação de corte, visto que o objetivo foi utilizar material o mais similar possível daquele desdobrado e comercializado.

Posteriormente, as peças foram marcadas e identificadas utilizando lápis de anilina, esquadro e um gabarito, de acordo com a Figura 3. Na porção central de cada peça, foi marcada a amostra utilizada para o ensaio preliminar de secagem, com dimensão de 50 cm de comprimento. Desse modo, foram obtidas amostras para secagem, com dimensões nominais 2,5 x 15 x 50 cm (espessura, largura e comprimento, respectivamente). Marcaram-se, ainda, nas duas extremidades de cada amostra, corpos de prova com 2,5 cm de comprimento, para determinação do teor de umidade inicial, de acordo com os procedimentos recomendados por Rasmussem (1966).

Figura 3 – Confeção das amostras para o ensaio preliminar de secagem de madeira



As amostras tiveram suas dimensões e sua massa mensuradas antes do início da secagem, além da verificação de qualquer tipo de defeito, como empenamentos e rachaduras. Em seguida, as mesmas foram submetidas à secagem em estufa de circulação de ar, com temperatura constante de 60°C.

A estufa de secagem utilizada possuía dimensões internas de 1,20 x 0,80 x 0,60 m, sendo altura, largura e profundidade, respectivamente, o que permitiu a alocação das amostras em quatro prateleiras, com cinco amostras em cada uma. As amostras foram dispostas perpendicularmente à direção do fluxo de ar, apoiadas sobre sarrafos de 2,5cm de espessura, permitindo a passagem do ar, tanto sobre quanto sob as amostras, de acordo com a Figura 4.

Figura 4 – Amostras de madeira alocadas na estufa para secagem a 60°C



Durante a secagem, as amostras foram pesadas periodicamente para, posteriormente, elaborar a curva de secagem. O intervalo entre as medições foi de três horas no início do ensaio e mais de 30 horas ao final do mesmo, visto que a variação no teor de umidade de algumas espécies, neste estágio, era de menos de 1% a cada 24 horas. Essa variação no tempo entre as medições se deve a maior perda de massa de água no início da secagem em relação ao final do processo.

A etapa de secagem da madeira foi considerada finalizada quando o teor de umidade médio das amostras atingia o valor de 8%, sendo este considerado como o mais baixo para a grande maioria dos usos a que se destina a madeira serrada.

2.2 DETERMINAÇÃO DA TAXA, TEMPO DE SECAGEM E TEOR DE UMIDADE INICIAL DA MADEIRA

O teor de umidade inicial foi determinado para cada amostra, retirando-se dois corpos de prova de suas extremidades (Figura 3), procedidos pela determinação de suas respectivas massas em balança digital. Em seguida, foram colocados em estufa laboratorial com circulação forçada de ar e temperatura de 103°C, para obtenção da massa, por um período de 48 horas. De posse dessas informações, determinou-se o teor de umidade inicial por meio da Equação 10 (SIAU, 1984).

$$TU_i = \left(\frac{M_u - M_s}{M_s} \right) * 100 \quad (10)$$

TU_i: Teor de umidade inicial (%);
 M_u: Massa úmida da amostra (g);
 M_s: Massa seca da amostra (g).

A taxa de secagem e o tempo de secagem foram determinados para as 20 amostras de cada espécie durante todo o processo, dividindo este em três etapas: da condição de verde até o Ponto de Saturação das Fibras (PSF); do PSF até 8% de umidade; e da condição verde até 8%. Utilizou-se o teor de umidade de 30% como condição padrão para o PSF de todas as espécies.

As amostras submetidas à secagem a 60°C foram monitoradas periodicamente quanto a sua massa e, com tais dados, estimou-se o teor de umidade no instante das pesagens, por meio da Equação 11.

$$TUa = \frac{(Ma*(TUi+100))}{Mi} - 100 \quad (11)$$

TUa: Teor de umidade atual (%);

Ma: Massa atual (g);

TUi: Teor de umidade inicial (%);

Mi: Massa inicial (g).

Complementarmente, estimou-se a taxa de secagem mediante aplicação da Equação 12, descrita por Santini (1980), para que amostras com teores de umidade distintos, dimensões variáveis e de diferentes espécies pudessem ser comparadas.

$$TS = \left(\frac{\Delta m}{(A_{TS} * \Delta t)} \right) \quad (12)$$

TS: Taxa de secagem (g/cm².h);

Δm : Variação de massa entre duas observações (g);

A_{TS} : Área total superficial da peça (cm²);

Δt : Variação de tempo entre duas observações (h).

2.3 DEFEITOS NA SECAGEM

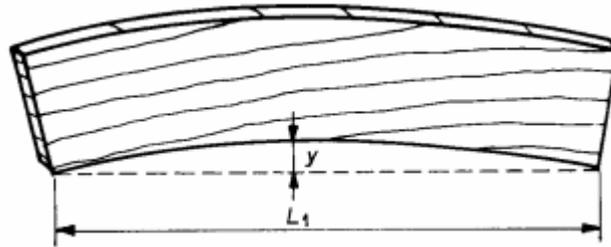
Após a secagem das amostras, as mesmas foram avaliadas qualitativamente quanto à observância de defeitos, que compreenderam basicamente empenamentos, rachaduras e colapso celular.

2.3.1 Empenamentos

Os tipos de empenos avaliados foram o arqueamento, o encurvamento, o encanoamento e o torcimento.

O arqueamento foi determinado a partir da flecha central formada entre a face curva da madeira e uma linha de nylon fixada nos topos da peça empenada. Tal procedimento é mostrado de modo ilustrativo na Figura 5.

Figura 5 – Procedimento para mensuração do arqueamento



Fonte: NBR 9487 (1986).

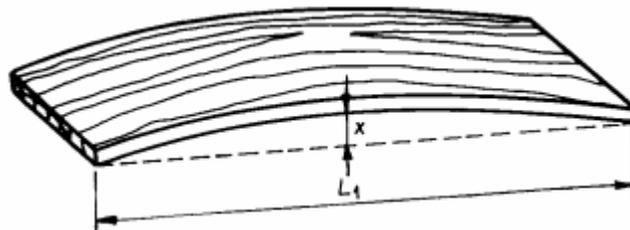
O arqueamento foi determinado a partir da Equação 13, e as peças que apresentaram um valor superior a 5 mm.m^{-1} , nesse quesito, foram classificadas como defeituosas.

$$A = \frac{F_a}{L_1} \quad (13)$$

A: Arqueamento (mm.m^{-1});
 F_a : Flecha de arqueamento da peça (mm);
 L_1 : Comprimento da peça (m).

O encurvamento foi determinado utilizando a mesma metodologia descrita para o arqueamento, a qual é mostrada ilustrativamente na Figura 6.

Figura 6 – Procedimento para mensuração do encurvamento



Fonte: NBR 9487 (1986).

O encurvamento foi determinado a partir da Equação 14 e, do mesmo modo que o arqueamento, as peças que apresentaram um valor superior a 5 mm.m^{-1} , nesse quesito, foram classificadas como defeituosas.

$$E_v = \frac{f_{E_v}}{L_1} \quad (14)$$

E_v : Encurvamento (mm.m^{-1});

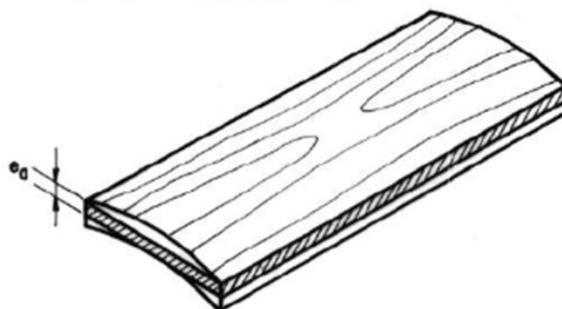
f_{E_v} : Flecha de encurvamento da peça (mm);

L_1 : Comprimento da peça (m).

O encanoamento foi obtido por meio da mensuração direta da flecha, utilizando uma linha de *nylon* presa nas bordas da peça. Considerou-se determinada peça como defeituosa se a mesma apresentasse uma flecha maior do que 4mm, de acordo com a norma NBR 9487 (ABNT, 1986).

O procedimento utilizado para a avaliação do encanoamento é apresentado, ilustrativamente, na Figura 7.

Figura 7 – Procedimento para mensuração do encanoamento



Fonte: NBR 9487 (1986).

O torcimento foi avaliado por meio da fixação da extremidade livre do defeito e a mensuração com régua, a qual foi afixada no canto em desconformidade com a superfície perfeitamente plana da mesa, não sendo estabelecido um valor limite, visto que a norma não admite este defeito de secagem.

2.3.2 Rachaduras

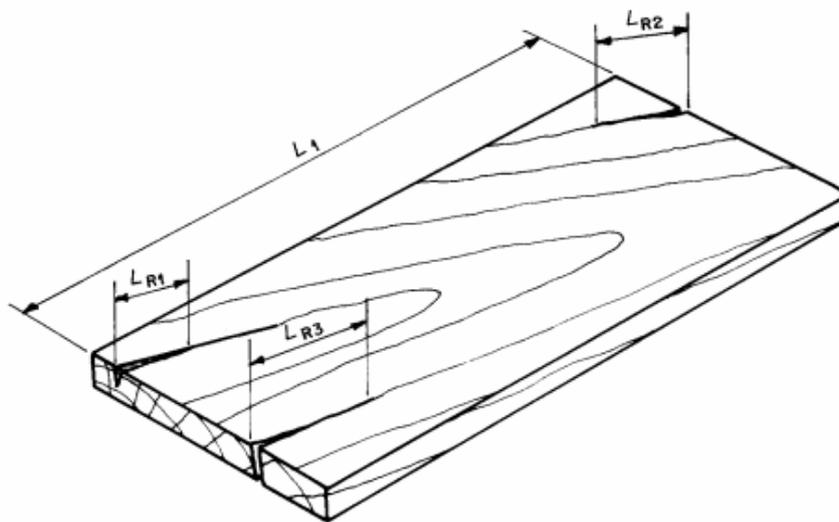
As rachaduras de topo foram avaliadas e classificadas segundo recomendação da NBR 9487 (ABNT, 1986). As mesmas foram mensuradas por meio do somatório dos seus comprimentos individuais em cada face da madeira (Equação 15). Para tal, foi obtido o IRT para as duas faces, e considerou-se a pior face de cada peça para a avaliação nesse aspecto.

$$IRT = \frac{L_{R1} + L_{R2} + L_{R3}}{L_1} * 100 \quad (15)$$

IRT: Índice de rachaduras de topo (%);
 L_{Rn} : Comprimento individual das rachaduras (mm);
 L_1 : Comprimento da peça (mm).

As rachaduras foram mensuradas com auxílio de um paquímetro digital, com precisão de 0,01mm. Na Figura 8, é apresentado um modelo esquemático para demonstração do procedimento adotado para quantificação do IRT.

Figura 8 – Procedimento para medição das rachaduras de topo



Fonte: NBR 9487 (1986).

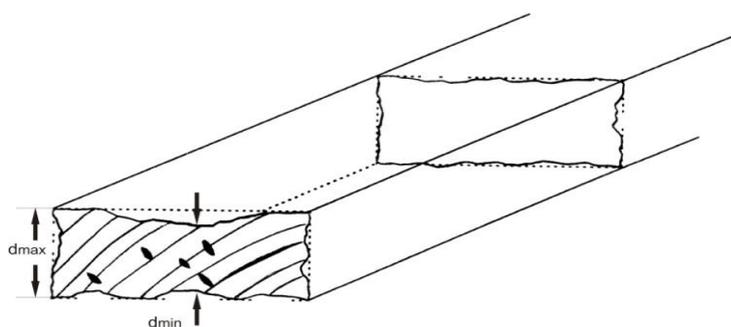
As peças que apresentaram IRT igual ou inferior a 10% foram classificadas como de primeira categoria. As peças com IRT entre 10% e 20% foram classificadas como de segunda categoria. Por fim, as que apresentaram IRT acima ou igual a 20% foram consideradas defeituosas.

Em seguida, as amostras foram avaliadas quanto a presença ou a ausência de rachaduras de superfície e, posteriormente, as amostras foram cortadas transversalmente no meio da peça para verificar a ocorrência de rachaduras internas, sendo classificada como presente ou ausente.

2.3.3 Colapso celular

A presença de colapso foi avaliada visualmente nas peças e, em casos nos quais houve verificação da ocorrência de colapso, o mesmo foi avaliado por meio da redução da espessura nominal útil da peça de madeira. A avaliação consistiu na determinação da maior e da menor espessura no topo de maior grau de colapso (Figura 9), utilizando paquímetro digital com precisão de 0,01mm.

Figura 9 – Procedimento para mensuração do colapso em peças de madeira



Fonte: Adaptado de Welling (1994).

Em seguida, foi calculada a redução na espessura, ocasionada pelo colapso (d_c), por meio da subtração da maior e da menor espessura verificadas e classificadas de acordo com a Tabela 4, sugerida por Welling (1994).

Tabela 4 – Grau de colapso

Grau de colapso	Redução na espessura (d_c), representando o nível atual de colapso.
Leve	$d_c \leq 2,0$ mm (ou removido com o aplainamento)
Moderado	$2,0 < d_c < 4,0$ mm (ou removido com o aplainamento)
Severo	$d_c \geq 4,0$ mm (ou removido com o aplainamento)

Fonte: Adaptado de Welling (1994).

2.4 TEOR DE UMIDADE FINAL DAS AMOSTRAS

Após as avaliações posteriores à etapa de secagem, confeccionou-se amostras de tamanho idêntico às utilizadas para determinação do teor de umidade inicial, a fim de determinar o teor de umidade final das mesmas.

O procedimento e a equação utilizados foram os mesmos da determinação do teor de umidade inicial. Todavia, ao invés de retirar as amostras das extremidades, retirou-se uma amostra da posição medial da peça. Este procedimento foi adotado, visto que a secagem forma gradientes de umidade na peça, onde a extremidade das peças normalmente apresenta teor de umidade mais baixo.

O teor de umidade final das amostras foi utilizado como parâmetro qualitativo do processo de secagem, empregando-o para correção do teor de umidade das peças, bem como da curva de secagem obtida. Isso porque a umidade inicial das peças foi estimada por amostras retiradas das extremidades, o que, em virtude do tempo entre o desdobro das toras e do início da secagem, pode incorrer em uma secagem das extremidades das peças.

2.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Para a análise estatística dos dados, empregou-se a estatística descritiva básica, utilizando a estimativa do coeficiente de variação para a variável taxa de secagem.

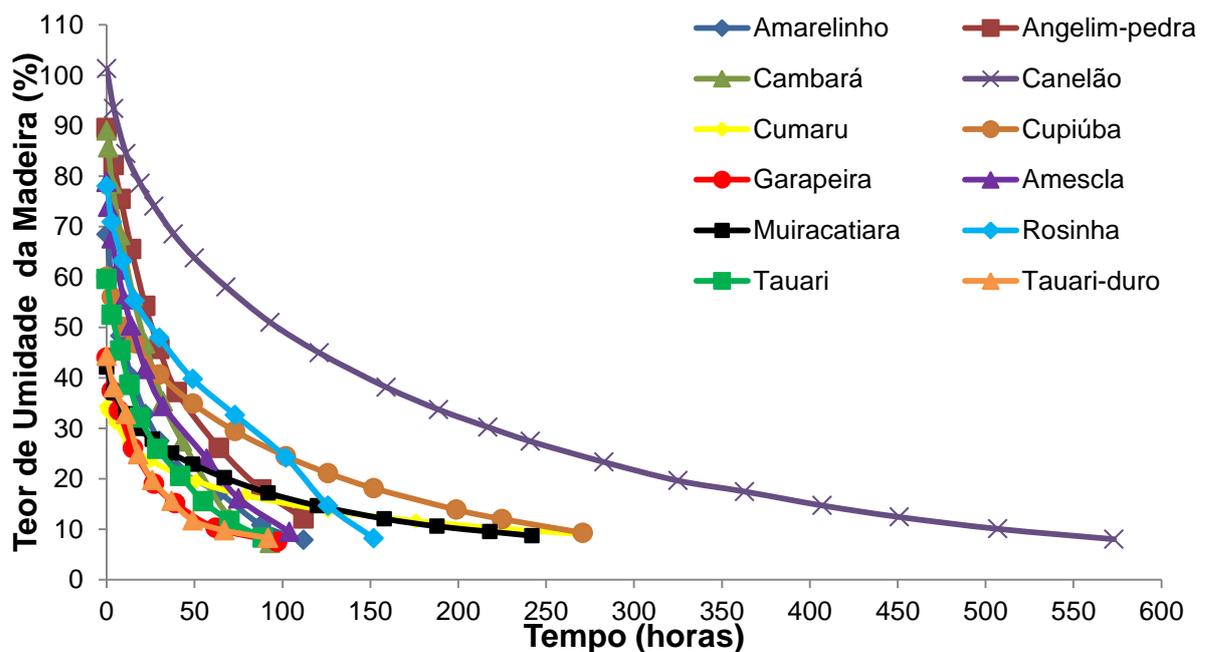
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No ensaio de secagem em estufa laboratorial a 60°C, avaliou-se o tempo de secagem seguido da elaboração da curva de secagem, taxa de secagem, defeitos e teor de umidade final das amostras de madeira de cada espécie.

3.1 TEOR DE UMIDADE E TEMPO DE SECAGEM

A curva de secagem das madeiras das 12 espécies utilizadas no presente capítulo é apresentada na Figura 10.

Figura 10 – Curva de secagem das 12 espécies de madeira



Analisando a figura acima, observou-se uma grande variação no tempo de secagem necessário para as madeiras das 12 espécies, sendo que a madeira de canelão necessitou de 573 horas para atingir o teor de umidade final desejado. Por outro lado, a madeira de tauari demandou 89 horas para a redução do seu teor de umidade até o desejado. A secagem das amostras de amarelinho iniciou com teor de umidade médio de 68,46%, e atingiu o teor de umidade final de 7,91% depois de decorridas 112 horas, resultando em uma perda média de 0,541% por hora. Como esperado, a madeira apresentou uma secagem rápida até o teor de umidade

próximo a 25% e, após isso, a secagem ocorreu mais lentamente, o que é esperado por esse teor de umidade ser aproximadamente o ponto de saturação das fibras.

A curva de secagem do canelão expõe de modo nítido, a dificuldade na remoção da água desta espécie, mesmo quando a madeira ainda apresentava elevado teor de umidade. O processo de secagem iniciou com teor de umidade médio das amostras em 101,32%, finalizando, após 573 horas, com o teor de umidade médio das amostras atingindo o valor de 8,04%, apresentando redução média de 0,16% por hora.

A madeira de cumaru iniciou a secagem com o menor teor de umidade inicial dentre todas as espécies, demandando 272 horas para reduzir o teor de umidade de 34,30% para 9,02%. A espécie demonstrou apresentar secagem lenta e isso pode estar relacionado com a sua densidade básica, cujo valor foi de $0,92 \text{ g.cm}^{-3}$. A redução média do teor de umidade foi de 0,09% por hora, o menor valor dentre todas as espécies avaliadas.

Uma redução rápida no início da secagem da madeira de cupiúba foi observada, seguida de grande dificuldade para remoção da água abaixo do PSF. Para esta espécie, o teor de umidade inicial foi de 60,04%, alcançando os 30% umidade em aproximadamente 72 horas, e necessitando de mais de 200 horas para reduzir seu teor de umidade de 30% até o valor final desejado. Assim, foram necessárias 277 horas para que o teor de umidade fosse reduzido de 60,04% para 9,05%, o que indica uma redução média de 0,18% por hora.

A secagem da madeira de angelim-pedra iniciou com teor de umidade de 89,55%, chegando ao valor final desejado de 8,00% após 112 horas de secagem em temperatura constante. Em valores médios, verificou-se uma redução de 0,728% por hora. Com teor de umidade inicial próximo ao do angelim-pedra, a madeira de cambará iniciou com 89,02% de umidade, mas demandando de menos tempo (93 horas) para atingir o teor de umidade final desejado (7,25%), resultando em uma redução de aproximadamente 0,88% por hora.

As amostras de rosinha, mesmo com o alto teor de umidade inicial (78,01%) alcançaram o teor de umidade final de 8,21% em 152 horas, o que resulta em uma redução média de 0,46% por hora. Observa-se, na curva de secagem da espécie em questão, que, mesmo após o teor de umidade das amostras estar abaixo do PSF, o processo de secagem ocorreu rapidamente, o que é ilustrado pelo comportamento linear da curva nos estágios finais.

A secagem da muiracatiara iniciou ao teor de umidade médio de 42,16%, atingindo o teor de umidade final de 8,74% em 242 horas, o que resulta em uma redução média de 0,138% por hora. Esse valor é quase quatro vezes menor do que o estimado para o amarelinho, mesmo a espécie tendo o teor de umidade inicial mais baixo. O baixo teor de umidade inicial do amarelinho, assim como de outras utilizadas no presente trabalho, pode estar associado à densidade mais elevada das mesmas.

O teor de umidade inicial médio das amostras de amescla foi de 78,88%, com teor de umidade final de 9,49%, depois de 104 horas, o que resulta em uma média de 0,67% de redução do teor de umidade por hora. De acordo com o IBAMA (1997), a secagem de amescla é rápida quando efetuada em estufa, mas propensa a rachaduras e empenos.

As amostras de garapeira apresentaram teor de umidade inicial de 44,06%, necessitando de 97 horas, após o início da secagem, para atingirem o teor de umidade final de 7,53%, o que resulta em uma redução de aproximadamente 0,38% por hora.

A madeira de tauari iniciou a secagem ao teor de 59,59%, superior ao tauari-duro (44,38%), sendo que a primeira necessitou de 89 horas, enquanto a segunda precisou de 92 horas para atingir o mesmo teor de umidade (8%). Apesar do tempo de secagem entre as duas espécies ter sido similar, características da madeira, como a densidade mais elevada do tauari-duro ($0,72 \text{ g.cm}^{-3}$) comparado ao tauari ($0,50 \text{ g.cm}^{-3}$), assim como aspectos anatômicos podem ter influenciado na secagem. Desse modo, a madeira de tauari apresentou redução do teor de umidade de 0,58% por hora, enquanto o tauari-duro reduziu o valor de 0,39% por hora.

3.2 TAXA DE SECAGEM

Na Tabela 5, são apresentadas as taxas de secagem para as 12 espécies na condição verde até 30% de umidade; de 30% até 8%; e a taxa de secagem média.

Tabela 5 – Taxa de secagem das peças de madeira.

Espécie	TU _i (%)	Taxa de Secagem (g.cm ⁻² .h ⁻¹)			D _b (g.cm ⁻³)
		Verde – 30%	30% - 8%	Verde – 8%	
Amescla	78,88	0,00910 ^(36,26)	0,00162 ^(11,34)	0,00536 ^(30,98)	0,41
Rosinha	78,01	0,00517 ^(19,20)	0,00165 ^(23,43)	0,00341 ^(16,35)	0,44
Tauari	59,59	0,00835 ^(13,57)	0,00196 ^(13,97)	0,00516 ^(12,77)	0,50
Canelão	101,32	0,00323 ^(35,69)	0,00040 ^(22,44)	0,00182 ^(33,25)	0,57
Angelim-pedra	89,55	0,01100 ^(15,51)	0,00227 ^(22,58)	0,00663 ^(13,08)	0,59
Cambará	89,02	0,01246 ^(18,47)	0,00270 ^(23,82)	0,00758 ^(14,65)	0,59
Amarelinho	68,46	0,01208 ^(42,31)	0,00205 ^(28,91)	0,00706 ^(39,47)	0,61
Cupiúba	60,04	0,00454 ^(19,18)	0,00072 ^(17,58)	0,00263 ^(18,45)	0,66
Tauari-duro	49,38	0,00973 ^(13,65)	0,00149 ^(27,89)	0,00561 ^(12,59)	0,72
Muiracatiara	42,16	0,00529 ^(26,41)	0,00089 ^(14,70)	0,00389 ^(24,41)	0,76
Garapeira	44,06	0,01332 ^(47,65)	0,00319 ^(24,39)	0,00826 ^(39,55)	0,76
Cumarú	34,30	0,00919 ^(91,87)	0,00148 ^(18,56)	0,00534 ^(79,79)	0,92

A saber: TU_i: Teor de Umidade Inicial; entre parênteses, sobrescrito, estimativa do Coeficiente de Variação (%).

Ao analisar a Tabela 5, observa-se que as espécies apresentam taxas de secagem com grande variabilidade entre si, o que pode ser explicado, segundo Hildebrand (1970); Herzberg et al., (1985); Klitzke (2007); Klitzke e Batista (2010), em virtude de esta variável depender dos fatores inerentes à própria madeira, como a espécie, as características anatômicas, a permeabilidade, a massa específica e o teor de umidade. Além disso, os referidos autores citam que os fatores inerentes ao processo de secagem também influenciam, como a temperatura, a umidade relativa, a velocidade de circulação do ar, a largura da pilha de madeira, a espessura dos separadores. Todavia, os fatores inerentes ao processo de secagem foram controlados à medida que todas as amostras foram submetidas às mesmas condições de secagem.

A maior taxa de secagem desde a condição verde até 30% de umidade, entre 30% e 8% e a média total foi observada para a madeira de garapeira, com valores próximos dos obtidos com as amostras de cambará. Por outro lado, a menor taxa de secagem, para as três condições avaliadas, foi observada para a madeira de canelão.

A madeira de angelim-pedra, cuja densidade básica foi de $0,59 \text{ g.cm}^{-3}$, apresentou taxa de secagem de 0,01100, 0,00227 e $0,00663 \text{ g.cm}^{-2}.\text{h}^{-1}$ para os intervalos de verde até 30%, de 30% até 8% e média, respectivamente. Já a madeira de canelão, com densidade básica de $0,57 \text{ g.cm}^{-3}$, similar ao valor obtido para o angelim-pedra, apresentou valores médios de taxa de secagem, para os mesmos intervalos, de 0,00323, 0,00040 e 0,00182 (verde até 30%, 30% até 8% e média, respectivamente).

De acordo com a literatura, diversos autores (BRAZ et al. 2015; KLITZKE, 2007; KOLLMANN; COTE JUNIOR, 1968; OLIVEIRA et al., 2010; SIAU, 1984; SIMPSON, 1991; ZHANG et al., 1996) enfatizam que a densidade da madeira é de suma importância na predição do comportamento da madeira durante a etapa de secagem, podendo ser feitas inferências de que, ao ter maior densidade, menor será a taxa de secagem da madeira. No presente estudo, é possível que outros aspectos intrínsecos a cada espécie influenciaram a taxa de secagem das madeiras, pois o cumaru, de maior densidade dentre as 12 espécies estudadas ($0,92 \text{ g.cm}^{-3}$), apresentou taxa de secagem próxima a espécies como a amescla, tauari e tauari-duro, cujas massas específicas correspondem a 0,41, 0,50 e $0,72 \text{ g.cm}^{-3}$, respectivamente.

Todavia, Klitzke (2007) relatou que podem ocorrer exceções ocasionadas por características de permeabilidade, como a presença de algumas substâncias no interior das células. Complementarmente, características anatômicas, como frequência, diâmetro, abundância de vasos e presença de tilos ou demais substâncias que podem obstruir o deslocamento de fluídos dentro dos elementos de vasos, influenciam na taxa de secagem e, conseqüentemente, na velocidade com que a madeira seca.

Como esperado para todas as espécies, a maior taxa de secagem foi verificada na condição de verde até 30% de umidade, se comparada com a condição entre 30% e 8% de umidade; enquanto isso, a taxa de secagem média ou total apresentou valores intermediários entre ambas. Apesar da variação acentuada do teor de umidade entre as espécies, as taxas de secagem, desde a condição verde até 30%, foram entre três e oito vezes maiores comparativamente com o intervalo entre 30% e 8% de umidade.

3.3 DEFEITOS DE SECAGEM

Os principais defeitos de secagem avaliados foram subdivididos em empenos, rachaduras e colapso. Para todos os defeitos, os resultados são compostos pelo valor médio de todas as peças avaliadas.

3.3.1 Empenos

Na Tabela 6, são apresentados os resultados médios da flecha de empenos e do percentual de peças que apresentaram arqueamento, encurvamento, encanoamento e torcimento para as 12 espécies de madeira estudadas.

Tabela 6 – Defeitos de secagem do tipo empenamento nas peças de madeira.

Espécie	Arqueamento		Encurvamento		Encanoamento		Torcimento	
	$F_{\text{arq.}}$ (mm.m ⁻¹)	X_{Arq} (%)	$F_{\text{Encur.}}$ (mm.m ⁻¹)	$X_{\text{Encur.}}$ (%)	$F_{\text{Encan.}}$ (mm)	$X_{\text{Encan.}}$ (%)	$F_{\text{Tor.}}$ (mm)	$X_{\text{Tor.}}$ (%)
Amarelinho	2,44	81,25	0,69	25,00	1,16	62,50	4,13	50,00
Amescla	1,83	65,00	2,37	85,00	0,63	45,00	1,35	40,00
Angelim-pedra	1,73	80,95	1,25	47,62	0,24	19,05	2,00	52,38
Cambará	2,98	85,00	2,35	55,00	0,74	40,00	1,63	30,00
Canelão	0,95	40,00	0,80	35,00	0,18	20,00	0,55	20,00
Cumarú	1,25	38,10	0,77	33,33	0,00	0,00	0,14	4,76
Cupiúba	1,06	38,10	1,20	57,14	0,38	28,57	2,33	47,62
Garapeira	3,40	94,74	3,08	68,42	0,32	26,32	3,11	52,63
Muiracatiara	1,11	45,00	0,43	20,00	0,32	30,00	1,63	45,00
Rosinha	1,42	75,00	2,49	70,00	0,45	45,00	6,26	85,00
Tauari	1,47	52,38	1,37	9,52	0,11	38,10	2,05	42,86
Tauari-duro	1,96	90,48	0,58	23,81	0,11	14,29	1,42	33,33

A saber: $F_{\text{arq.}}$: Flecha de arqueamento; $X_{\text{Arq.}}$: Peças com arqueamento; $F_{\text{Encur.}}$: Flecha de encurvamento; $X_{\text{Encur.}}$: Peças com encurvamento; $F_{\text{Encan.}}$: Flecha de encanoamento; $X_{\text{Encan.}}$: Peças com encanoamento; $F_{\text{Tor.}}$: Flecha de torcimento; $X_{\text{Tor.}}$: Peças com torcimento.

Para os empenos do tipo arqueamento, encurvamento e encanoamento, todas as espécies apresentaram valores médios inferiores aos estabelecidos na NBR 9487 (ABNT, 1986), sendo que o torcimento não é admitido pela norma. A análise conjunta das informações referentes à intensidade do defeito e à percentagem de ocorrência é fundamental para a compreensão do comportamento que as espécies apresentaram durante a secagem.

Observando a Tabela 6, acima, em linhas gerais, é perceptível que, para vários dos empenos, um número considerável de espécies apresentou um percentual de peças com algum nível de defeito. Todavia, é necessário frisar que, independente da magnitude do defeito, todo e qualquer nível de empenho foi considerado como defeito.

O arqueamento é um defeito de secagem difícil de ser controlado, pois, segundo Martins (1988), é caracterizado por uma curvatura ao longo do comprimento da peça em sua extremidade. Stangerlin et al. (2009) afirmam que a manifestação do arqueamento nas peças ao final do processo de secagem é um dos defeitos que apresentam maiores dificuldades em relação ao seu controle, porque, durante a secagem, as tábuas ficam dispostas de modo que a restrição mecânica aplicada não atua lateralmente; com isso, existe maior dificuldade para evitar ou reduzir o surgimento de tal defeito.

Para Lima (2005), o arqueamento pode ser minimizado durante a secagem, ao se ter procedimentos adequados desde o momento de desdobro das toras, no qual, para as que apresentam assimetria de medula, deve-se atentar aos cuidados com o posicionamento correto das toras no carro porta toras. Isso pode ter contribuído para os níveis de arqueamento observados, pois o sistema de desdobro adotado para as toras foi o convencional, cujo objetivo é maximizar o aproveitamento das toras, o que ocasiona na formação de ângulos entre a direção do corte e a direção das fibras da madeira.

No presente estudo, apenas o canelão apresentou flecha de arqueamento médio inferior a 1 mm.m^{-1} , tendo 40% das peças apresentado algum nível de defeito. Andrade (2000), utilizando programas de secagem para freijó, jutaí-cica, perobamica e imbuia, não verificou peças com arqueamento para as três primeiras espécies, enquanto a última apresentou 10% de peças com tal defeito. Os mesmos resultados foram verificados pelo autor para o encurvamento e o encanoamento.

As espécies garapeira, cambará e amarelinho apresentaram os maiores valores médios de arqueamento, com 3,40, 2,98 e 2,44 mm.m^{-1} , respectivamente. Quanto às peças acima do valor máximo admitido pela NBR 9487, 15,79%, 15,00% e 6,25% das peças de garapeira, cambará e amarelinho, respectivamente, apresentaram-se nesta situação. Dentre os defeitos admitidos pela NBR 9487, apenas neste caso foram verificadas peças acima do limite aceito.

A temperatura utilizada na secagem das amostras pode ter contribuído para o surgimento do arqueamento, visto que a temperatura inicial de programas de secagem adequados para madeiras de espécies de folhosas tende a ser inferior a utilizada neste ensaio.

De acordo com Brandão (1989), o encurvamento dá-se em função das diferentes retrações que ocorrem na madeira em razão da secagem mais acelerada em uma face frente a outra. Normalmente, trata-se de um defeito observado em peças orientadas tangencialmente, podendo ser reduzido ou eliminado com uso de restrição mecânica (KLITZKE, 2007).

O encurvamento foi observado em todas as espécies estudadas, com flecha média e percentual de peças com defeito de modo distinto entre as mesmas. Espécies como muiracatiara, tauari-duro, amarelinho, cumaru e o canelão apresentaram valores médios abaixo de $1,0 \text{ mm.m}^{-1}$, sendo que todas as peças podem ser classificadas como sem defeito, por estarem abaixo do valor limite de $5,0 \text{ mm.m}^{-1}$.

De acordo com Galvão e Jankowsky (1985); Simpson (1991), o encanoamento é consequência da diferença de contração entre as direções radial e tangencial, não sendo observado tal defeito em peças orientadas radialmente. Assim, o coeficiente anisotrópico da madeira pode indicar se a espécie tende a apresentar este defeito de secagem ou não. Analisando a Tabela 6, percebe-se que, para este defeito, os maiores valores médios foram observados em amarelinho, cambará, amescla e rosinha, sendo 1,16, 0,74, 0,63 e 0,45 mm, respectivamente. As espécies que apresentam elevados valores médios de encanoamento apresentaram diferenças acentuadas entre as contrações radiais e tangenciais, cujos coeficientes anisotrópicos foram da ordem de 2,08, 1,83, 1,61 e 2,69 para amarelinho, cambará, amescla e rosinha.

Por outro lado, o cumaru, cujo coeficiente anisotrópico foi de 1,38, indicando ser uma madeira de ótima estabilidade dimensional, não apresentou este defeito de secagem. O tauari e o tauari-duro, consideradas de ótima estabilidade dimensional pelos valores de coeficiente anisotrópico baixos (1,25 e 1,45, respectivamente), apresentaram baixa incidência de encanoamento (0,11 mm). Todavia, o canelão e o angelim-pedra, com elevados coeficientes anisotrópicos, 2,39 e 2,03, apresentaram reduzidos valores médios de encanoamento, assim como um baixo percentual de peças com tal defeito (Tabela 6).

Simpson (1991) e Melo (1999) afirmam que, quando o empilhamento é realizado de forma adequada e faz-se a utilização de restrição nas pilhas, auxilia a minimizar o surgimento deste defeito. A mesma medida é válida como providência de controle do encurvamento, mas o uso de restrição mecânica nas pilhas do presente estudo não foi possível por limitação do equipamento utilizado e pelo fato do peso das próprias peças não ser suficiente para causar um impacto significativo neste aspecto. A ausência de restrição mecânica, diferentemente do que ocorre quando a madeira é gradeada para secagem, pode ter influenciado nos defeitos de secagem, em especial no caso do encurvamento e encanoamento.

Conhecido como um dos empenos mais difíceis quanto ao seu controle, com elevado potencial de restringir o uso da madeira após a secagem, o torcimento destacou-se por valores altos. Nas madeiras de rosinha, amarelinho e garapeira, um percentual considerável das peças apresentou tal defeito (85,0%, 50,0% e 52,63%, respectivamente), além de valores médios mensurados elevados, sendo 6,26, 4,13 e 3,11 mm. Isso demonstra que as condições de secagem, bem como a ausência de restrição mecânica para estas madeiras pode ter favorecido o surgimento desse defeito de secagem. A Figura 11 ilustra uma peça de amarelinho com torcimento acentuado.

Diversos autores, como Rasmussen (1961), Pratt (1974), Oliveira (1981), Galvão e Jankowsky (1985), Martins (1988), afirmam que o torcimento pode ocorrer por diferença de retração, irregularidades da grã ou tensões desenvolvidas durante o crescimento da árvore. Os mesmos autores citam que este defeito pode ocorrer por uma combinação do coeficiente anisotrópico elevado e de desvios na grã, como grã do tipo entrecruzada, espiralada, ondulada e diagonal.

A madeira de cumaru foi a que, de modo geral, apresentou o menor nível de defeitos de secagem quanto aos empenos. Jankowsky (1990) a descreve como uma madeira que, quando submetida à secagem ao ar, é relativamente fácil de secar, com pequena tendência a rachaduras superficiais e empenamento moderado. Porém, a secagem artificial é lenta e praticamente isenta de defeitos.

Quanto ao amarelinho, IBAMA (1997) relata que esta espécie possui secagem rápida, mas com forte tendência a ocorrer empenos, sobretudo torcimento, quando submetida à secagem em estufa. Esta característica ficou evidente no estudo, pois a espécie apresentou o maior encanoamento médio dentre as 12

espécies, o segundo maior valor de torcimento e terceiro para o arqueamento (Figura 11).

Figura 11 – Amostra de amarelinho com empenamento do tipo torcimento



De acordo com IBAMA (1997), a amostra apresenta secagem rápida em estufa, com tendência moderada na apresentação de defeitos, como encanoamento e torcimento, situações observadas no presente estudo, cabendo, ainda, salientar que defeitos, como arqueamento e encurvamento, também foram observados em níveis intermediários.

As madeiras de angelim-pedra e de tauari, segundo IBAMA (1997), apresentam tendência pequena a arqueamento e torcimento para a primeira, e torcimento e rachaduras em nível moderado quando submetidas à secagem em estufa, além de ambas serem consideradas como de secagem rápida em estufa.

De acordo com Jankowsky (1990), a madeira de cupiúba apresenta ligeira incidência de defeitos quanto submetida à secagem em estufa, ao passo que a muiracatiara apresenta-se como uma espécie de secagem difícil, pois apresenta problemas, como rachaduras e empenos, podendo, inclusive, ocorrer rachaduras profundas e endurecimento superficial.

Jankowsky (1990) recomenda que a secagem de garapeira, quando realizada em estufa, seja de modo lento e bem controlado, pois, apesar de sua facilidade para perder água, pode apresentar alta incidência de defeitos de secagem, algo observado neste estudo para quase todos os defeitos avaliados.

3.3.2 Rachaduras

As espécies contempladas no presente estudo foram avaliadas quanto à ocorrência de rachaduras de superfície, internas e de topo, sendo que, para esta última, estimou-se o Índice de Rachaduras de Topo (IRT) médio, e os dados obtidos são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Rachaduras de topo, de superfície e internas durante a secagem das madeiras em estufa

Espécies	Rachaduras de topo		Rachaduras de superfície (%)	Rachaduras internas (%)
	IRT médio (%)	Peças com defeito (%)		
Amarelinho	1,38	12,50	0,00	0,00
Amescla	0,74	10,00	0,00	5,00
Angelim-pedra	1,76	19,05	0,00	4,76
Cambará	9,44	25,00	0,00	0,00
Canelão	0,80	15,00	0,00	0,00
Cumarú	1,37	9,52	0,00	0,00
Cupiúba	11,00	80,95	19,05	0,00
Garapeira	6,20	52,63	5,26	21,05
Muiracatiara	2,52	30,00	25,00	0,00
Rosinha	1,68	30,00	0,00	0,00
Tuari	4,16	42,86	0,00	4,76
Tuari-duro	6,21	52,38	23,81	42,86%

A saber: IRT: Índice de Rachaduras de Topo.

Dentre as espécies estudadas, apenas quatro apresentaram rachaduras internas em alguma das peças avaliadas. Destaca-se a ocorrência deste defeito nas espécies tauari-duro e garapeira, cujo percentual de peças com rachaduras internas foi de 42,86% e 21,05%, respectivamente. Ambas as espécies possuem densidade alta e a secagem foi rápida, com valores elevados de taxa de secagem, em especial a garapeira. As duas variáveis combinadas podem estar relacionadas à ocorrência deste defeito de secagem.

De acordo com Santos (2002), as rachaduras internas manifestam-se ao final do processo de secagem da madeira, em geral associadas ao prolongamento das

rachaduras superficiais. Ressalta-se que tauari-duro e garapeira apresentaram peças com rachaduras de superfície e com IRT acima de 5%, em média.

Quanto às rachaduras de superfície, foram observadas a presença em muiracatiara, tauari-duro, cupiúba e garapeira, com percentuais de peças apresentando este defeito na ordem de 25,00, 23,81, 19,05 e 5,26%, respectivamente. Para Jankowsky e Henriquez (1983), durante esse processo de remoção de água, devido à retração da madeira, em função da dessorção de umidade, surgem tensões internas capazes de ocasionar defeitos de secagem, como as rachaduras superficiais. As tensões internas de secagem se formam por ocasião de uma diferença de umidade da superfície da peça e da porção central da mesma, o que pode ocorrer em função de um processo de secagem rápida.

Além disso, um aspecto que vale ser ressaltado foi a ocorrência de um tipo de rachadura particular em muiracatiara. Nesta espécie, as rachaduras denominadas superficiais ocorriam no limite dos anéis de crescimento (Figura 12), dando a aparência de um desprendimento em camadas ou placas. Este aspecto foi observado apenas após a secagem, sendo que as amostras utilizadas não possuíam porções de alburno ou de medula.

Figura 12 – Rachaduras de superfície em peças de madeira de muiracatiara



Em relação às rachaduras de topo, todas as espécies apresentaram alguma peça com este defeito. O canelão foi a espécie que apresentou o menor percentual e também o menor IRT médio dentre as 12 espécies avaliadas. A espécie apresentou o maior coeficiente anisotrópico, o que poderia ser associado a alta incidência de rachaduras. Porém, foi a espécie de secagem mais lenta e, apesar desta característica não ter sido avaliada no presente estudo, o canelão possui grã direita, o que, segundo Klitzke (2005), colabora para menor incidência de rachaduras.

A cupiúba apresentou o maior percentual de peças com rachaduras de topo (80,95%), com um IRT médio de 11,00%, o valor mais alto dentre as espécies estudadas. Em seguida, a madeira de cambará apresentou um IRT médio de 9,44% em apenas 25% das peças, o que indica rachaduras maiores nas peças que apresentaram tal defeito. O IRT da cupiúba e do cambará, cujos valores foram de 11,00 e 9,44%, respectivamente, significam que cerca de 10% do comprimento das peças deveria ser retirado para eliminar as rachaduras e, assim, poder utilizar a madeira para as mais diversas finalidades. As duas espécies citadas e a garapeira, que apresentou IRT médio de 6,20%, são espécies que possuem grã entrecruzada,

diferentemente do tauari-duro, que possui grã direita e apresentou IRT médio de 6,21%.

Em relação ao disposto na NBR 9487, o qual regulamenta que amostras de madeira ultrapassando o limite de 20% para o IRT são consideradas como sem classe de qualidade. Vale salientar que nenhuma das espécies atingiu esse valor médio, sendo, assim, consideradas de primeira ou segunda classe, a depender de outros critérios. Nesse ínterim, a cupiúba, por ter apresentado valor superior a 10% de IRT médio, não poderia ser classificada como madeira de primeira qualidade, sendo enquadrada na segunda categoria.

Um aspecto evidente durante a secagem foi a ocorrência de rachaduras tanto superficiais quando de topo nas primeiras horas da secagem, e à medida que as amostras reduzem o seu teor de umidade, as rachaduras reduzem tanto em quantidade quanto em dimensão. Tal fato pode ser observado na Figura 13, na qual o primeiro registro (A) refere-se ao início da secagem e o último (B), após o término da mesma. Isso pode estar associado ao gradiente de umidade mais acentuado que ocorre no início da secagem da madeira e que tende a reduzir conforme a água é removida.

Figura 13 – Vista do topo de uma peça após poucas horas de secagem e ao final da etapa.



De acordo com Klitzke (2005), uma madeira na qual as fibras são paralelas ao eixo de orientação ou paralelas ao eixo longitudinal da peça serrada é considerada de grã reta, e seu comportamento, durante a secagem, auxilia significativamente na

redução de defeitos como empenamentos e rachaduras. Isso deixa clara a necessidade de obter informações que visem contribuir para encontrar respostas para as situações observadas.

Complementarmente, as contrações da madeira poderão fornecer algum subsídio, pois, de acordo com Galvão e Jankowsky (1985), as rachaduras aparecem como consequências da diferença de contração nas direções radial e tangencial da madeira, e de diferenças de umidade entre regiões contíguas de uma peça durante o processo de secagem.

De acordo com Jankowsky (1990), o gênero *Couratari* apresenta secagem rápida, sem a incidência significativa de defeitos, quando conduzida de modo adequado. Todavia, IBAMA (1997) alerta que a espécie *Couratari guianensis* pode apresentar problemas de secagem como rachaduras e torcimentos moderados. Tendo em vista tais problemas que a madeira do gênero apresenta, ITTO (2017) recomenda que a secagem seja realizada de modo suave para evitar rachaduras e empenos em excesso.

3.3.3 Colapso

O colapso celular foi observado em peças das madeiras de amescla, com um percentual de 5%, e muiracatiara, perceptível em 30% das peças utilizadas (Figura 14).

Figura 14 – Colapso celular em muiracatiara



Apesar de todas as espécies possuírem algumas amostras radiais dentre aquelas que foram utilizadas, nas demais espécies este defeito não foi detectado, o que indica maior suscetibilidade da muiracatiara para a ocorrência de colapso celular. Isso deve ser ressaltado, visto que esta espécie, em virtude do aspecto visual proporcionado por cortes radiais, tem sido preferencialmente desdobrada de modo que a maioria das peças produzidas seja com esta orientação.

Do total de peças utilizadas, 30% apresentaram algum nível de colapso, com 0,79 mm de redução média, valor este que, de acordo com a classificação sugerida por Welling (1994), indica a presença de colapso leve. Apesar do pequeno valor médio, a redução relativa da espessura das peças pela necessidade de aplainamento das mesmas foi de 3,0%, podendo ser recomendada uma sobre medida de corte superior para esta espécie, em virtude da possibilidade de colapso durante a secagem.

No caso da amescla, apenas uma peça apresentou colapso celular perceptível, reduzindo sua espessura após a secagem em 1,13 mm, o que permite classificar como de intensidade leve.

Blumhm e Kauman (1965) citam que o colapso é mais forte na direção tangencial quando comparada à radial e, de mesmo modo, no lenho inicial, comparado ao tardio. Desse modo, segundo os autores supracitados, o colapso se manifesta de modo mais intenso em tábuas orientadas radialmente, se comparadas às aquelas orientadas tangencialmente, o que foi verificado para a muiracatiara.

Além das características intrínsecas à madeira, fatores relacionados ao ambiente de secagem influenciam o surgimento deste defeito, conforme relatado por Galvão e Jankowsky, (1985); Brandão (1989); Klitzke (2007), sendo a temperatura, a umidade relativa e o tempo de secagem fatores que contribuem para o surgimento do colapso na madeira. Assim, as características intrínsecas da madeira de muiracatiara e as condições de secagem podem ter sido determinantes para a verificação deste defeito em 30% das peças, devendo-se adotar medidas de controle.

4 CONCLUSÃO

As madeiras utilizadas apresentaram velocidades de secagem distintas entre si, evidenciando a necessidade de conhecer tais características, visto que espécies de densidade similar apresentaram taxa de secagem com variação próxima a 400%.

Todas as espécies estudadas apresentaram tendência a algum tipo de defeito de secagem, sendo que o arqueamento e o encurvamento foram verificados em algum nível em todas as espécies.

Amarelinho, rosinha e garapeira apresentaram grande incidência de torcimento, enquanto o colapso celular foi detectado apenas em amostras de amescla e muiracatiara.

Rachaduras de topo em níveis que requerem atenção foram observadas para as madeiras de cambará e cupiúba, com uma perda média de aproximadamente 10% do comprimento das peças.

CAPÍTULO III – AGRUPAMENTO E ELABORAÇÃO DO PROGRAMA DE SECAGEM

1 INTRODUÇÃO

O agrupamento de espécies visando a secagem deve, inicialmente, partir da busca de informações relativas às madeiras com que se deseja trabalhar, avaliando se as mesmas possuem certa similaridade com base em determinados aspectos.

A densidade e o teor de umidade são as características da madeira mais empregadas para fazer inferências sobre suas propriedades. Isso ocorre, porque, de acordo com Simpson e Baah (1989), são as variáveis mais fáceis de serem determinadas e as que mais influenciam a secagem da madeira; no entanto, apresentam certa restrição quanto a sua eficiência. Andrade, Jankowsky e Ducatti, (2001) complementam que a densidade básica, isoladamente, não é um bom parâmetro para indicação de programas e agrupamento de espécies para secagem. Os mesmos autores recomendam que, para agrupar espécies em um mesmo programa de secagem, deve-se levar em consideração algumas características específicas, tais como: o teor de umidade inicial, a velocidade de secagem e a tendência aos defeitos.

Para agrupar espécies ou formar grupos de indivíduos que possuem similaridade quando se avalia determinadas variáveis, Johnson e Wicthorn (1992) recomendam a análise estatística multivariada. Vicini (2005) afirma que a técnica de análise de agrupamento engloba uma variedade de técnicas e algoritmos, sendo que o objetivo é encontrar, separar e agrupar objetos em grupos, com certo índice de similaridade.

O agrupamento de madeiras, com base nas suas características, deve ser baseado em um método que possibilite verificar além da formação de um grupo à distância entre as espécies. Valentin (2000) afirma que um método de agrupamento é melhor do que outro quando o dendrograma fornece uma imagem menos distorcida da realidade, sendo possível avaliar o grau de deformação provocado pela construção do dendrograma calculando-se o coeficiente de correlação cofenético.

A madeira apresenta um comportamento específico durante a secagem; todavia, existem espécies com características similares que, a princípio, poderão ser

agrupadas em um único programa de secagem, tornando-se uma alternativa para as indústrias (LOUZADA; MARCOS; SILVA, 2002).

Com base na hipótese de que diferentes espécies de madeira podem ser agrupadas utilizando suas características, o objetivo do presente estudo foi realizar o agrupamento de madeiras com base em suas características e elaborar um programa de secagem para o grupo de maior similaridade entre as espécies.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 AGRUPAMENTO DAS ESPÉCIES E PROGRAMAÇÃO DA SECAGEM

Após a obtenção dos dados referentes às espécies nos ensaios de secagem a 60°C, com relação às propriedades físicas e químicas das madeiras, realizou-se a análise de agrupamento das espécies. Para tal, consideraram-se apenas os dados referentes ao ensaio de secagem a 60°C, com vista a atender o objetivo do estudo. Foram utilizadas, no agrupamento, as seguintes variáveis: taxa de secagem nos intervalos da condição verde até 30%; de 30% até 8%; e de verde até 8% de umidade. Além disso usou-se os resultados obtidos para os defeitos de secagem, como o IRT, a flecha de arqueamento e encurvamento e o valor médio de encanoamento e torcimento.

Algumas características avaliadas, como rachaduras de superfície, rachaduras internas e colapso celular, não foram empregadas na análise constante, pois foram características presentes apenas em algumas peças e, por limitação do método, tenderiam a agrupar somente as espécies que apresentaram essas características.

O agrupamento das espécies foi realizado com o uso do *software Minitab 17*, empregando-se o método de análise de agrupamento por distância euclidiana. Os dados foram previamente padronizados, por meio da equação 15, para minimizar o efeito da grandeza das variáveis utilizadas, de acordo com as recomendações de Vicini (2005).

$$A_{PAD} = \frac{(Média_A - Média_E)}{Desvio\ Padrão_E} \quad (15)$$

A_{PAD} : Valor padronizado da variável “x” para cada espécie;

$Média_A$: Valor médio da variável “x” para a espécie;

$Média_E$: Média da variável “x” de todas as espécies;

$Desvio\ Padrão_E$: Desvio padrão da variável “x” para todas as espécies.

No procedimento de análise de agrupamento das espécies, estimou-se o coeficiente cofenético (0,8496) no qual, segundo Vicini (2005), o menor grau de distorção será refletido pelo maior coeficiente cofenético, cujo fornecimento se dá pela matriz fenética F, a qual teve seus valores obtidos junto à matriz de distâncias

inicial e à matriz cofenética C, sendo estes os valores obtidos junto à matriz final das distâncias. A referida autora continua ao afirmar que, quanto maior o coeficiente cofenético (mais próximo de 1), maior a capacidade de evidenciar, de modo mais claro, a estrutura dos dados, isto é, a existência de grupos.

Utilizou-se uma similaridade entre as espécies de 80% ou mais para formação dos grupos, ou seja, apenas aqueles com índice de similaridade acima de 80 foram utilizados para a elaboração dos programas de secagem.

2.2 SECAGEM DRÁSTICA

Após a formação dos grupos, procedeu-se a secagem drástica de amostras de madeira a temperatura constante de 100°C. Esta metodologia, empregada para elaborar programas de secagem, baseia-se na hipótese de que pequenas amostras de madeira, quando submetidas à secagem drástica, apresentam comportamentos equivalentes aos que, possivelmente, ocorreriam na secagem convencional.

Utilizou-se 20 corpos de prova de cada espécie, com dimensões de 10,0 x 5,0 x 1,0 cm, sendo comprimento, largura e espessura, respectivamente, os quais foram submetidos à secagem a 100°C, em estufa de laboratório, até que os mesmos atingissem o teor de umidade estimado de 5%.

Durante a secagem drástica, as amostras tiveram suas massas determinadas e suas dimensões mensuradas, com intervalo entre duas medições consecutivas de uma hora, no início do ensaio, chegando, no máximo, a seis horas, após o teor de umidade das amostras apresentar-se baixo, com pequena variação na massa entre as mensurações. Essa variação no tempo entre as medições ocorreu em virtude da maior perda de massa no início da secagem em relação ao final do processo.

Os parâmetros dos programas de secagem, especificamente a temperatura inicial, final e o potencial de secagem, foram determinados com base na metodologia descrita em detalhes por Simpson (1989).

Para a determinação do teor de umidade inicial, seccionou-se uma amostra de cada extremidade dos corpos de prova com 2,5 cm de comprimento. Empregou-se o método gravimétrico, descrito em diversos manuais de secagem (Rasmussen, 1961; Pratt, 1974; Galvão e Jankowsky, 1985), no qual as amostras úmidas foram submetidas à secagem em estufa a 103°C, até atingirem massa constante. Em seguida, foi aplicada a equação 16 para obtenção do teor de umidade inicial (TU_i).

$$TU_i = \left(\frac{M_U - M_S}{M_S} \right) * 100 \quad (16)$$

TU_i = Teor de umidade inicial (%);
 Mu = Massa úmida da amostra (g);
 Ms = Massa seca da amostra (g).

2.3 VARIÁVEIS PARA ESTIMATIVA DOS PROGRAMAS DE SECAGEM

Para obter as variáveis de interesse, foram elaboradas duas planilhas contendo o teor de umidade e o peso de cada amostra para todas as avaliações. Inicialmente, foi necessário estimar a massa e o teor de umidade a 30% e 5%, por meio da interpolação dos dados para cada amostra. Tal procedimento foi necessário, pois seria impossível definir exatamente o momento em que cada amostra atingiria os teores de umidade desejados.

Após obter os dados necessários, foram estimadas as variáveis T₁, T₂ e T₃, as quais são, respectivamente, tempo de secagem de verde até 5%, verde até 30%, e de 30% até 5%. Essas variáveis foram empregadas para estimar as variáveis V₁, V₂ e V₃, que correspondem, nesta ordem, à velocidade de secagem de verde a 5% (Equação 17), de verde a 30% (Equação 18), e de 30% a 5% (Equação 19), de acordo com o proposto por Brandão (1989) e modificado por Jankowsky et al. (1997), os quais foram citados por Ciniglio (1998).

$$V_1 = \frac{m_u - m_5}{T_1 * 100} \quad (17)$$

V₁: Velocidade de secagem da umidade inicial até 5% (g/h);
 m_u: Massa da amostra úmida (umidade inicial) (g);
 m₅: Massa da amostra a 5% de umidade (g);
 T₁: Tempo de secagem da umidade inicial até 5% (h).

$$V_2 = \frac{m_u - m_{30}}{T_2 * 100} \quad (18)$$

V₂: Velocidade de secagem da umidade inicial até 30% (g/h);
 m_u: Massa da amostra úmida (umidade inicial) (g);
 m₃₀: Massa da amostra a 30% de umidade (g);
 T₂: Tempo de secagem da umidade inicial até 30% (h).

$$V_3 = \frac{m_{30}-m_5}{T_3*100} \quad (19)$$

V_3 : Velocidade de secagem de 30 a 5% de umidade (g/h);

m_{30} : Massa da amostra a 30% de umidade (g);

m_5 : Massa da amostra a 5% de umidade (g);

T_3 : Tempo de secagem de 30 a 5% de umidade (h).

Os parâmetros do programa de secagem foram calculados com base nos valores médios das amostras das espécies utilizadas, aplicando-se as equações da Tabela 8.

Tabela 8 – Equações para determinação dos parâmetros do programa de secagem

PARÂMETRO	EQUAÇÃO
Temperatura Inicial	$TI = 27,9049 + 0,7881 \mathbf{T2} + 419,0254 \mathbf{V1} + 1,9483 \mathbf{R2}$
Temperatura Final	$TF = 49,2292 + 1,1834 \mathbf{T2} + 273,8685 \mathbf{V2} + 1,0754 \mathbf{R1}$
Potencial de Secagem	$PS = 1,4586 - 30,4418 \mathbf{V3} + 42,9653 \mathbf{V1} + 0,1424 \mathbf{R3}$

Fonte: Jankowsky et al. (1997), citados por Ciniglio (1998).

Onde:

$T2$ = Tempo de secagem da umidade inicial a 30% (h)

$V1$ = Velocidade de secagem até 5% (g/h)

$V2$ = Velocidade de secagem até 30% (g/h)

$V3$ = Velocidade de secagem de 30 a 5% (g/h)

$R1$ = Rachadura de topo até 5% (Un.)

$R2$ = Rachadura de topo até 30% (Um.)

$R3$ = Rachadura de topo de 30 a 5% (Un.)

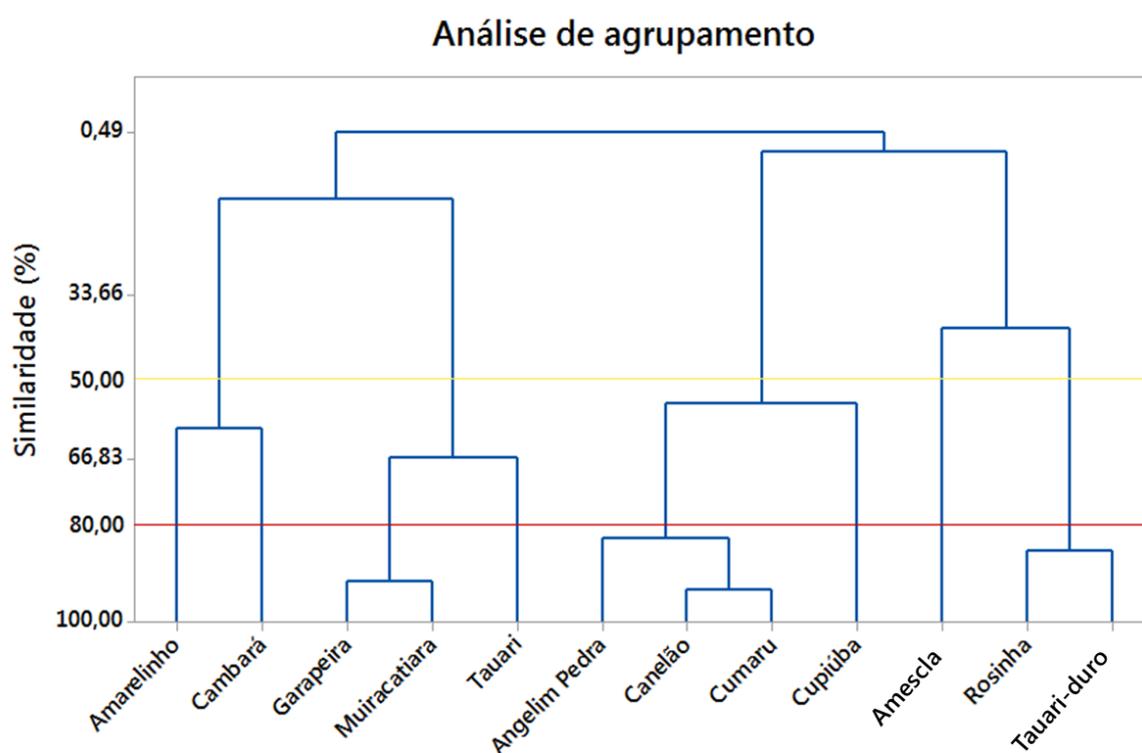
Com base nos parâmetros obtidos pelas equações acima para cada espécie, foi analisado se a temperatura inicial, a temperatura final e o potencial de secagem de cada espécie eram próximos entre si, o que indicaria, de modo parcial, êxito no resultado da análise de agrupamento. Assim, elaborou-se um programa de secagem com parâmetros médios obtidos para as espécies agrupadas, com o auxílio de cartas psicrométricas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 AGRUPAMENTO DAS ESPÉCIES

Na Figura 15, é apresentado o dendrograma vertical resultante da análise de agrupamento das espécies, utilizando as variáveis obtidas da secagem, em estufa a 60°C, das madeiras.

Figura 15 – Dendrograma da análise de agrupamento das espécies



Observando o dendrograma ilustrado pela Figura 15, o eixo das abscissas indica a distância entre as espécies com base nas variáveis empregadas, no qual espécies como rosinha e tauari-duro são consideradas similares ou próximas entre si, mas muito distantes do amarelinho. Isso é explicado por Vicini (2005), ao afirmar que o objetivo da análise de agrupamento é reunir objetos semelhantes, tornando-se necessária alguma medida para avaliar o quão semelhantes ou diferentes são os objetos. A autora ressalta, ainda, que geralmente costuma-se avaliar a semelhança em termos de distância entre pares de objetos, e que aqueles possuidores da menor

distância entre si são mais semelhantes, um ao outro, do que os objetos com a maior distância.

No dendrograma, a linha em vermelho indica como limite o valor de 80% de similaridade entre as espécies, sendo que os grupos formados abaixo da mesma possuem uma similaridade entre si superior a este valor. Um grupo com três espécies foi formado nesta situação, compreendido pelas espécies canelão, cumaru e angelim-pedra, cujo índice de similaridade foi de 83,01. De acordo com o indicado pela análise de agrupamento, este grupo foi o selecionado para a elaboração do programa de secagem, visto que é o maior grupo, composto por três espécies. Além deste, outros dois grupos pequenos foram indicados como similares pela ferramenta: um compreendido pelas espécies rosinha e tauari-duro, com índice de similaridade de 85,68; e outro, pelas espécies garapeira e muiracatiara, cuja similaridade foi de 91,94%.

Marques (2008) agrupou 41 espécies de madeiras tropicais da Amazônia por meio de análise de *cluster*, com base na taxa de secagem do estado saturado até 12% de umidade, do estado saturado até 30% de umidade, e de 30% até 12% de umidade. Os grupos foram formados para cada intervalo da taxa de secagem, com a obtenção de quatro conjuntos, sendo eles: secagem muito difícil, difícil, fácil e muito fácil. Os grupos formados pela autora não foram os mesmos para cada taxa de secagem determinada, pois a sucupira (*Bowdichia nítida*) foi classificada como de secagem muito fácil de 30% a 12% de umidade, e de secagem difícil entre verde e 30% de umidade. Por outro lado, outras espécies mantiveram seus grupos, como as madeiras de *Zollernia paraensis*, *Micrandra rossiana* e *Brosimum gaudichaudii*, classificadas, pela autora, como de secagem difícil.

Andrade (2000), Andrade, Jankowsky e Ducatti (2001) e Andrade et al. (2001) agruparam, em seus estudos, 13 espécies comercializadas nas regiões Sul e Sudeste do país, com base na metodologia de secagem drástica. Para tal, os autores estimaram os parâmetros dos programas de secagem e, com base nisso, desenvolveram programas de secagem específicos para *Pinus hondurensis*, peroba mica (*Aspidosperma* sp.), itaúba (*Mezilaurus itauba*), imbuia (*Ocotea porosa*) e mandioqueira (*Qualea* sp.). Além disso, agruparam as espécies *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus tereticornis*, freijó (*Cordia goeldiana*), jatobá (*Hymenaea* sp.), jutaí-cica (*Martiodendron* sp.), pau-marfim (*Balfourodendron riedelianum*), tamboril (*Enterolobium contortisiliquum*) e tauari (*Couratari* sp.) em dois programas de

secagem básicos. Os autores concluíram que, isoladamente, a densidade básica não é um bom parâmetro para indicação de programas e de agrupamento de espécies para secagem, visto que não explica todas as variações que ocorrem.

Do mesmo modo que observado por Andrade (2000) e Andrade, Jankowsky e Ducatti (2001), madeiras com densidade similar, como a mandioqueira e o pau-marfim, foram classificadas em programas de secagem diferentes, ao passo que o pau-marfim, tamboril e tauari, que apresentaram diferentes massas específicas, foram agrupados no mesmo programa. As madeiras de cumaru, angelim-pedra e canelão, cuja densidade básica foi de 0,92, 0,59 e 0,57 g.cm⁻³, respetivamente, formaram um grupo similar, considerando o comportamento durante a secagem. Já as espécies cambará e angelim-pedra, cujas densidades foram de 0,59 g.cm⁻³, não apresentaram similaridade entre si. Cabe salientar que garapeira e muiracatiara, ambas com valor de densidade básica de 0,76 g.cm⁻³, apresentaram similaridade.

Diversos autores, entre eles Kollmann e Cote Junior (1968), Siau (1984), Simpson (1991), Klitzke (2007) e Oliveira et al. (2010) afirmam que a densidade é de grande importância para predizer o comportamento da madeira durante a etapa de secagem, podendo fazer inferências de que, quanto maior a densidade, menores serão as taxas de secagem da madeira. Apesar da grande importância desta variável, outras características da madeira influenciam no processo de secagem, o que pode ser evidenciado pela formação de grupos com espécies de diferentes densidades básicas.

Loiola (2015) concorda e acrescenta que, de certa forma, não é possível contestar tal relação, mas existem outros fatores, intrínsecos à madeira, que afetam de forma significativa a taxa de secagem. Susin (2012), avaliando madeiras de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus robusta*, não verificou diferenças estatísticas para a taxa de secagem das espécies, mas a densidade básica de ambas diferiu. Isso evidencia que características como os vasos de algumas espécies serem total ou parcialmente obstruídos por tilos, óleos, gomas, resinas e outras substâncias incrustantes contribuem para reduzir extremamente a permeabilidade da madeira (SIAU, 1984) e, assim, influenciam no processo de secagem.

No presente estudo, se o intuito fosse agrupar todas as espécies estudadas de algum modo, a metodologia empregada permitiu isso, formando quatro grupos bem distintos. Um primeiro grande grupo foi composto pela cupiúba, angelim-pedra, cumaru e canelão, com índice de similaridade de 55,74; outro grupo foi formado com

as espécies tauari, garapeira e muiracatiara, com similaridade 66,61 entre si. As madeiras de cambará e amarelinho formaram um grupo, cuja similaridade foi de 60,65, e as espécies tauari-duro, rosinha e morcegueira compuseram o último grupo, com valor de similaridade de apenas 40,28. A morcegueira apresentou a menor similaridade em relação as demais espécies avaliadas com base nos parâmetros empregados.

O agrupamento de espécies com base na velocidade de secagem na faixa higroscópica, do teor de umidade de 30% a 8% e nos defeitos foi empregado por Louzada, Marcos e Silva (2002), pois consideraram como os mais importantes para agrupar as espécies. Os autores se basearam no pressuposto de que os principais problemas de secagem ocorrem na remoção da água higroscópica e de que espécies podem ter taxas de secagem idênticas; porém, as espécies podem ter comportamento distinto em relação aos defeitos de secagem, em virtude do modo como cada espécie se comporta em relação à determinada temperatura.

Marques (2008). procedendo o agrupamento de madeiras para secagem, verificou que *Dypterix odorata*, *Ocotea aciphylla* e *Hymenolobium cf. pulcherrimum* não pertenceram ao mesmo grupo de acordo com a metodologia empregada pela autora. O *Dypterix odorata* pertenceu ao grupo de secagem fácil a muito fácil, ao passo que a *Ocotea aciphylla* integrou o grupo de secagem fácil para os intervalos de saturado até 30% e de saturado até 12%, mas foi agrupada como de secagem difícil para o intervalo de 30% a 12% de umidade, comportamento inverso ao constatado pela autora para o *Hymenolobium cf. pulcherrimum*.

O grupo composto pelas madeiras de *Ocotea sp.*, *Hymenolobium petraeum* e *Dipteryx odorata* apresentou alta similaridade entre si, diferente do verificado no estudo de Marques (2008). Cabe ressaltar que nem todas estas espécies foram as mesmas empregadas no estudo desenvolvido por Marques (2008). Todavia, as espécies pertencem ao mesmo gênero e possuem características físicas e químicas similares.

As madeiras de *Euxylophora paraensis* e *Goupia glabra*, no estudo desenvolvido por Marques (2008), foram incluídas em um mesmo grupo, sendo consideradas de secagem difícil. A dificuldade de secagem destas espécies também foi observada no presente estudo, porém, ao proceder o agrupamento utilizando a taxa de secagem e os defeitos, ambas estiveram em grupos diferentes e completamente distintos entre si. Cabe ressaltar que, na análise de agrupamento, a

cupiúba mostrou-se próxima ao grupo formado pelas espécies *Ocotea sp.*, *Hymenolobium petraeum* e *Dipteryx odorata*.

3.2 ELABORAÇÃO DO PROGRAMA DE SECAGEM

O programa de secagem apresentado na Tabela 9 foi elaborado com os dados médios das amostras de angelim-pedra, canelão e cumaru, as quais foram submetidas ao ensaio de secagem drástica a 100°C. Para a confecção do programa de secagem, utilizou-se os parâmetros de temperatura inicial, temperatura final e potencial de secagem.

Tabela 9 – Programa de secagem elaborado para as madeiras do grupo angelim-pedra, canelão e cumaru

Fases	TU madeira (%)	Tempo (h)	Tbs (°C)	Tbu (°C)	UR (%)	UE (%)	PS
Aquecimento	-	4	37	36,5	97	23,8	-
Secagem 1	50	2	37	36	94	21,7	2,3
Secagem 2	42	2	37	35	88	18,5	2,3
Secagem 3	37	2	38	35	82	16,2	2,3
Secagem 4	32	2	40	36	77	14,1	2,3
Secagem 5	28	2	44	40	78	14,2	2,0
Secagem 6	24	2	49	44	73	12,6	1,9
Secagem 7	20	2	55	48	66	10,3	1,9
Secagem 8	16	2	60	51	60	8,8	1,8
Secagem 9	12	2	63	49	46	6,5	1,8
Secagem 10	8	2	63	43	31	4,8	1,7
Condicionamento	-	12	63	53	57	8,0	-
Resfriamento	-	2	40	34	67	11,5	-

Onde: TU da Madeira: Teor de Umidade médio da madeira; Tbs: Temperatura do termômetro de bulbo seco; Tbu: Temperatura do termômetro de bulbo úmido; UR: Umidade relativa do ar; UE: Umidade de equilíbrio do ambiente; PS: Potencial de Secagem.

O programa de secagem é baseado na relação do teor de umidade da madeira e na temperatura, buscando manter o potencial de secagem em um valor preestabelecido, sendo o tipo mais frequentemente utilizado para madeiras de folhosas. O tempo indicado na terceira coluna do programa de secagem trata-se de um dispositivo para evitar que madeiras com teor de umidade inicial baixo passem pelas fases iniciais da secagem, fazendo com que mudanças abruptas possam ocorrer. Isso se justifica, pois a madeira de cumaru, mesmo quando verde,

apresenta teor de umidade baixo, por volta de 40%, podendo ser submetido a condições de secagem mais severas do que o desejado.

Eleotério e Silva (2012) elaboraram programas de secagem para cumaru (*Dipteryx odorata*), jatobá (*Hymenaea* spp.) e muiracatiara (*Astronium lecointei*), avaliando duas metodologias para a composição de programas de secagem de madeiras. Os autores obtiveram temperatura inicial de 34,3°C para o cumaru e 72,2°C para a temperatura final do programa de secagem, ligeiramente distintos dos obtidos no presente estudo, de 37°C e 63°C, respectivamente. Ainda, no estudo de Eleotério e Silva (2012), o potencial de secagem do programa, para o cumaru, variou de 3,3, no início da secagem, a 2,1 nas etapas finais. Para a madeira de jatobá, a temperatura inicial e final e o potencial de secagem foram de 43,9°C e 84,5°C, e de 3,3 no início a 2,7 no final da secagem, respectivamente. Para a muiracatiara, os autores obtiveram como parâmetros do programa de secagem a temperatura inicial de 35,9°C, final de 70,1°C, e um potencial de secagem variando de 3,3 a 2,0. Nos programas de secagem para as três espécies estudadas por Eleotério e Silva (2012), a temperatura inicial foi inferior, ao passo que a temperatura final foi mais alta, com potenciais de secagem iniciais sensivelmente mais elevados comparativamente ao presente estudo.

O critério adotado por Eleotério e Silva (2012), na elaboração do programa de secagem, foi diferente do adotado no presente estudo, o qual buscou estabelecer um potencial de secagem constante do início ao fim do programa. A temperatura foi elevada gradualmente após atingir o PSF, reduzindo o teor de umidade de equilíbrio a fim de promover uma secagem com prioridade para a qualidade da madeira, pois se trata de espécies de alto valor comercial.

Ferreira et al. (2015), desenvolvendo programas de secagem para massaranduba (*Manilkara huberi*) e angelim-pedra (*Hymenolobium petraeum*), obtiveram, nos parâmetros de temperatura inicial, final e potencial de secagem, valores de 40°C, 60°C e 2,5 a 1,7 respectivamente, para a massaranduba. O programa de secagem de angelim-pedra apresentou temperatura inicial de 45°C e 60°C de temperatura final, com potencial de secagem variando de 2,5 no início da secagem a 1,7 no final da mesma. A temperatura inicial foi próxima à obtida no presente estudo, mas a temperatura final alcançada foi próxima (63°C), adotando-se um potencial de secagem variando de 2,3 a 1,7, no início e ao final da secagem, respectivamente.

Andrade (2000), ao elaborar programas de secagem empregando a mesma metodologia, obteve, para a madeira de jatobá (*Hymenaea* sp.), densidade mensurada de $0,87 \text{ g.cm}^{-3}$, temperatura inicial de 39°C , temperatura final de $63,8^{\circ}\text{C}$ e potencial de secagem de 2,03. Para o tauari (*Couratari* sp.), cuja densidade básica foi $0,59 \text{ g.cm}^{-3}$, o autor obteve, como parâmetros do programa de secagem, $42,2^{\circ}\text{C}$, $64,5^{\circ}\text{C}$ e 2,15 para a temperatura inicial, final e potencial de secagem, respectivamente. As madeiras de jatobá e tauari, mesmo com significativa diferença de densidade, apresentaram parâmetros similares, sendo agrupadas pelo autor em um mesmo programa de secagem. Isso corrobora para que, assim como no presente estudo, espécies com características aparentemente distintas possam apresentar comportamento similar na secagem, possibilitando seu agrupamento em um mesmo programa de secagem.

4 CONCLUSÃO

Com base na metodologia empregada, foi possível agrupar as espécies de acordo com as características apresentadas pelas mesmas durante o ensaio de secagem a 60°C, considerando os parâmetros de taxa de secagem e defeitos manifestados pelos níveis de similaridade distintos entre os grupos.

Foi possível formar grupos com as madeiras de angelim-pedra, canelão e cumaru, cujas massas específicas foram distintas entre si, mas apresentaram similaridade superior a 80%, quando consideradas variáveis do ensaio de secagem.

As madeiras de garapeira e muiracatiara, rosinha e tauari-duro formaram dois grupos com alta similaridade entre si, o que pode indicar que essas espécies possuem comportamento semelhante durante a secagem.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O programa de secagem elaborado para o grupo de madeiras composto pelo angelim-pedra, canelão e cumaru não foi avaliado em estufa de secagem; portanto, é necessário testá-lo para verificar se o mesmo é adequado para a secagem conjunta das madeiras.

Recomenda-se, em estudos posteriores, a realização da descrição anatômica, em especial dos caracteres mais relevantes e que influenciam a secagem, a fim de que mais características possam ser avaliadas, obtendo informações que poderão contribuir significativamente para os estudos na área.

Ainda, aconselha-se desenvolver e testar programas de secagem para todas as madeiras avaliadas e para possíveis grupos formados, mesmo que tais apresentem apenas duas espécies, ou para situações nas quais a similaridade superior a 60% indica a formação de um grupo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI, A. C.; UETIMANE, E.; LHATE, I. A.; TERZIEV, N. Anatomical characteristics, properties and use of traditionally used and lesser-known wood species from Mozambique: a literature review. **Wood Science and Technology**, v. 42, n. 6, p. 453-472, 2008.

ALMEIDA, D. H.; SCALIANTE, R. M.; CHRISTOFORO, A. L.; VARANDA, L. D.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A.; CALIL JUNIOR, C. Caracterização completa da madeira da espécie amazônica paricá (*Schizolobium amazonicum* HERB) em peças de dimensões estruturais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 6, p. 1175-1181, 2013.

ALMEIDA, G. **Influence de la structure du bois sur ses propriétés physico - mécaniques à des teneurs en humidité élevées**. 2006. 232 f. Tese - Québec: Université Laval, 2006.

ALMEIDA, G.; GAGNÉ, S.; HERNÁNDEZ, R. E. A NMR study of water distribution in hardwoods at several equilibrium moisture contents. **Wood Science and Technology**, v. 41, n. 4, p. 293-307, 2007.

ALMEIDA, V. C. **Avaliação do potencial de uso de resíduos de madeira tropical para produção de painéis colados lateralmente – EGP**. 2013. 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

ALMEIDA, T. H. D. **Estudo da estabilidade dimensional de madeiras tropicais brasileiras**. 2015. 103 p. Dissertação (Mestrado em Ciências), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

ANDRADE, A. **Indicação de programas de secagem convencional de madeiras**. 2000. 72f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

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

ARAÚJO, H.J.B. Relações funcionais entre propriedades físicas e mecânicas de madeiras tropicais brasileiras. **Revista Floresta**, v. 37, n. 3, 399-416, 2007.

ARAÚJO, B. H. P.; SOUSA, M. A. R.; NASCIMENTO, H. E. M.; ZANUNCIO, A. J. V.; RODRIGUES, D. D. S.; GUEDES, M. C. Propriedades físicas da madeira de *Calycophyllum spruceanum* Benth. em função do diâmetro e da posição (base e topo) no fuste. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 111, p. 759-768, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira – 1996. Rio de Janeiro: 107p. 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14853:** Madeira - Determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano. Rio de Janeiro: ABNT, 2002, 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14660:** Madeira – Amostragem e preparação para análise. Rio de Janeiro: ABNT, 2003a, 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13999:** Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira - Determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525°C. Rio de Janeiro: ABNT, 2003b, 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7989:** Pastas celulósicas e madeira - Determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro: ABNT, 2003c, 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. – ABNT. **Classificação de madeira serrada de folhosas – NBR 9487:1986.** Rio de Janeiro, 32p. 1986.

BARBOSA, C. G.; LIMA, J. T.; ROSADO, S. C. S.; TRUGILHO, P. F. Elaboração de programa de secagem para madeiras de clones de híbridos de *Eucalyptus* spp. **Cerne**, v. 11, n. 1, p. 40-48, 2005.

BATISTA, D. C. **Modificação térmica da madeira de *Eucalyptus grandis* em escala industrial pelo processo brasileiro vap holzSysteme.** 2012. 338 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

BATISTA, D. C.; KLITZKE, R. J.; ROCHA, M. P. Proposta de programa de secagem para a madeira de “guajará” (*Micropholis venulosa* Mart. et Eichler) Pierre, Sapotaceae. **Ciência da Madeira**, v. 3, n. 1, p. 22-32, 2012.

BATISTA, D. C.; KLITZKE, R. J.; ROCHA, M. P. D.; BATISTA, T. R. Ensaio de Taxa de Secagem e Escore de Defeitos para a Predição da Qualidade da Secagem Convencional da Madeira de *Eucalyptus* sp. – Parte 2. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 1, p. 135-141, 2016.

BLUMHM, E.; KAUMAN, W. G. **El colapso en la Madera y su reacondicionamiento. Informe técnico nº 22.** Santiago, Chile: Instituto Forestal, 1965.

BOND, B. H.; ESPINOZA, O. A decade of improved lumber drying technology. **Current Forestry Reports**, v. 2, n. 2, p. 106 - 118, 2016.

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

BRANDÃO, A. T. O. **Determinação de metodologia para a indicação de programas de secagem de madeiras**. 1989. 100f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.

BRAZ, R. L.; DUARTE, A. P. C.; OLIVEIRA, J. T. S.; MOTTA, J. P.; ROSADO, A. M. Curva característica de secagem da madeira de *Tectona grandis* e *Acacia mangium* ao ar livre. **Floresta e Ambiente**, v. 22, p. 117-123, 2015.

BUCHANAN, M. A. **Extraneous components of wood: the chemistry of wood**. New York: R. Krieger, 1981. 689 p.

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

CARVALHO, A. Denominações convencionais para propriedades da madeira. In: **Tecnologia das indústrias da madeira III** – Na2. Vol. I. Lisboa. 1996. 5 p.

CASTRO, J. P. Uso de espécies amazônicas para envelhecimento de bebidas destiladas: análises física e química da madeira. **Cerne**, v. 21, n. 2, p. 319-327, 2015.

CHEN, H. Biotechnology of Lignocellulose: Theory and Praticce. **Chemical Industry Press**. XVI, 510 p. Ilust. Beijing, 2014.

CHOWDHURY, M. Q.; ISHIGURI, F.; HIRAIWA, T.; MATSUMOTO, K.; TAKASHIMA, Y.; IIZUKA, K.; YOSHIZAWA, N. Anatomical properties variation and their correlations with wood density and compressive strength in *Casuarina equisetifolia* growing in Bangladesh. **Australian forestry**, v. 75, n. 2, p. 95 - 99, 2012.

CHOWDHURY, M. Q.; SARKER, S. K.; DEB, J. C.; SONET, S. S. Timber species grouping in Bangladesh: linking wood Properties. **Wood science and technology**, v. 47, n. 4, p. 797 - 813, 2013.

CINIGLIO, G. **Avaliação da secagem de madeira serrada de *E. grandis* e *E. urophylla***. 1998. 69 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

CRUZ, C. R.; LIMA, J. T.; MUNIZ, G. I. B. Variações dentro das árvores e entre clones das propriedades físicas e mecânicas de híbridos de Eucalyptus. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 64, p. 33-47, 2003.

DÁVALOS, R.; BÁRCENAS, G. Clasificación de las propiedades mecánicas de las maderas mexicanas en condición seca. **Madera y Bosques**, v. 5, n. 1, p. 61 - 69, 1999.

- DENIG, J.; WENGERT, E. M.; SIMPSON, W. T. **Drying hardwood lumber. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-118.** Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 138 p. 2000.
- DESCH, H. E.; DINWOODIE, J. M. **Timber: its structure, properties and utilisation.** 6. ed. London: Macmillan Education, 1981. 410 p.
- DIAS JÚNIOR, A. F. et al. Caracterização da madeira de quatro espécies florestais para uso em movelaria. **Revista Ciência da Madeira**, v. 4, p. 93-107. 2013.
- DINWOODIE, J. M. **Timber: its nature and behaviour.** Wokingham, Berkshire: Van Nostrand Reinhold, 1981. 190 p.
- DOWNES, G. M. **Sampling plantation *Eucalyptus* for wood and fibre properties.** Collingwood: CSIRO Publishing. 1997.132p.
- DUARTE, B. B. **Influência de componentes químicos em propriedades mecânicas da madeira.** 2017. 129 f. Doutorado (Doutorado em Ciências), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.
- DURAND, P. Y. Contribution a l'etude de la détermination des tables des séchage à partir des caractères physiques du bois. **Bois et Forêts des Tropiques**, Nogent-sur-Marne, n. 207, p. 63-81, 1985.
- DURLO, M. A.; MARCHIORI, J. N. C. **Tecnologia da madeira: retratibilidade.** Santa Maria: CEPEF/FATEC, 1992. 33p. (Série técnica, 10).
- ELEOTÉRIO, J. R.; SILVA, C. M. K. Comparação de programas de secagem para Cumaru (*Dipteryx odorata*), Jatobá (*Hymenaea spp*) e Muiracatiara (*Astronium lecointe*) obtidos por diferentes métodos. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 96, p. 537-545, dez. 2012.
- ELEOTÉRIO, J. R.; BAGATTOLI, T. R.; HORNBURG, K. F.; SILVA, C. M. K. Secagem drástica de madeiras de *Eucalyptus* e *Corymbia* fornece informações para a elaboração de programas de secagem. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 35, n. 84, p. 451-457, 2015.
- FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood: chemistry, ultrastructure, reactions.** Berlin: Walter de Gruyter, 1989. 613 p.
- FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood: chemistry, ultrastructure, reactions.** New York: Walter de Gruyter, 1984. 613p.
- FERRAZ, I. D. K.; LEAL FILHO, N.; IMAKAWA, A. M.; VARELA, V. P.; PIÑA-RODRIGUES, F. C. P. Características básicas para um agrupamento ecológico preliminar de espécies madeireiras da floresta de terra firme da Amazônia Central. **Acta Amazônica**, v. 34, n. 4, p. 621-633, 2004.

FERREIRA, V. R. S.; CARDOSO, C. C.; ANDRADE, F. W. C.; MOUTINHO, V. H. P. Elaboração de programas de secagem para madeiras das espécies madeireiras *Manilkara huberi* Ducke (maçaranduba) e *Hymenolobium petraeum* Ducke (angelim-pedra). In: II CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA. 2015. Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2015. 7p.

FREDDO, A. **Elementos minerais em madeira de eucaliptos e acácia negra e sua influência na indústria de celulose kraft branqueada.** 1997. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1997.

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

GLASS, S. V.; ZELINKA, S. L. Moisture relations and physical properties of wood. **Wood handbook: wood as an engineering material: chapter 4. Centennial ed. General technical report FPL; GTR-190.** Madison, WI: US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010: p. 4.1-4.19., v. 190, p. 4.1-4.19, 2010.

GORVARD, M. R.; ARGANBRIGHT, D. G. Development of kiln drying schedules severity indices for degrade control - Part I: theoretical development. **Wood Science and Technology**, New York, n. 13, p. 137-152, 1979.

HANHIJÄRVI, A., WAHL, P., RÄSÄNEN, J., SILVENNOINEN, R. Observation of development of microcracks on wood surface caused by drying stresses. **Holzforschung**, v. 57, n. 5, p. 561-565, 2003.

HART, C. A. **The drying of wood.** Raleigh: North Carolina Agricultural Extension Service, 1965. 24p. (Extension Circular, 471).

HERZBERG, B. L.; TAYLOR, F. W.; ROSEN, H. N. Factors that affect the time required to high-temperature dry pine dimension lumber. **Forest Products Journal**, v. 35, n. 7/8, p. 34-36, 1985.

HILDEBRAND, R. **Kiln drying of sawn timber.** Germany: Maschinenbau GmbH, 1970. 199p.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. **Madeiras Tropicais Brasileiras.** Brasília: IBAMA-LPF, 1997. 152 p.

INTERNATIONAL TROPICAL TIMBER ORGANIZATION - ITTO. Disponível em: <<http://www.itto.int/>>. Acesso em: 16 nov. 2017.

JANKOWSKY, I. P. Equipamentos e processos para secagem de madeiras. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, 1995, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IPEF/IPT/IUFRO/LCF/ESALQ/USP, p. 109-118, 1995.

JANKOWSKY, I. P. Fundamentos de preservação de madeiras. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". **Documentos Florestais**, Piracicaba, n. 11, p. 1-12, 1990.

JANKOWSKY, I. P.; BILIA, F. A. C.; DUCATTI, M. A. **Ensaio rápido para a seleção de programas de secagem**. Relatório técnico CNPq 510555/93-4. Mar. Piracicaba. 1997. 12p.

JANKOWSKY, I. P.; GALVÃO, A. P. M. Influência do teor de extrativos na umidade de equilíbrio da madeira. **Bulletin IPEF**, v. 18, n.1, p. 1-33, 1979.

JANKOWSKY, I. P.; HENRIQUEZ, E. Z. Gradiente de umidade e desenvolvimento de tensões da secagem artificial de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **IPEF**, Piracicaba, n. 24, p. 27-32, 1983.

JATI, S. R.; FEARNside, P. M.; BARBOSA, R. I. Densidade da madeira de árvores em savanas do norte da Amazônia brasileira. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 44, n. 1, p. 79-86, 2014.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. 3. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1992.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. 2. ed. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1988. 607 p.

KARLSEN, G. G. et al. **Wooden structures**. Moscou, Mir, 1967.

KEEY, R. B.; LANGRISH, T. A. G.; WALKER, J. C. F. **Kiln-drying of lumber**. Heidelberg: Springer-Verlag, 2000.

KIRKER, G. T.; BLODGETT, A. B.; ARANGO, R. A.; LEBOW, P. K.; CLAUSEN, C. A. **The role of extractives in naturally durable wood species**. Forest Products Laboratory, Madison, WI. International Biodeterioration & biodegradation 82, p. 53-58, 2013.

KLITZKE, R. J. Secagem da madeira. In: OLIVEIRA, J. T. da S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. (Org.). **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro**. v. 1. Visconde do Rio Branco: Suprema Gráfica e Editora, 2007. p. 271-366.

KLITZKE, R. J. **Manual de secagem de madeira**. Apostila técnica. 2005. 119 p.

KLITZKE, R. J.; BATISTA, D. C. Ensaio de taxa de secagem e escore de defeitos para a predição da qualidade de secagem convencional da madeira de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 85, p. 97-105, 2010.

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

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ JUNIOR, W. A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer-Verlag, 1968. 592p.

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

LEPAGE, E. S. Química da madeira. In: LEPAGE, E. S. **Manual de preservação de madeiras**. Sao Paulo: IPT, 1986. v. 1, p. 69-97.

LIMA, I. L.; LONGUI, E. L.; GARCIA, M. F.; ZANATTO, A. C. S.; FREITAS, M. L. M.; FLORSHEIM, S. M. B. Variação radial da densidade básica e dimensões celulares da madeira de *Cariniana legalis* (Mart.) O. Kuntze em função da procedência. **Revista Cerne**, Lavras, v. 17, n. 4, p. 517 - 524, 2011.

LIMA, I. L. **Influência do desbaste e da adubação na qualidade da madeira serrada de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden**. 2005. 137f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

LOIOLA, P. L. **Secagem da madeira de teca (*Tectona grandis* L. f) sob diferentes condições**. 2015. 224 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

LOUZADA, J. L. P. C.; MARCOS, S. M. R.; SILVA, M. E. C. M. Avaliação do comportamento de secagem da madeira em estufa, para 14 espécies florestais. In: II CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE PRODUTOS E PESQUISA FLORESTAIS E SEMINÁRIO EM TECNOLOGIA DA MADEIRA E PRODUTOS FLORESTAIS NÃO-MADEIRÁVEI, v. 2, 2002, Curitiba. **Anais...** Curitiba: FUPEF, 2002. 12 p.

LOBÃO, M. S.; COSTA, D.; FERREIRA, A.; SETTE, C.; CARVALHO, I.; TOMAZELLO, M. Agrupamento de espécies florestais pela similaridade das características físico-anatômicas e usos da madeira. **Cerne**, Lavras, v. 16, Suplemento, p. 97-105, 2010.

LOBÃO; M. S.; CASTRO, V. R.; RANGEL, A.; SARTO, C.; TOMAZELLO FILHO, M.; SILVA JÚNIOR, F. G.; CAMARGO NETO, L.; BERMUDEZ, M. A. R. C. Agrupamento de espécies florestais por análises univariadas e multivariadas das características anatômica, física e química das suas madeiras. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 92, p. 469-477, 2011.

LOGSDON, N. B.; FINGER, Z.; BORGES, C. G. A. Caracterização físico-mecânica da madeira de peroba-mica, *Aspidosperma populifolium* A. DC. (Apocynaceae). **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 1, 2008.

LOGSDON, N. B.; FINGER, Z.; PENNA, E. S. Caracterização físico-mecânica da madeira de Cedro-marinho, *Guarea trichilioides* L. (Meliaceae). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 77, p. 43-51, 2008.

LOGSDON, N. B.; CALIL JUNIOR, C. Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, v. 18, p. 77-107, 2002.

LONGUI, E. L.; LIMA, I. L.; SILVA JR., F. G. S.; BUFOLO, A.; SUCKOW, I. M. S.; FLORSHEIM, S. M. B. Variação radial das características anatômicas, densidade aparente, teores de extrativos, lignina e holocelulose na madeira de *Piptadenia gonoacantha* (Mart.) Macbr. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 341-353, 2010.

MARQUES, M. H. B. **Agrupamento de 41 espécies de madeiras da Amazônia para secagem baseado em características anatômicas e físicas**. 2008. 141 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília (UnB), Distrito Federal, 2008.

MARTINS, V. A. **Secagem da madeira serrada**. Brasília: IBDF, 1988. 56p.

MATTOS, P. P.; PEREIRA, J. C. D.; SCHAITZA, E. G.; BAGGIO, A. J. Caracterização física, química e anatômica da madeira de *Terminalia ivorensis*. **Embrapa Floresta**, Circular Técnica, v. 31, p. 1-14, 1999.

MELO, J. R. **Secagem de madeiras: teoria e pratica de secagem artificial de madeiras**. Lisboa: Estação Florestal Nacional, 1999.

MELO, R. R.; STANGERLIN, D. M.; SUSIN, F.; SANTINI, E. J.; DOMINGUES, J. M. X.; MÜLLER, M. T.; ROCHA, C. B.; GATTO, D. A. **Avaliação das propriedades físicas de *Pouteria pachycarpa***. In: X CONGRESSO FLORESTAL ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL, Nova Prata, 2008, 6 p.

MELO, R. R.; STANGERLIN, D. M.; DEL MENEZZI, C. H.; GATTO, D. A.; CALEGARI, L. Caracterização física e mecânica da madeira de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. **Agrária**, Recife, v. 5, n. 1, p. 67 - 73, 2010.

MELO, R. R.; ARALDI, D. B.; STANGERLIN, D. M.; MÜLLER, M. T.; GATTO, D. A. Uso das características tecnológicas da madeira para o agrupamento de espécies florestais. **Nativa**, Sinop, v. 1, n. 1, p. 1-7, 2013.

MENDES, A. S.; MARTINS, V. A.; MARQUES, M. H. B. **Programas de secagem para madeiras brasileiras**. Brasília: IBAMA, 1998. 114p.

MORAIS, S. A. L. de; NASCIMENTO, E. A.; MELO, D. C. Análise da madeira de *Pinus oocarpa* parte I: estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 461-470, 2005.

MORESCHI, J. C. **Propriedades tecnológicas da madeira**. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

MORESCHI, J. C. **Propriedades Tecnológicas da Madeira**. 3. ed. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UTFPR. 2010. 177p.

NASCIMENTO, C. C.; GARCIA, J. N.; DIÁZ, M. D. P. Agrupamento de espécies madeiras da Amazônia em função da densidade básica e propriedades mecânicas. **Madera y Bosques**, v. 3, n. 1, p. 33-52, 1997.

NISGOSKI, S. **Identificação e caracterização anatômica macroscópica das principais espécies utilizadas para laminação na região de Curitiba - PR**. 1999. 113p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Curitiba: UFPR, 1999.

OLIVEIRA, L. C. S. **Perguntas e respostas em secagem de madeiras**. São Paulo: IPT, 1981. 36p.

OLIVEIRA, E.; VITAL, B. R.; PIMENTA, A. S.; LUCIA, R. M. D.; LADEIRA, A. M. M.; CARNEIRO, A. C. O. Estrutura anatômica da madeira e qualidade do carvão de *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. **Revista Árvore**, v. 30, n. 2, p. 311-318. Viçosa, 2006.

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMEISTER, J. C.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 115-127, 2005.

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

OLIVEIRA, J. T. S.; TOMAZELLO FILHO, M.; FIEDLER, N. C. Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 929-936, 2010.

OLTEAN, L.; TEISCHINGER, A.; HANSMANN, C. Influence of temperature on cracking and mechanical properties of wood during wood drying - a review. **Bioresources**, v. 2, n. 4, p. 789-811, 2007.

PAES, J. B.; LIMA, C. R.; OLIVEIRA, E.; MEDEIROS NETO, P. N. Características físico-química, energética e dimensões das fibras de três espécies florestais do semiárido brasileiro. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 4, p. 550-555, 2013.

PALA, H. **Constituição e mecanismos de degradação biológica de um material orgânico: a madeira**. Construção Magazine, n. 20, p. 54-62, 2007.

PANG, S. Mathematical modeling of kiln drying of softwood timber: Model development, validation, and practical application. **Drying Technology**, v. 25, n. 3, p. 421-431, 2007.

PAULA, J. E. Caracterização anatômica da madeira de sete espécies da Amazônia com vistas à produção de energia e papel. **Acta Amazônica**, v. 33, n. 2, p. 243-262, 2003.

PENEDO, W. R. **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: Fundação CETEC, 1980.

PETTERSEN, R. C. The chemical composition of wood. In: ROWELL, R. M. (Ed.). **The chemistry of solid wood**, Advances in Chemistry Series, v. 207. American Chemical Society: Washington, DC, p. 57-126, 1984.

POUBEL, D. S.; GARCIA, R. A.; LATORRACA, J. V. F.; CARVALHO, A. M. Estrutura anatômica e propriedades físicas da madeira de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 2, p. 117-126, 2011.

PONCE, R. M.; WATAI, L. T. **Manual de secagem de madeira**. Brasília: MIC/STI-IPT, 1985.

PRATT, G. H. **Timber drying manual**. London: Department of the Environment, Building Research Establishment, 1974. 152p.

RASMUSSEN, E. F. **Dry kiln operator's manual**. Madison: USDA, Forest Service, 1961. 197p.

REDMAN, A. L.; BAILLERES, H.; TURNER, I.; PERRÉ, P. Characterization of wood-water relationships and transverse anatomy and their relationship to drying degrade. **Wood Science and Technology**, v. 50, n. 4, p. 739-757, 2016.

REZENDE, A. M.; SAGLIETTI, J. R. C.; CHAVES, R. Variação da densidade da madeira de *Eucalyptus grandis* aos 8 anos de idade em função de diferentes níveis de produtividade. **Scientia Forestalis**, n. 53, p. 71-78, 1998.

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

REZENDE, M. A. Retratibilidade da Madeira de *Pinus Caribaea* var. *hondurensis* e de *Eucalyptus grandis* e suas Relações com a umidade e densidade. **Scientia Forestalis**, n. 64, p. 120-127, 2003.

ROWELL, W. C. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC, 2005. 487 p.

SANTINI, E. J. **Influência de temperatura na taxa de secagem e contração da madeira de *Pinus elliottii* proveniente de plantios de rápido crescimento**. Curitiba: FUPEF, 15p. (Série Técnica, 5), 1980.

SANTINI, E. J. Métodos usuais de secagem de madeiras. In: I Seminário sobre secagem de madeira, 1, 1992, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM/CEPEF/FATEC, 1992. p. 47-59.

SANTOS, G. R. V. dos. **Otimização da secagem da madeira de *Eucalyptus grandis* (Hillebrand)**. 2002. 69 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola

Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

SANTANA, M. A. E.; OKINO, E. Y. A. Chemical composition of 36 Brazilian Amazon forest wood species. *Holzforschung*, Berlin, v. 61, p. 469-477, 2007.

SIAU, J. F. **Flow in wood**. Syracuse: Syracuse University Press, 1971. 131 p.

SIAU, J. F. **Transport processes in wood**. Berlim: Springer-Verlag, 1984. 223 p.

SILVA, L. L. H.; OLIVEIRA, E.; CALEGARI, L.; PIMENTA, M. C.; DANTAS, M. K. L. Características dendrométricas, físicas e químicas da *Myracrodruon urundeuva* e da *Leucaena leucocephala*. *Floresta e Ambiente*, Seropédica, v. 24, 2017.

SILVA, J. C.; OLIVEIRA, J. T. S.; TOMAZELLO FILHO, M.; JÚNIOR, S. K.; MATOS, J. L. M. Influência da idade e da posição radial na densidade da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. *Revista Floresta*, Paraná, v. 34, n. 1, p. 13-22, 2004.

SILVA, J. R. M. **Relações da usinabilidade e aderência do verniz com as propriedades fundamentais do *Eucalyptus grandis* hill ex. Maiden**. 2002. 204 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Curitiba: UFPR, 2002.

SILVEIRA, L. H. C.; REZENDE, A. V.; VALE, A. T. Teor de umidade e densidade básica da madeira de nove espécies comerciais amazônicas. *Acta Amazonica*, v. 43, n. 2, p. 179-184, 2013.

SIMPSON, W. T. **Dry kiln operator's manual**. Madison: United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1991. 274 p.

SIMPSON, W. T. **Grouping tropical wood species and thicknesses by similar estimated kiln drying time using mathematical models**. In: III IUFRO International Wood Drying Conference. Viena, p. 38-44, 1992.

SIMPSON, W. T. **Method to estimate dry-kiln schedules and species groupings: tropical and temperate hardwoods**. Madison: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1996. 55 p.

SIMPSON, W. T.; BAAH, C. K.. **Grouping tropical wood species for kiln drying**. Madison, WI: U.S. Dept. of Agriculture, *Forest Service, Forest Products Laboratory*. 1989. 14 p.

SIMPSON, W. T.; VERRIL, S. P. Estimating kiln schedules for tropical and temperate hardwoods using specific gravity. *Forest Products Journal*, v. 47, n. 7/8, p. 64-68, 1997.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS – SNIF. Boletim SNIF 2017 1. ed. SFB. Brasília. 2017. Disponível em: <<http://snif.florestal.gov.br>>.

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

SKAAR, C. **Wood water relations**. NewYork: Springer-Verlag, 1988. 283 p.

STAMM, A. J. **Wood and cellulose science**. In: The Ronald Press. New York, v. 147, n. 3658, p. 595-596, 1964.

STANGERLIN, D. M. **Monitoramento de Propriedades de Madeiras da Amazonia Submetidas ao Ataque de Fungos Apodrecedores**. 2012. 259p. Tese de Doutorado – Universidade de Brasilia, Brasilia - DF, 2012.

STANGERLIN, D. M.; SANTINI, E. J.; SUSIN, F.; MELO, R. R.; GATTO, D. A.; HASELEIN, C. R. Uso de estufa solar para secagem de madeira serrada. **Ciência Florestal**. Santa Maria, v. 19, n. 4, p. 461-472, out.-dez., 2009.

STEINER, Y. et al. Impact of various measures to optimize the air velocity in an industrial wood-drying process. **Wood Material Science & Engineering**; v. 6, n. 1-2, p. 15-22, 2011.

SUSIN, F. **Avaliação de programas de secagem para madeiras de eucalipto elaborados com base em testes prévios a alta temperatura**. 2012. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

TAYLOR, A. M., GARTNER, B. L., MORRELL, J. J. Heartwood Formation and natural durability - a review. **Wood and Fiber Science**, v. 34, n. 4, p. 587-611, 2002.

TERAZAWA, S. Methods for easy determination of kiln drying schedule of wood. **Wood Industry**, v. 20, n. 5, 1965.

TOMASELLI, I. **Secagem de madeira**. Curitiba: FUPEF, 1980. 29p.

TSOUMIS, G. **Science and technology of wood**. Structure, properties, utilization. New York: Van Nostrand Reinhold. 494p, 1991.

TUSET, R.; DURÁN, F. **Manual de maderas comerciales, equipos y proceso de utilización**: aserrado, secado, preservación, descortezado, partículas. 1986. 682 p.

VALENTE, B. M. D. R. T.; EVANGELISTA, W. V.; SILVA, J. D. C.; LUCIA, R. M. D. Variabilidade radial e longitudinal das propriedades físicas e anatômicas da madeira de angico-vermelho. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 100, p. 485-496, 2013.

VICINI L., **Análise multivariada da teoria à prática**. Caderno didático. Santa Maria: UFSM/CCNE, 2005. 215p.

WELLING, J. **European Drying Group – Recommendation. Assesment of drying quality of timber**. Pilot edition, 1994. p.30

YANG, L.; LIU, H.; CAI, Y.; HAYASHI, K.; WU, Z. Effect of drying conditions on the collapse-prone wood of *Eucalyptus urophylla*. **Bioresources**, v. 9, n. 4, p. 7288-7298, 2014.

ZAU, M. D. L.; VASCONCELOS, R. P. de; GIACON, V. M.; LAHR, F. A. R. Avaliação das propriedades química, física e mecânica de painéis aglomerados produzidos com resíduo de madeira da Amazônia - Cumaru (*Dipteryx Odorata*) e resina poliuretana à base de óleo de mamona. **Polímeros**, São Carlos, v. 24, n. 6, p. 726-732, 2014.

ZHANG, S.; OLIVEIRA, L.; AVRAMIDIS, S. Drying characteristics of hem-fir squares as affected by species and basic density presorting. **Forest Products Journal**, v. 46, n. 2, p. 44-50, 1996.