



**JOSÉ YONY CRICEL SIMA SÁNCHEZ**

**EXTENSOMETRIA APLICADA À DETERMINAÇÃO DAS  
DEFORMAÇÕES RESULTANTES DAS TENSÕES DE  
SECAGEM EM MADEIRA DE *Corymbia citriodora***

**LAVRAS – MG**

**2017**

**JOSÉ YONY CRICEL SIMA SÁNCHEZ**

**EXTENSOMETRIA APLICADA À DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES  
RESULTANTES DAS TENSÕES DE SECAGEM EM MADEIRA DE *Corymbia  
citriodora***

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

Prof. Dr. José Tarcísio Lima

Orientador

Prof. Dr. José Reinaldo Moreira da Silva

Coorientador

**LAVRAS - MG**

**2017**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Sánchez, José Yony Cricel Sima.

Extensometria aplicada à determinação das deformações  
resultantes das tensões de secagem em madeira de *Corymbia  
citriodora* / José Yony Cricel Sima Sánchez. - 2017.

57 p.

Orientador(a): José Tarcísio Lima.

Coorientador(a): José Reinaldo Moreira da Silva.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2017.

Bibliografia.

1. Deformações. 2. Tensões de secagem. 3. Lenho de tração. I.  
Lima, José Tarcísio. II. Silva, José Reinaldo Moreira da. III. Título.

**JOSÉ YONY CRICEL SIMA SÁNCHEZ**

**EXTENSOMETRIA APLICADA À DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES  
RESULTANTES DAS TENSÕES DE SECAGEM EM MADEIRA DE *Corymbia  
citriodora***

**EXTENSOMETRY APPLIED TO THE DETERMINATION OF DEFORMATIONS  
RESULTING FROM DRYING STRESSES IN *Corymbia citriodora* WOOD**

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

APROVADA em 15 de setembro de 2017.

Prof. Dr. José Reinaldo Moreira da Silva	UFLA
Prof. Dr. Raphael Nogueira Rezende	IFSULDEMINAS
Profa. Dr. Claudinéia Olímpia de Assis	UFLA

Prof. Dr. José Tarcísio Lima  
Orientador

**LAVRAS - MG**  
**2017**

Aos meus pais *José del Carmen Sima May* e *Magdalena del Carmen Sánchez Tucuch*:

Pelo carinho incondicional, apoio, conselhos e orientação de vida para minha formação, acreditando sempre em mim e, antes de tudo, por serem meus maiores exemplos de vida.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela vida.

Aos meus pais, pelo amor, carinho, atenção, compressão e apoio moral.

As minhas irmãs, pela amizade e motivações para continuar meus estudos.

À Universidade Federal de Lavras, em especial ao programa de Ciência e Tecnologia da Madeira, pela oportunidade oferecida.

Ao Instituto Tecnológico da China, pela oportunidade oferecida e apoio.

Ao professor José Tarcísio Lima, por sua amizade, paciência, colaboração, por seus ensinamentos e pela orientação, que muito contribuiu para o meu aprendizado e a realização deste trabalho.

Ao professor José Reinaldo, pela “co-orientação”, fornecendo toda ajuda possível.

Aos professores do programa de Ciência e Tecnologia da Madeira, pelos ensinamentos.

Ao professor Noel, pelo apoio e motivação para continuar meus estudos acadêmicos.

Aos colegas do programa de Ciência e Tecnologia da Madeira, pelo apoio fornecido desde o início até o final e pelo apoio nas incansáveis horas de trabalho.

Principalmente agradeço a meus colegas: David, Matheus, Taiana, Bruno, Poliane, Carolina e Joisse, pelo apoio e ajuda nas horas de trabalho.

Ao funcionário da serraria, Carlos, por todo seu apoio dedicado ao trabalho.

As funcionário da usinagem, Heber, pelo apoio.

À CONACYT, pela concessão da bolsa de estudos.

À Capes, pelo material de pesquisa.

A todos aqueles que um dia contribuíram para que eu chegasse até aqui.

## RESUMO

O desdobro de toras e a secagem da madeira serrada devem ser executados de acordo com técnicas adequadas para minimizar o aparecimento de defeitos como empenamentos, rachaduras, colapso e outros. Entretanto, a qualidade da matéria-prima também deve ser levada em conta para que no final do processamento sejam obtidas peças de boa qualidade. Na retirada da água da madeira se originam gradientes de umidade entre as camadas internas e externas das peças, que geram tensões, favorecendo o surgimento de deformações e rachaduras. A etapa de condicionamento a vapor é uma alternativa para aliviar as tensões de secagem. O método mais comum para avaliá-las é o teste do garfo. Entretanto, esse método é destrutivo, demorado e não quantifica o defeito. Para contribuir com a melhor avaliação das tensões de secagem, foi suposto que elas poderiam ser medidas com um extensômetro empregado para medir deformações em árvores, resultantes de tensões de crescimento. O objetivo deste estudo foi avaliar quantitativamente as deformações resultantes das tensões de secagem (DTS) dos lenhos de tração e oposto formado em árvores inclinadas e o lenho normal, formado em árvores eretas, usando um extensômetro. Foram abatidas seis árvores de *Corymbia citriodora*, aos 60 anos de idade, sendo três eretas e três inclinadas, que posteriormente foram desdobradas e secas aproximadamente até 12%, em estufa convencional. O programa de secagem empregado foi baseado em temperaturas inicial e final de 40 e 65 °C, respectivamente, e potencial de secagem igual a 2,1. As DTS foram medidas pós-secagem e pós-acondicionamento a vapor, em tábuas quentes e frias. O extensômetro, munido de relógio comparador, mediu a deformação pelo afastamento entre dois pinos fixados longitudinalmente na superfície das tábuas, após a execução de um furo de 20 mm de diâmetro. Após a secagem, as tábuas quentes e frias apresentaram, em média, DTS equivalentes a 26 e 15 µm, respectivamente. Estes valores foram significativamente diferentes, demonstrando o alívio das DTS após esfriamento das tábuas. Madeiras das árvores eretas mostraram médias de DTS superiores àquelas das madeiras das árvores inclinadas. No lenho de tração, as médias das DTS (17 µm) foram inferiores às encontradas no lenho oposto (21 µm). O extensômetro foi confiável para medir quantitativamente as DTS, possuindo potencial para ser empregado no controle de qualidade da secagem.

**Palavra-chave:** Deformações. Tensões de secagem. Lenho de tração.

## ABSTRACT

Log sawing and wood drying must be performed according to appropriate techniques to minimize the appearance of defects. However, the quality of the raw material must also be taken into account in order to obtain lumber of good quality at the end of processing. In the removal of water from the wood, moisture gradients originate between the inner and outer layers of the pieces, which generate stresses, favoring the appearance of warping and cracks. The conditioning step at the end of the drying is an alternative to relieve drying stresses. The most common method for evaluating them is the fork test. However, this method is destructive, time-consuming and does not quantify the defect. To contribute to the best evaluation of the drying stresses it was assumed that they could be measured with a strain gauge used to measure deformations in trees, resulting from growth stresses. The objective of this study was to quantitatively evaluate the deformations resulting from the drying stresses (DTS) of the tension and the opposite wood formed in inclined trees and the normal wood, formed in upright trees, using a strain gauge. Six trees of *Corymbia citriodora* were cut, at the age of 60, three upright and three inclined, which were later sawn and dried up to 12% in a conventional kiln drying. The drying program employed was based on initial and final temperatures of 40 and 65°C, respectively, and drying potential equal to 2.1. The DTS were measured post-drying and post-conditioning in steam, on hot and cold lumbers. The digital strain gauge measured the deformation by the spacing between two pins fixed longitudinally on the surface of the boards, after the execution of a bore 20 mm in diameter. After drying, the hot and cold boards presented, on average, DTS equivalent to 26 and 15  $\mu\text{m}$ , respectively. These values were significantly different, demonstrating the relief of DTS after cooling of the boards. Timber from upright trees showed averages of DTS higher than those from inclined trees. In the tension wood, the DTS averages (17  $\mu\text{m}$ ) were lower than those found in the opposite wood (21  $\mu\text{m}$ ). The strain gauge was reliable to quantitatively measure the DTS, having the potential to be employed in the quality control of the drying.

**Keyword:** Deformations. Drying stresses. Tension wood.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação da curva de secagem para materiais porosos.....	15
Figura 2 - Esquema da confecção de amostragem para avaliação das tensões de secagem. Em que: A - determinação da umidade, B - gradientes de umidade e C - teste do garfo.....	23
Figura 3 - Medição das DRL em tábuas de árvores de <i>Corymbia citriodora</i> .....	27
Figura 4 - Medição das DRL em tabuas verdes de <i>Corymbia citriodora</i> .....	28
Figura 5 - Esquema de divisão das toras e da retirada dos discos para determinação da densidade básica. ....	29
Figura 6 - Esquema da retirada das amostras para determinação da densidade básica da madeira .....	30
Figura 7 - Esquema do desdobro das toras de <i>Sorymbia citriodora</i> . ....	30
Figura 8 - Esquema da retirada das amostras para determinação da umidade inicial (A) e da densidade básica (B) e para a secagem drástica (C) .....	31
Figura 9 - Amostragem nas toras das árvores inclinadas para obtenção do bloco central com lenho de tração e oposto.....	33
Figura 10 - Esquema da retirada das amostras controladoras e determinadoras de umidade.....	34
Figura 11 - Esquema da tábua com a distribuição dos pontos para medir as deformações resultantes das tensões de secagem e amostragem para determinação da umidade.....	35
Figura 12 - Detalhamento do equipamento utilizado para as medições das DTS .....	36
Figura 13 - Representação da medição das DTS .....	36
Figura 14 - Furo feito pelo extensômetro em uma tábua de madeira.....	36
Figura 15 - Processo da furação pela broca do extensômetro em uma tábua de madeira .....	37
Figura 16 - Base metálica .....	37
Figura 17 - Curva de secagem das amostras de 100 x 50 x 10 mm (comprimento, largura e espessura) de <i>Corymbia citriodora</i> .....	40
Figura 18 - Curva de secagem convencional em estufa para madeira de <i>Corymbia citriodora</i> .....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros dos programas de secagem para madeiras dos gêneros <i>Corymbia</i> e <i>Eucalyptus</i> .....	19
Tabela 2 - Escores atribuídos à intensidade das rachaduras de topo, interna e do colapso ....	31
Tabela 3 - Variáveis para a secagem drástica .....	32
Tabela 4 - Características dendrométricas, ângulo da inclinação e densidade básica das árvores de <i>Corymbia citriodora</i> abatidas aos 60 anos de idade .....	39
Tabela 5 - Médias das variáveis encontradas no ensaio de secagem drástica para <i>Corymbia citriodora</i> .....	40
Tabela 6 - Programa de secagem para madeira de <i>Corymbia citriodora</i> com até 30 mm de espessura .....	43
Tabela 7 - Resumo da análise de variância das deformações resultantes das tensões de secagem (DTS) em função dos fatores .....	45
Tabela 8 - Deformações resultantes das tensões de secagem (DTS) em tábuas quentes de <i>Corymbia citriodora</i> , pós-secagem.....	45
Tabela 9 - Valores médios das deformações resultantes das tensões de secagem (DTS) em tábuas quentes e tábuas após resfriamento até a temperatura ambiente de <i>Corymbia citriodora</i> .....	46
Tabela 10 - Deformações resultantes das tensões de secagem (DTS) em madeira quente de <i>Corymbia citriodora</i> após acondicionamento a vapor.....	47
Tabela 11 - Deformações resultantes das tensões de secagem (DTS) em tábuas de <i>Corymbia citriodora</i> resfriadas até temperatura ambiente, após o acondicionamento a vapor .....	47
Tabela 12 - Valores médios das deformações resultantes das tensões de secagem em tábuas obtidas de árvores inclinadas de <i>Corymbia citriodora</i> .....	48

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	11
2	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	13
2.1	<b>Lenho de tração</b> .....	13
2.2	<b>A água na madeira</b> .....	14
2.3	<b>Secagem da madeira</b> .....	15
2.4	<b>Secagem convencional</b> .....	17
2.5	<b>Secagem de tábuas com lenho de tração</b> .....	17
2.6	<b>Programas de secagem</b> .....	18
2.7	<b>Fatores internos e externos da secagem da madeira</b> .....	19
2.8	<b>Defeitos resultantes da secagem da madeira</b> .....	20
2.9	<b>Deformações resultantes das tensões de secagem (DTS)</b> .....	21
2.10	<b>Método para avaliar deformações resultantes das tensões de secagem</b> .....	23
2.11	<b>Tensão e deformação</b> .....	25
2.12	<b>Emprego do extensômetro</b> .....	26
3	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	29
3.1	<b>Amostragem do material biológico</b> .....	29
3.2	<b>Confecção das amostras para determinação da densidade básica</b> .....	29
3.3	<b>Preparo do material para elaboração do programa de secagem</b> .....	30
3.4	<b>Elaboração do programa de secagem</b> .....	31
3.5	<b>Secagem convencional da madeira</b> .....	33
3.5.1	<b>Desdobro de toras para secagem convencional</b> .....	33
3.5.2	<b>Características da estufa convencional</b> .....	34
3.5.3	<b>Empilhamento da madeira na estufa</b> .....	34
3.5.4	<b>Avaliação das deformações resultantes das tensões de secagem (DTS)</b> .....	34
3.6	<b>Análise estatística</b> .....	37
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	39
4.1	<b>Caracterização do material</b> .....	39
4.2	<b>Elaboração do programa de secagem para <i>Corymbia citriodora</i></b> .....	39
4.2.1	<b>Curva de secagem drástica</b> .....	39
4.2.2	<b>Variáveis para elaboração do programa de secagem</b> .....	40
4.2.3	<b>Parâmetros para elaboração do programa de secagem</b> .....	42
4.2.4	<b>Programa de secagem</b> .....	42
4.3	<b>Secagem convencional</b> .....	43
4.4	<b>Avaliação das deformações decorrentes das tensões de secagem (DTS) em tábuas por extensometria</b> .....	44
4.4.1	<b>DTS em tábuas de árvores eretas e de árvores inclinadas</b> .....	45
4.4.2	<b>Efeito da temperatura das tábuas nas DTS</b> .....	46
4.4.3	<b>Efeito do acondicionamento em vapor das tábuas nas DTS</b> .....	47
4.4.4	<b>DTS no lenho de reação de árvores inclinadas</b> .....	48
5	<b>CONCLUSÃO</b> .....	50
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	51

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização da madeira para diversos usos demanda melhor desenvolvimento tecnológico para atingir nível de qualidade mais elevado. A secagem da madeira é uma das etapas necessárias que se executada de forma adequada, pode contribuir com essa demanda, possibilitando melhor qualidade. O propósito principal da secagem é a redução da umidade, e entre outros, a redução dos defeitos, redução da massa da madeira, redução do custo de transporte, facilita a trabalhabilidade e aumenta a resistência mecânica do material.

Devido às características da madeira, surgem dificuldades durante o processo de secagem, principalmente ligadas à formação de defeitos, bem evidentes em algumas madeiras. Então, é recomendado secar essas madeiras mais lentamente, em condições suaves de temperatura e umidade relativa do ar (BARBOSA et al., 2005).

A secagem convencional é considerada um dos métodos viáveis para secar diferentes madeiras. O processo é conduzido conforme um programa de secagem, com possibilidade de controlar os parâmetros de temperatura e de umidade relativa e, em alguns casos, a velocidade do ar (JANKOWSKY et al., 2003).

Normalmente, publicações sobre secagem da madeira se referem ao lenho normal ou então não informam sobre o tipo, se normal ou de reação. Entretanto, é conhecido que madeiras de árvores inclinadas de folhosas formam lenho de tração, que podem potencializar a manifestação de defeitos. A presença do lenho de tração, promove dificuldade durante o desdobro e durante o processo de secagem (BADIA et al., 2005), possibilitando a formação de defeitos, como rachaduras e empenamentos.

Os defeitos na secagem da madeira são definidos como modificações ocorrentes na estrutura da madeira que afetam sua qualidade, sendo que em alguns casos, devem-se à formação das tensões de secagem. Essas tensões, normalmente, surgem quando se conduz a secagem rápida e desuniforme ou pelas características da própria madeira, levando o material à formação de deformações ou rupturas.

O condicionamento da madeira em banho de vapor é uma das etapas dos programas de secagem. Nessa etapa, o amolecimento da estrutura da madeira durante a secagem convencional, favorece no alívio das tensões de secagem formadas. Trata-se de uma forma para melhorar a qualidade da madeira, sendo eficiente na minimização de prejuízos que limitam a utilização da madeira e que provocam perda no material.

Para avaliar indiretamente as tensões de secagem, o método mais utilizado é o “teste do garfo” que produz apenas resultados qualitativos, interrompe a secagem, demanda mais tempo de avaliação, além de ser um método destrutivo. Em resposta ao teste, madeira livre de tensão mantém os dentes do garfo paralelos, enquanto que, madeiras tensionadas fecham ou abrem os dentes.

Kobayashi (1987) afirmou que os extensômetros elétricos podem ser utilizados para determinar indiretamente as deformações superficiais causadas pelas tensões residuais, de forma não destrutiva. Entre outros modelos, pode-se também citar o extensômetro *Growth Strain Gauge*, um equipamento mecânico que mede as deformações residuais longitudinais (DRL) associadas às tensões de crescimento de árvores em pé (LIMA et al., 2004). O mesmo equipamento foi empregado por Sánchez et al. (2017) para medir a DRL em tábuas verdes, após desdobro.

O principal objetivo deste trabalho foi a avaliar as deformações resultantes das tensões de secagem (DTS), utilizando o extensômetro em tábuas de madeiras provenientes de árvores eretas e inclinadas de *Corymbia citriodora*. Além disto, propôs-se verificar o efeito da temperatura das tábuas sobre as deformações; determinar as DTS após o acondicionamento e comparar as DTS em lenho de tração e lenho oposto.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Lenho de tração

Nas árvores, é formado certo tipo de madeira conhecido como lenho de reação, denominado de lenho de tração (LT) quando ocorre em folhosas, formado na parte superior da inclinação do tronco. Nas coníferas, é denominado como lenho de compressão (LC), formado na parte inferior à inclinação do tronco da árvore. Esses tipos de lenhos são possíveis de ser identificados pela excentricidade da medula.

Normalmente, o lenho de tração ou de compressão é formado em árvores inclinadas, mas reporta-se que, o lenho de tração também é possível se desenvolver em árvores eretas que formam lenho normal por crescer em boas condições (DONALDSON et al., 2004).

No processamento da madeira, como é o desdobro de tábuas, em alguns casos, é possível observar superfície áspera, principalmente nas folhosas, característica relacionada com a formação do lenho de tração, promovendo dificuldades durante o desdobro pela liberação das tensões internas (BADIA et al., 2005). Além disso, no processo de secagem de madeira com lenho de tração, promovem-se defeitos devido à contração (TARMIAN et al., 2009). No entanto, a baixa contração no lenho de tração, não gera tensões de secagem tão fortes, como no caso da madeira do lenho oposto (ČUNDERLIK, 1996).

Segundo Washusen (2002), o lenho de tração normalmente é caracterizado pela elevada contração tangencial no processo de secagem da madeira. Segundo Ruelle et al. (2007), a contração axial, radial e tangencial são significativamente superiores no lenho de tração do que no lenho oposto. Portanto, são fatores possíveis de causar modificações na madeira durante o processo de secagem.

O comportamento entre o lenho de tração e o lenho oposto, não seguem padrão definido na secagem (RUELLE et al., 2007). Monteiro et al. (2010), avaliando as contrações radial, tangencial e volumétrica e a densidade básica, afirmaram não terem observado diferenças estatísticas entre o lenho de tração e oposto em madeiras de *Eucalyptus*. No entanto, Sousa (2004) encontrou diferença significativa na contração volumétrica para madeira de *E. grandis*.

Embora das pesquisas registradas na literatura sobre o comportamento do lenho de tração e a influência na formação dos defeitos durante os processos de secagem, ainda existe a insuficiência de informação sobre trabalhos que avaliem a relação das tensões de secagem em madeiras provenientes de árvores inclinadas que formam lenho de tração.

## 2.2 A água na madeira

Existem dois tipos de água que normalmente são removidas durante o processo da secagem convencional da madeira, que são a água livre e a água de adsorção. Sua relação com a madeira é complexa, apresenta variações de seu estado físico, direção de fluxo e também na forma em que é movimentada a superfície da madeira (ENGELUND et al., 2013).

Skaar (1972) define a água livre como aquela que se encontra nas cavidades das células (lume) ou espaços vazios na fase líquida ou em forma de vapor, sendo retirada por forças capilares e por ligações intermoleculares. Ocorrendo a retirada quando a umidade encontra-se acima do Ponto de Saturação das Fibras (PSF).

A água de adsorção encontra-se impregnada na parede celular abaixo do PSF, sendo retida por ligações de hidrogênio (SKAAR, 1972). Parte da água está ligada às moléculas de celulose por ligações de valência secundária (STEIN, 2003). Entretanto, por ser mantida na madeira por ligações mais fortes, sua retirada é mais difícil de acontecer (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

O PSF é considerado importante para a secagem da madeira. Na fase inicial, acima do PSF, geralmente, baixas temperaturas são utilizadas, demandando menos energia, enquanto que abaixo desse ponto a demanda de energia tende a aumentar, pela dificuldade da saída da água de adsorção, necessitando-se de aumentar a temperatura (PONCE; WATAI, 1985).

Segundo Simpson (1991), a movimentação da água na madeira do interior para o exterior ocorre de formas e direções diferentes, movendo-se das zonas com alta umidade para zonas com baixa umidade. Segundo Andrade (2000), a densidade da madeira está diretamente relacionada com a movimentação da água, pois madeiras mais densas caracterizam-se por apresentar maiores frequências de vasos e de menores diâmetros, dificultando a saída da água dessas madeiras. Também é mais difícil a saída da água do cerne que do alburno.

A movimentação da água livre é o processo em que a água é movimentada acima do PSF, através das cavidades celulares da madeira, por forças capilares, baseados na *lei de Hagen-Poiseuille* (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968). Segundo o mesmo autor, a movimentação da água de adsorção ocorre por difusão abaixo do PSF, deslocando-se através da parede celular devido ao gradiente de umidade e também por difusão de vapor de água ocorrendo movimentação através das cavidades celulares.

Diversas pesquisas sobre a movimentação e a saída da água têm sido de muita importância, principalmente em madeira de *Eucalyptus* (BARBOSA et al., 2005; JANKOWSKY; SANTOS, 2005), considerada de difícil secagem.

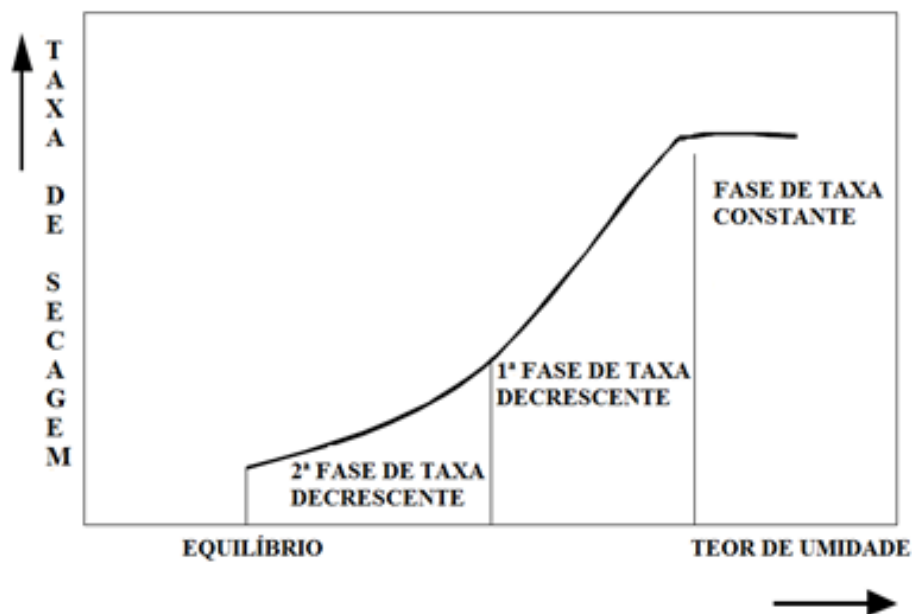
### 2.3 Secagem da madeira

A madeira é um material complexo que possui características que dificultam seu aproveitamento e utilização. Alternativas para diminuir a perda de material, estão sendo melhoradas para que haja um melhor aproveitamento da madeira.

A secagem da madeira é definida como o processo responsável pela redução da umidade na madeira, visando atingir um ponto considerável, em um período curto de tempo, viavelmente econômico e com o mínimo de defeitos (MARTINS, 1988). Sendo a secagem também o balanço dinâmico entre a transferência de calor da corrente do ar para a superfície da madeira, difusão da umidade através da madeira e a vazão da massa da água livre (HART, 1966).

Segundo Kollmann e Cotê (1968); Rosen (1983), a secagem da madeira pode ser dividida em três estágios (FIGURA 1), caracterizados pela variação na taxa de secagem. Esses autores descrevem que no primeiro estágio, ocorre a fase de taxa de secagem constante com a retirada da água livre, em que a água é movimentada até a superfície da peça por forças capilares. Na superfície da madeira, ocorre o deslocamento de corrente de ar aquecida que promove a evaporação da água, que é transferida para a corrente de ar. Parte da energia recebida pela superfície produz aumento da temperatura, iniciando a transferência de calor no centro da madeira.

Figura 1 - Representação da curva de secagem para materiais porosos.



Fonte: Rosen, (1983) e Santos, (2003).



Quando o fluxo da água livre é restringido de chegar até a superfície, a umidade nesta região atinge o PSF, distinguindo o início da primeira fase de taxa decrescente e dando início da retirada da água de adsorção que está internamente ligada aos componentes da parede celular, neste estágio reduz o fluxo da água e torna-se mais lenta a secagem. Nesse ponto, a linha de vaporização da água na madeira se desloca em direção ao centro. A vaporização presente na superfície cria um gradiente de umidade, dando início à movimentação da água por difusão do interior para o exterior da peça (KOLLMANN; COTÊ, 1968; ROSEN, 1983).

A fase final inicia-se quando a linha de evaporação de água se restringe ao centro da peça e a taxa de secagem é regulada pelas características do material, até o ponto de equilíbrio alcançado.

O gradiente de umidade é a diferença que existe entre a umidade das camadas mais externas e as camadas mais internas da peça de madeira, indicando que quanto maior for a diferença mais rapidamente acontecerá a perda de umidade, os tempos de secagem serão inferiores e em consequência a qualidade da madeira será afetada pelos elevados gradientes de umidade (KLITZKE, 2005).

As diferenças de umidade acentuadas durante o processo de secagem geram tensões internas na madeira, que resultam na formação de defeitos como colapso, rachaduras, empenamentos e encruamento (JANKOWSKY et. al., 2003; SANTOS, 2002).

Segundo Santini (1980), a taxa de secagem é a quantidade de água evaporada da madeira em intervalo de tempo, em relação à área de vaporização. Este fator permite estimar o tempo de secagem, desde o início da secagem até a umidade final. Sendo também uma variável que permite conhecer o comportamento da madeira ao longo da secagem (SANTINI; HASELEIN, 2002). Os mesmos autores informam que a maior taxa de secagem ocorre nas fases iniciais do processo acima do PSF, enquanto que abaixo desse ponto a taxa diminui. Contudo segundo Martins (1988), quanto maior a temperatura maior será a taxa da secagem, condição aceita abaixo do PSF, na remoção da água de adsorção.

A taxa de secagem varia de acordo com a espécie. Assim, determinadas espécies secam mais rápido em temperaturas mais suaves, enquanto que outras necessitam de temperaturas mais elevadas e programas de secagem complexos e bem elaborados (REZENDE et al., 2015). Como exemplo, pode-se citar a madeira de *Corymbia citriodora*, que por possuir elevada densidade demanda mais tempo de secagem.

## 2.4 Secagem convencional

A dificuldade de conduzir a secagem da madeira e a falta de informação sobre a espécie a ser processada, aumenta o nível de perda do material. Desse modo, a secagem convencional é uma opção para controlar a secagem, pois a secagem em secadores apresenta vantagens como o controle de defeitos, controle da umidade final, tempo de secagem, além da adequação a diversos tipos de madeira, mas apresenta maior custo em relação à secagem ao ar livre.

A secagem convencional é realizada em estufas, que operam com temperaturas, que vão desde 35 °C até 90 °C, tendo controle da temperatura, umidade relativa e em outros casos a circulação do ar (PRATT, 1974). Podendo se recomendar no início, secagem com temperaturas inferiores a 45 °C (HARTLEY; GOUCH, 1990). Mas, quando a umidade da madeira encontra-se abaixo do PSF, a temperatura pode ser aumentada consideravelmente, até a madeira atingir a umidade desejada (CHRISTENSEN, 1984).

A secagem convencional possui vantagens como o controle do processo de secagem, a independência das condições climáticas externas, o menor tempo de secagem, a diminuição de ocorrência de defeitos e a adequação ao tipo de madeira.

No trabalho de Susin (2012), foram secadas tábuas de *Corymbia citriodora*, com 25 mm de espessura e com 55,4% de umidade inicial até 12%. A madeira permaneceu por 27 dias em estufa convencional. Entretanto, Rosso (2006) submeteu tábuas da mesma espécie e dimensão e com umidade inicial de 54%, à secagem combinada. Estas tábuas permaneceram por 27 dias em secagem ao ar livre, seguido de mais 13 dias em secagem convencional para alcançar a umidade de 12%.

## 2.5 Secagem de tábuas com lenho de tração

Alguns trabalhos foram realizados com o objetivo de diferenciar até qual ponto a cinética da secagem é influenciada pelos lenhos de tração e oposto. Segundo Tarmian et al. (2009), o lenho de tração apresenta menor porosidade, tendo relação com baixa umidade inicial em comparação com o lenho oposto. Além disso, o lenho de tração apresenta maior densidade básica do que o lenho oposto por possuir parede celular mais espessa, tendo uma relação direta com o comportamento da secagem da madeira, quando provenientes desses diferentes lenhos. Segundo os mesmos autores, na secagem da madeira de *Fagus sylvatica*, o lenho de tração seca mais lentamente do que o lenho oposto. Williams (1971) e Davis (2007) afirmam que apesar da secagem do lenho oposto ser mais rápida do que a do lenho de tração,

a madeira alcança a umidade final ao mesmo tempo devido à elevada umidade inicial no lenho oposto.

Tarmian (2011), avaliando o aumento da temperatura em madeira de *Populus nigra*, descreve que a secagem convencional dos lenhos de tração e oposto mostrou comportamento semelhante. Contudo, o mesmo autor observou pequenas diferenças entre a parte externa e a interna da madeira de forma mais acentuada no lenho oposto, sendo atribuído à baixa umidade inicial e à alta densidade no lenho de tração.

## **2.6 Programas de secagem**

Os programas de secagem são sequências progressivas de temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido dentro da câmara de secagem, elaboradas para madeiras específicas ou que possuem características semelhantes e para diminuir índices de defeitos (PONCE; WATAI, 1985). Portanto, na elaboração de programas de secagem, o controle de temperatura e umidade relativa do ar tem por objetivo secar madeira no menor tempo possível, garantindo sua qualidade ao final do processo (OLIVEIRA, 1981).

Etapas que estruturam o programa de secagem (Rasmussen, 1961):

- a) Aquecimento do ar e da madeira dentro do secador até a temperatura desejada no início do processo;
- b) Secagem: utilizando os parâmetros umidade relativa e temperatura previstos no programa, com o propósito da retirada de água em menos tempo e menor índice de defeitos na madeira;
- c) Uniformização: tem como objetivo a redução da variação de umidade que ocorre entre as peças de madeira que constituem a carga;
- d) Acondicionamento: visa eliminar as variações das tensões internas e as deformações na madeira por meio da umidificação.

Segundo Galvão e Jankowsky (1985) o programa típico de secagem convencional é aquele do tipo umidade x temperatura, em que a temperatura do ar e a umidade relativa no interior da câmara são geralmente ajustadas em relação à umidade da madeira.

Segundo Martins (1988), existem critérios para a seleção do programa de secagem: as características da espécie (densidade, permeabilidade, contração, etc.), a umidade inicial e final da madeira, a espessura da madeira, o equipamento utilizado no processo de secagem e o objetivo para o qual será destinada a madeira.

Em programas de secagem para madeiras de *Eucalyptus* são recomendados no início da secagem utilizar baixas temperaturas e potencial de secagem moderadas, pois essas madeiras são mais susceptíveis à formação de defeitos (CINIGLIO, 1998).

Na Tabela 1 estão apresentados os valores dos parâmetros de secagem mais recentes encontrados nas literaturas para espécies que apresentam comportamento de secagem semelhante aos do gênero *Corymbia*.

Tabela 1 - Parâmetros dos programas de secagem para madeiras dos gêneros *Corymbia* e *Eucalyptus*.

Madeira	Temperatura (°C)		Potencial de Secagem	Fonte
	Inicial	Final		
<i>Corymbia citriodora</i>	38,8	68,5	2,08	Susin (2012)
<i>Corymbia torelliana</i>	47,3	70,8	2,44	Eleotério et al. (2015)
<i>Eucalyptus</i> spp.	41,8-44,7	66,0-68,9	2,02-2,44	Barbosa et al. (2005)
<i>Eucalyptus saligna</i>	39,7	67,2	2,07	Susin (2012)
<i>Eucalyptus robusta</i>	37,2	67,0	1,92	Susin (2012)
<i>Eucalyptus saligna</i> juvenil	46	70	2,4	Soares et al. (2016)
<i>Eucalyptus saligna</i> adulto	39	68	2,0	Soares et al. (2016)

## 2.7 Fatores internos e externos da secagem da madeira

Fatores internos, como as características da própria madeira influenciam a secagem, como a densidade, estrutura anatômica, umidade e espessura da peça, são fatores propícios de alteração dos processos da secagem da madeira. Os fatores relacionados ao ambiente da secagem são conhecidos como fatores externos, como a temperatura, umidade relativa, velocidade de circulação do ar, dentre outros.

A densidade básica da madeira é uma propriedade muito importante e está relacionada com a permeabilidade, característica relacionada na secagem da madeira (MARTINS, 1988). Segundo Andrade (2000), anatomicamente, madeiras com alta densidade básica possuem maior espessura da parede celular e, conseqüente, menor volume do lume. Estas madeiras possuem maior quantidade de água de adsorção, portanto, a movimentação da água dependerá principalmente do diâmetro dos vasos.

A taxa de secagem é inversamente proporcional à espessura das tábuas (TOMASELLI, 1980). Segundo o mesmo autor, a espessura das peças de madeira interfere nos processos de secagem; peças com maior espessura possuem maior proporção entre a massa de água a ser retirada e a distância para a superfície de evaporação.

Em relação aos fatores externos no processo de secagem, o aumento da temperatura, contribui para o aumento da velocidade na remoção da água, tanto para a movimentação da água livre como de adsorção (OLIVEIRA, 1981). No entanto, o aumento da temperatura pode causar maior deformação na estrutura anatômica da madeira.

Segundo Galvão e Jankowsky (1985), a umidade relativa está diretamente relacionada com a capacidade do ar em conter água e com a movimentação da água da superfície da madeira, ou seja, existe um limite na madeira em receber maior ou menor quantidade de água.

## **2.8 Defeitos resultantes da secagem da madeira**

Os defeitos ocorrentes na madeira são resultantes do processo de secagem ou das próprias características da madeira. Os defeitos são deformações que modificam a estrutura da madeira, causadas por tensões e contrações irregulares, impedindo a sua utilização (BRANDÃO, 1989). No entanto, os defeitos podem ser controlados, por isso, as práticas de secagem têm o objetivo de prevenir ou limitar esses problemas em um nível aceitável (CAMPBELL; HARTLEY, 1978).

Na secagem os principais defeitos ocorrentes na madeira de *Eucalyptus*, são o colapso, as rachaduras, empenamentos e encruamento (MENDES et al., 1998).

As deformações durante o processo de secagem se devem principalmente à baixa permeabilidade da madeira, característica responsável pelos acentuados gradientes de umidade, elevadas contrações, alta suscetibilidade de rachaduras e altas tensões de secagem (VERMAAS, 1995; BARBOSA, 2003).

Simpson (1991) define o colapso como a deformação crítica na madeira, que resulta no rompimento das células do lenho. Ele ocorre pela tensão capilar, quando a secagem gera forças que superam a resistência das fibras, normalmente na fase inicial, durante a movimentação da água livre (JANKOWSKY; GALVÃO, 1988). Contudo, fatores como: pequenos diâmetros dos capilares, baixa densidade da madeira, baixa permeabilidade e alta tensão superficial da água removida estão relacionados ao colapso (JANKOWSKY, 1995).

Os empenamentos são considerados como a deformação da madeira em relação a sua forma original (OLIVEIRA, 1998). Esses defeitos estão relacionados com as diferenças entre a variação radial e tangencial, características anatômicas da madeira, grã irregular, madeira juvenil e madeira de reação, além das tensões de crescimento, uma vez que também ocasionam rachaduras.

As rachaduras ocorrem nas primeiras fases de secagem ou são ocasionadas por tensões de crescimento, podendo ser observadas no topo e na superfície da madeira. Elas se originam como consequência da diferença de retração na direção radial e tangencial da madeira, da diferença de umidade entre regiões vizinhas da madeira e pelas tensões de secagem (OLIVEIRA, 1981). Sendo resultado dos acentuados gradientes de umidade (DENIG et al., 2000), essas diferenças provocam a ruptura dos elementos estruturais da madeira (SANTINI, 1992).

Segundo Simpson (1991), as rachaduras superficiais são decorrentes da fase inicial da secagem quando a parte superficial das tábuas se encontra altamente tensionada, enquanto que, as rachaduras de topo resultam devido aos extremos das tábuas secarem mais rapidamente do que o centro da tábua, não possuindo uniformidade na peça.

## **2.9 Deformações resultantes das tensões de secagem (DTS)**

Wright (1961) define a tensão como a força interna que se origina no material pela aplicação de uma carga. Quando a força interna tende a esticar o material é denominada tensão de tração e quando tende a comprimir é chamada de tensão de compressão. O mesmo autor comenta que no caso das tensões geradas no processo de secagem da madeira, estas ocorrem pela diferença de contração entre zonas ou partes adjacentes da madeira.

Segundo Dinwoodie (1965), as tensões de crescimento são forças que reagem nos tecidos das árvores para mantê-las eretas e ocorrendo em madeira verde, portanto, são diferentes das tensões de secagem que ocorrem pela contração durante o processo de secagem.

A presença das tensões de secagem surge pela rapidez do processo de secagem, ocasionando contração da madeira pela perda de umidade, alterando a estrutura interna do material (FERNANDES; GALVAO, 1978). As tensões de secagem durante o processo encontram-se distribuídas em toda a estrutura da madeira, se as tensões de secagem ultrapassarem o limite de proporcionalidade, ocorrerá a tensão de deformação permanente, provocando prejuízos durante o processo (McMILLEN, 1955; McMILLEN 1958).

O encruamento é um fenômeno que deforma a madeira. É definido como a condição de tensão de deformação permanente do material após uma secagem rápida e não uniforme, sendo que as fibras das partes externas estão sob compressão por baixos valores de umidade e as internas sob tração com alta umidade, promovendo um dano irreversível na peça (McMILLEN, 1958). É ocasionado por interrupções na circulação da água pela formação de uma camada muito seca que obstrui o fluxo capilar da água (KLITZKE, 2005).

Segundo Keiny (1997), o encruamento ocorre quando se conduz a secagem da madeira rápida e desuniforme. Essa condição de secagem acima do PSF, permite que as camadas externas atinjam umidades muito baixas, ocasionando que fiquem sob tração. Entretanto, umidade acima do PSF não permite que a parte interna contraia, ocasionando que o interior fique sob compressão. Na continuação da secagem, quando a parte interna começa a atingir umidades mais baixas, ela se contrai não acompanhada pela camada externa, ocasionando a reversão dos esforços, sendo que a camada interna ao final do processo fica sob tração, enquanto que e as camadas externas sob compressão (ROZAS MELLADO, 1993).

O teste do garfo pode estar associado à avaliação da DTS, uma vez que este método avalia qualitativamente as tensões de secagem. Portanto, esse método pode ser passível de comparação com os resultados do extensômetro para avaliar as DTS. Rosso (2006) observou fortes tensões de secagem em madeira de *Corymbia citriodora* na secagem combinada. Batista et al. (2015) trabalhando com três espécies de *Eucalyptus*, avaliaram por meio do teste do garfo as tensões de secagem. Os autores encontraram que a maioria das tábuas de *E. dunnii* desenvolveram fortes tensões de secagem, que o *E. saligna* apresentou tensões leves e que o *E. grandis* se mostrou livre de tensões.

Andrade (2000) observou em madeiras de *Martiodendron sp.* e *Aspidosperma sp.* tábuas com tensões fortes. Já para madeira proveniente do gênero *Eucalyptus*, reporta-se na literatura tábuas com tensões de secagem fortes (JANKOWSKY et al., 1998; BATISTA, 2009; ZEN, 2016). Recomenda os autores aplicar o acondicionamento a vapor para aliviar essas tensões e melhorar a qualidade da madeira.

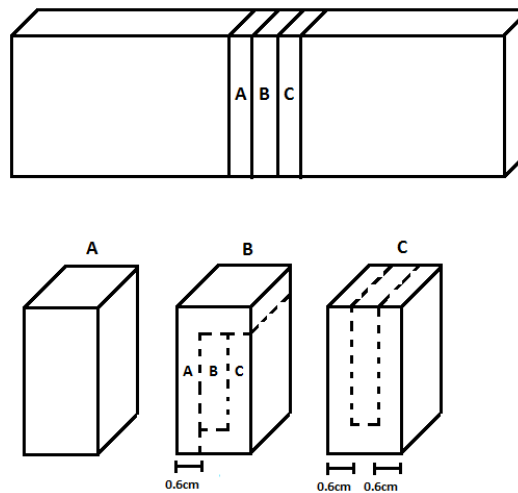
Na secagem ao ar livre, dificilmente tensões de secagem são geradas, provavelmente pela baixa temperatura. Zen (2016) secando madeira de *Eucalyptus* ao ar livre, não observou a presença de tensões de secagem. Resultados semelhantes foram reportados por Stangerlin et al. (2009) em madeira de *E. tereticornis*, *E. saligna* e *C. citriodora*.

Barrientos (2003), que trabalhou com tensões de secagem em *Pinus radiata*, com medições pós-acondicionamento e 48 horas após a primeira leitura, observou que as tensões, na maioria dos casos, aumentaram após esse tempo, mas as tensões não foram consideradas, concluindo que o acondicionamento em vapor foi viável. O mesmo autor avaliando as tensões longitudinais na mesma espécie pós-acondicionamento final em vapor, observou também diminuição das tensões de secagem.

## 2.10 Método para avaliar deformações resultantes das tensões de secagem

Para avaliar as tensões de secagem é utilizado o método do teste do garfo mostrado na Figura 2, sendo o teste mais utilizado, permitindo verificar se as madeiras estão livres de tensões, mediante a confecção de amostras em processo de secagem (JANKOWSKY, 1988). Segundo o mesmo autor, entre os resultados, pode-se citar: madeiras livres de tensões, madeiras com tensões internas ou tensões externas.

Figura 2 - Esquema da confecção de amostragem para avaliação das tensões de secagem. Em que: A - determinação da umidade, B - gradientes de umidade e C - teste do garfo.



Fonte: Adaptado de GALVÃO; JANKOWSKY (1985).

Para executar o teste do garfo, é removida uma peça transversal do centro da tábua, com largura não maior que sua espessura, em seguida, remove-se pelo menos um centímetro do centro da peça propriamente dita. Os resultados podem ser instantâneos, ou em outros casos, pode levar mais tempo para serem visíveis. As madeiras livres de tensão, idealmente os dentes permanecem paralelos, enquanto que, madeiras tensionadas reagem fechando os dentes ou vice-versa. O garfo é considerado um método destrutivo no qual as amostras levam mais tempo de preparação. Primeiramente interrompe-se a secagem, demandando mais tempo de avaliação e maior consumo de energia para preparação da amostragem, além do que os resultados são avaliados qualitativamente.

Allegretti e Ferrari (2008) desenvolveram um mecanismo com um sensor para determinar diretamente as tensões de secagem, colocando-o em um furo feito no centro da espessura da peça e outro na região superficial para detectar o nível de tensão quando a madeira se contrai, mediante a perda de umidade durante a secagem. Os autores observaram que a tendência das medidas dos sensores e os resultados do teste do garfo mostraram



comportamento semelhante, determinando as forças de tração e forças de compressão na madeira. Também observaram que houve uma tensão de compressão nas camadas externas, e uma tensão de tração nas camadas internas, concluindo que, enquanto existe uma variação positiva do sinal no sensor utilizado, significa um incremento das forças de tensões geradas na madeira.

O acondicionamento da madeira em banho de vapor é uma das etapas dos programas de secagem. Nesta etapa, o amolecimento da estrutura da madeira durante a secagem convencional, favorece no alívio das tensões de secagem formadas. Trata-se de uma forma para melhorar a qualidade das peças secas, sendo eficiente na minimização de prejuízos que limitam a utilização da madeira e que provocam perda no material.

O acondicionamento a vapor da madeira na secagem demonstra importância para ser estudada, uma vez que sua aplicação na madeira, mostra a capacidade do alívio das tensões de crescimento e das tensões de secagem (WEIK et al., 1984), contribui no aumento da permeabilidade pelo amolecimento da madeira (MACKAY, 1971) e melhoramento na estabilidade dimensional (CHAFE, 1990).

O tempo de acondicionamento a vapor pode variar entre 8 a 48 horas, dependendo das condições das tensões de secagem, da espessura da tábuas e da umidade da madeira (PRATT, 1974; SIMPSON, 1991). Rasmussen (1968) recomenda acondicionar a madeira quando a umidade da amostra mais úmida dentro da câmara seja igual à umidade desejada.

Corroborando com o fato de que o acondicionamento a vapor é fundamental para aliviar as tensões de secagem, Batista et al. (2015), em madeira de *Eucalyptus dunnii* e Ciniglio (1998) em *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, observaram tensões fortes de secagem e aplicando os mesmos tempos de acondicionamento pós-secagem, concluíram que o acondicionamento a vapor, por 8 horas, foi insuficiente para as espécies pesquisadas. No entanto, Juacida (2005) avaliou o efeito do pré-acondicionamento para madeira de *Nothofagus betuloides*, observando 80% das tábuas com tensões moderadas, enquanto que apenas 7% resultaram em tensões fortes. Os resultados foram satisfatórios, quando foram aplicadas 10 horas de tratamento antes da secagem e 6 horas de acondicionamento em vapor final.

Assim, tábuas com altas tensões de secagem são indicativas para se aplicar o acondicionamento em vapor, ou se foi aplicado, deve-se recondicionar, aumentando o tempo.

Rozas et al. (2005) acondicionou a madeira de *E. globulus* com vaporização em três tempos durante a secagem: inicialmente por 48 horas, no estágio intermediário, por 6 horas, e no final por 24 horas. O autor afirma que foi possível aliviar as tensões de secagem, observando apenas tensões moderadas nas espécies. Rozas Mellado (1993), em madeira de *E.*

*grandis*, observou que os três tempos de acondicionamento 1, 2 e 4 horas aplicados na madeira aliviaram praticamente todas as tensões de secagem

No entanto, Ananías et al. (2008) avaliaram a secagem para *Acacia melanoxylon* e *Acácia dealbata*, seguindo os padrões de qualidade da norma chilena. Observaram redução das tensões de secagem, aplicando 8 horas do acondicionamento em vapor. Perez et al. (2007) com mesmo padrão de qualidade, observaram em madeira de *Drimys winteri* tensões moderadas e tensões leves, quando a madeira foi acondicionada em vapor. Rezende et al. (2015) avaliaram o efeito do acondicionamento da madeira serrada de *E. grandis* em vapor por 3 horas, a 90°C e 100% de umidade relativa. Os autores encontraram redução dos níveis de defeitos, significando alívio das tensões de secagem.

### 2.11 Tensão e deformação

As práticas experimentais de medição de tensões se baseiam na medição dos efeitos provocados pelas tensões ou pelas medições da deformação que ocorre no material, sendo avaliadas indiretamente pela associação do campo de deformações (LAERMANN, 2001).

A resistência da madeira depende da força aplicada e da forma como é aplicada. Segundo Carvalho (1996), quando forças externas são aplicadas nos materiais, os levam à formação de tensões internas, estas por sua vez deformam a peça, modificando suas dimensões.

A tensão, pode ser definida como a força aplicada pela área da seção, representada na Equação 1.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

Em que:

$\sigma$ = tensão;

$F$ = força máxima;

$A_0$ = área inicial.

Bodig e Jayne (1993) mencionam que para entender claramente a rigidez da madeira é necessário obter as relações tensão x deformação para diferentes tipos de carga. Entretanto, as avaliações dos esforços baseiam-se na Lei de Hooke (EQUAÇÃO 2). Na qual as tensões normalmente são diretamente proporcionais à deformação específica do material.

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (2)$$

Em que:

$\sigma$  = tensão normal;

$E$  = módulo de elasticidade;

$\varepsilon$  = deformação específica.

O módulo de elasticidade “E” é a constante de proporcionalidade da tensão versus deformação. Quanto maior for este módulo, maior será a deformação resultante da aplicação da tensão.

Segundo Bodig e Jayne (1993), a deformação de um corpo sólido pode ser obtida por meio da diferença entre o comprimento da separação dos pontos antes e depois da deformação (EQUAÇÃO 3).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (3)$$

Em que:

$\varepsilon$  = deformação específica;

$\Delta L$  = deformação linear;

$L$  = distância entre os pontos.

## 2.12 Emprego do extensômetro

Entre os métodos não destrutivos, diversos equipamentos são utilizados com o propósito de medir as deformações sofridas em materiais pelas forças exercidas. Normalmente, são utilizados os extensômetros elétricos, que determinam indiretamente as deformações superficiais causadas pelas tensões residuais quando estas são liberadas do material (KOBAYASHI, 1987). Entre outros modelos de extensômetros, pode-se citar o extensômetro *Growth Strain Gauge* que é um equipamento de uso mecânico, que determina as Deformações Residuais Longitudinais (DRLs) em árvores (SOUZA et al., 2003; LIMA et al., 2004).

O extensômetro, normalmente, é utilizado para medir as DRL associadas às tensões de crescimento em árvores em pé (FIGURA 3), como descrito por Lima et al. (2004). O equipamento, com o auxílio de um relógio comparador mede a deformação sofrida pela movimentação de dois pinos fixados a 45 mm um do outro no tronco da árvore em pé na direção da grã. Para liberar as tensões, é feito um furo entre a parte central dos pinos com uma broca de 20 mm.

Figura 3 - Medição das DRL em tábuas de árvores de *Corymbia citriodora*.



Fonte: Do autor (2017).

Algumas pesquisas empregaram o extensômetro utilizado no presente estudo, porém, para determinar as deformações residuais longitudinais associadas às tensões de crescimento (DRL) em árvores em pé. Assim, a literatura mostra valores encontrados de DRL variando de 71 a 90  $\mu\text{m}$ , em árvores do gênero *Eucalyptus* (SOUZA et al., 2003; LIMA et al., 2004; RODRIGUES et al., 2008). Já para o gênero *Corymbia citriodora* os valores de DRL variaram de 42 até 189  $\mu\text{m}$  (CARVALHO et al., 2010; LIMA et al., 2015; ABREU JÚNIOR et al., 2017).

No entanto, Sánchez et al. (2017) utilizaram o extensômetro para medir as deformações residuais longitudinais em tábuas verdes de *Corymbia citriodora* após o desdobro da madeira (FIGURA 4). Os autores demonstraram que o equipamento foi viável para este fim, uma vez que encontraram média de DRL igual a 20  $\mu\text{m}$ .

Figura 4 - Medição das DRL em tabuas verdes de *Corymbia citriodora*.



Fonte: Do autor (2017).

Para a medição de DRL em árvores, o extensômetro é considerado uma ferramenta relativamente fácil de ser empregada, com processo de medição rápido, de fácil manuseio, produzindo leitura confiável. Em comparação com outros métodos de medição de DRL, pode ser considerado não destrutivo ou pouco invasivo, com alterações mínimas na estrutura da madeira.

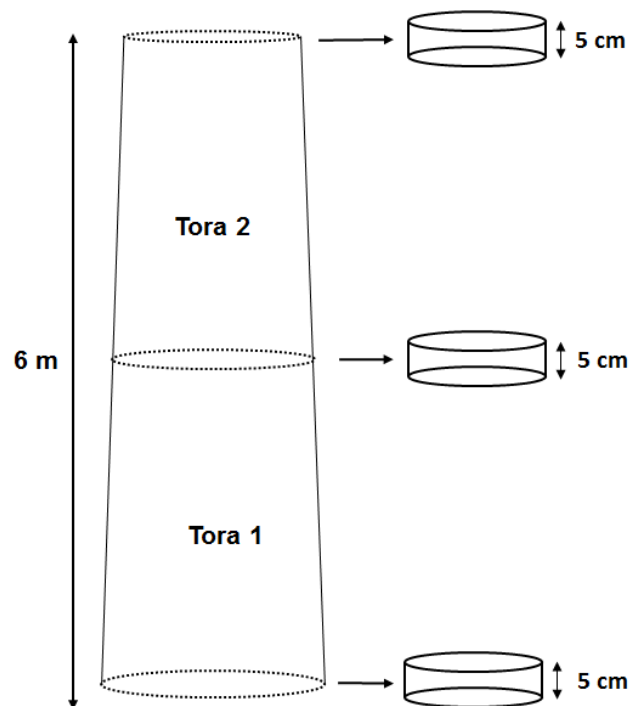
### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Amostragem do material biológico

Foram selecionadas e abatidas seis árvores de *Corymbia citriodora*, sendo três eretas e três inclinadas, localizadas no Campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA), com idade de 60 anos e que foram inicialmente plantadas no espaçamento 3 x 2 m.

Foram determinadas as inclinações das árvores e medidos os diâmetros a 1,30 m de altura. Depois de derrubadas, as árvores foram divididas em toras de 6 m de comprimento e transportadas para a serraria. Posteriormente, as toras foram seccionadas em duas de 3 m, de onde foram retirados discos de 5 cm, das extremidades, para determinação da densidade básica (FIGURA 5).

Figura 5 - Esquema de divisão das toras e da retirada dos discos para determinação da densidade básica.

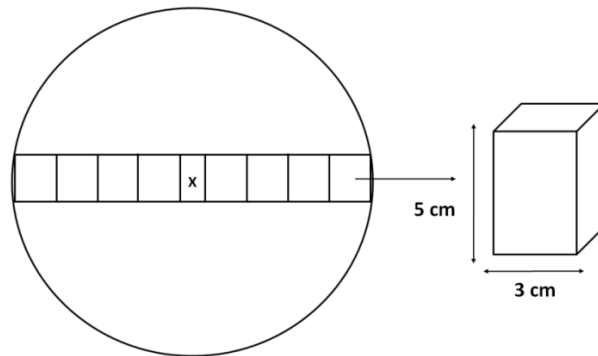


Fonte: Do autor (2017).

#### 3.2 Confeção das amostras para determinação da densidade básica

De cada disco retirado de cada tora, foi cortada uma faixa central com três centímetros de espessura e posteriormente dividida em amostras de 3 x 5 x 3 cm (FIGURA 6). Em seguida, as amostras foram colocadas em água para saturação em vácuo.

Figura 6 - Esquema da retirada das amostras para determinação da densidade básica da madeira.



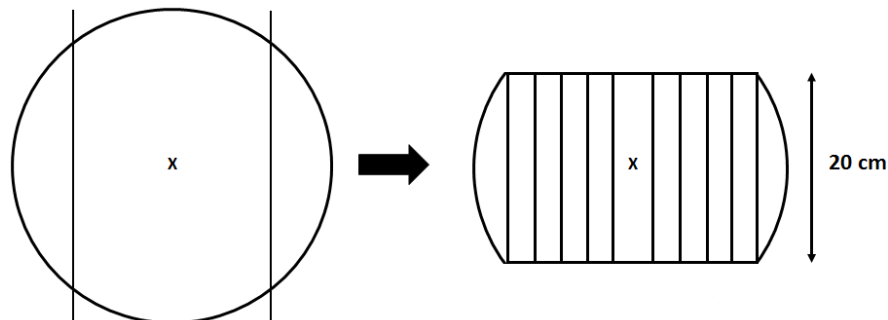
Fonte: Do autor (2017).

A densidade básica da madeira foi determinada conforme a norma NBR 11.941 (ABNT, 2003), calculada pela relação da massa seca e volume verde.

### 3.3 Preparo do material para elaboração do programa de secagem

Foi realizado o desdobro tangencial das primeiras toras das árvores eretas, até a obtenção do bloco central, com 20 cm de espessura (FIGURA 7). O bloco central foi serrado para produzir tábuas de faces tangenciais com as dimensões de 300 x 20 x 2,5 cm (comprimento, largura e espessura), sendo selecionadas três tábuas no sentido medula casca e então divididas em três peças de 100 cm.

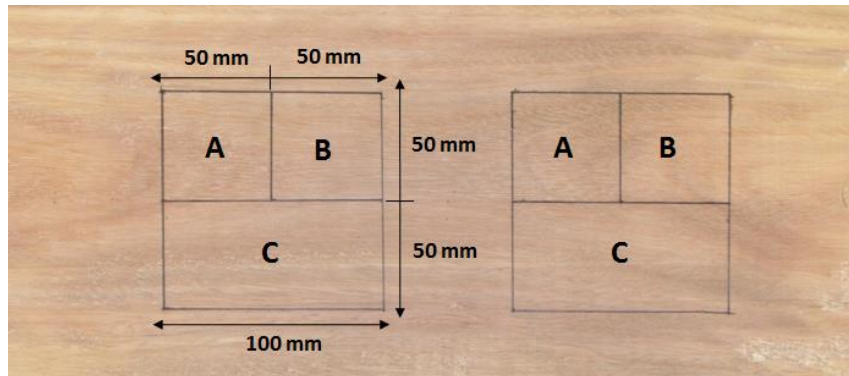
Figura 7 - Esquema do desdobro das toras de *Sorymbia citriodora*.



Fonte: Do autor (2017).

As tábuas de 100 cm de comprimento foram aplainadas e desgrossadas até atingirem um centímetro de espessura. De cada tábua, foram retiradas seis amostras para determinação da umidade inicial, da densidade básica e para os ensaios de secagem drástica (FIGURA 8), totalizando 324 amostras.

Figura 8 - Esquema da retirada das amostras para determinação da umidade inicial (A) e da densidade básica (B) e para a secagem drástica (C).



Fonte: Do autor (2017).

A umidade inicial da madeira foi determinada conforme a norma NBR 7190 (ABNT, 2010).

### 3.4 Elaboração do programa de secagem

Para a elaboração do programa de secagem para a madeira de *C. citriodora*, foi utilizada a metodologia de secagem drástica desenvolvida por Ciniglio (1998). As amostras de 100 x 50 x 10 mm foram submetidas à secagem em estufa de laboratório a 100°C, com circulação forçada de ar. Foram observados os tempos e as taxas de secagem e os defeitos (rachaduras e colapso) desenvolvidos. Os valores das rachaduras e colapso foram transformados em escores, conforme Tabela 2. As velocidades de secagem foram determinadas utilizando a massa e o tempo de todas as amostras até atingir a umidade exigida (EQUAÇÕES 4, 5, 6). Esses valores foram utilizados para determinar as variáveis do ensaio da secagem drástica (TABELA 3). Os parâmetros de secagem foram determinados com base nos valores das variáveis do ensaio (EQUAÇÕES 7, 8 e 9).

Tabela 2 - Escores atribuídos à intensidade das rachaduras de topo, interna e do colapso.

Escore	Rachadura de topo	Rachadura interna	Colapso
1	Ausente	Ausente	Ausente
2	CR < 5,0 e LR < 0,5	CR < 2,5 e LR < 0,5	E < 0,25
3	CR > 5,0 e LR > 0,5	CR > 2,5 e LR < 0,5	0,25 > E < 0,5
4	CR < 5,0 e LR < LR < 1,0	CR > 2,5 e LR > 0,5	0,5 < E < 1,0
5	CR > 5,0 e LR < LR < 1,0	-	E > 1,0
6	CR > 5,0 e LR > 1,0	-	-

Em que: **CR** = comprimento da rachadura (mm); **LR** = Largura da rachadura (mm); **E** = espessura da amostra (mm).



Tabela 3 - Variáveis para a secagem drástica.

Variável	Descrição	Unidade
$U_i$	Umidade inicial	%
$T_{5\%}$	Tempo de secagem até 5% de umidade	h
$T_{30\%}$	Tempo de secagem até 30% de umidade	h
$T_{30\% \rightarrow 5\%}$	Tempo de secagem de 30% a 5% de umidade	h
$TS_{5\%}$	Taxa de secagem até 5% de umidade	$g.cm^{-2}.h^{-1}$
$TS_{30\%}$	Taxa de secagem até 30% de umidade	$g.cm^{-2}.h^{-1}$
$TS_{30\% \rightarrow 5\%}$	Taxa de secagem de 30% a 5% de umidade	$g.cm^{-2}.h^{-1}$
$R_{5\%}$	Rachadura de topo até 5% de umidade	Escore
$R_{30\%}$	Rachadura de topo até 30% de umidade	Escore
$R_{30\% \rightarrow 5\%}$	Rachadura de topo de 30% a 5% de umidade	Escore
$C_{5\%}$	Colapso até 5% de umidade	Escore

As determinações das taxas de secagem até 5% de umidade ( $TS_{5\%}$ ), até 30% de umidade ( $TS_{30\%}$ ) e de 30% a 5% de umidade ( $TS_{30\% \rightarrow 5\%}$ ) foram obtidas com base nas Equações 4, 5 e 6, respectivamente.

$$TS_{5\%} = \frac{m_i - m_{5\%}}{T_{5\%} * 100} \quad (4)$$

$$TS_{30\%} = \frac{m_i - m_{30\%}}{T_{30\%} * 100} \quad (5)$$

$$TS_{30\% \rightarrow 5\%} = \frac{m_{30\%} - m_{5\%}}{T_{30\% \rightarrow 5\%} * 100} \quad (6)$$

Em que:

**mi** = massa inicial (g); **100** = área superficial (cm<sup>2</sup>)

A determinação dos parâmetros de secagem foi efetuada com base nas Equações 7, 8 e 9.

$$TI = 27,9049 + 0,7881 T_{30\%} + 419,0254 TS_{5\%} + 1,9483 T_{5\%} \quad (7)$$

$$TF = 49,2292 + 1,1834 T_{30\%} + 273,8685 TS_{30\%} + 1,0754 T_{5\%} \quad (8)$$

$$PS = 1,4586 - 30,4418 TS_{30\%} + 42,9653 TS_{5\%} + 0,1424 T_{30\% \rightarrow 5\%} \quad (9)$$

Em que:

**TI** = Temperatura inicial (°C);

**TF** = Temperatura final (°C) e

**PS** = Potencial de secagem.

### 3.5 Secagem convencional da madeira

#### 3.5.1 Desdobro de toras para secagem convencional

Foi realizado o desdobro tangencial das segundas toras de todas as árvores, deixando o bloco central com 20 cm de espessura (FIGURA 6). Para a retirada do bloco central nas árvores inclinadas, foi considerada a posição de excentricidade da medula, devido à formação de lenho de tração (FIGURA 9). Obteve-se do bloco central tábuas serradas com 300 x 20 x 3 cm (comprimento x largura x espessura), resultando em 55 tábuas, sendo 23 das árvores eretas e 32 das árvores inclinadas.

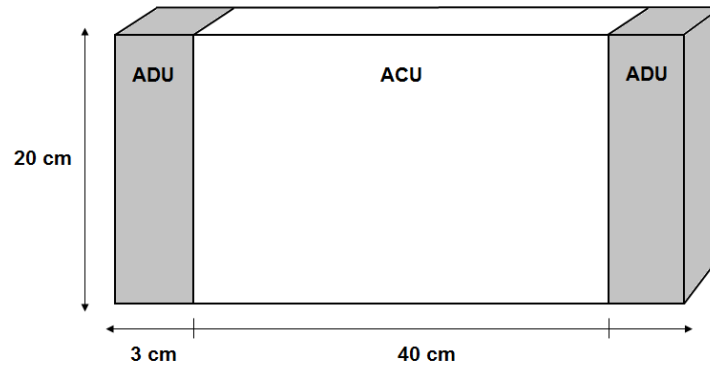
Figura 9 - Amostragem nas toras das árvores inclinadas para obtenção do bloco central com lenho de tração e oposto.



Fonte: Do autor (2017).

Foram selecionadas, aleatoriamente, duas tábuas das árvores eretas e duas das árvores inclinadas. De cada tábua foi cortada uma peça de 40 cm de comprimento (amostra controladora de umidade - ACU) e duas peças de 3 cm (amostra determinadora de umidade - ADU) em ambas as extremidades, conforme ilustrado na Figura 10. No topo das ACU's foi aplicado selante para evitar a perda rápida de umidade e representar as tábuas de comprimentos maiores.

Figura 10 - Esquema da retirada das amostras controladoras e determinadoras de umidade.



Fonte: Do autor (2017).

### 3.5.2 Características da estufa convencional

A estufa convencional utilizada tem capacidade aproximada de 2 m<sup>3</sup> de madeira, sendo estruturada por: termômetro de bulbo seco e úmido, sistema de aquecimento por água quente, sistema de umidificação, fornalha, ventilação, *dampers*, bomba de água, oito sensores de umidade e um painel de controle.

### 3.5.3 Empilhamento da madeira na estufa

A montagem da pilha foi realizada cuidadosamente, utilizando tabiques homogêneos para manter o alinhamento das tábuas, garantir a circulação do ar e evitar empenamentos na madeira. Foram distribuídas quatro fileiras de tabiques por camada. Ao longo do empilhamento foram distribuídas as ACU's e os sensores de umidade. Cada par de sensores foi fixado nas tábuas a uma distância de 25 mm entre pinos no sentido transversal às fibras. Os pinos foram fixados em partes livres de nós até penetrar no centro da espessura da tábua. Foi adotado o programa de secagem desenvolvido neste mesmo trabalho. Após o empilhamento, foram colocadas placas de concreto sobre a pilha para restringir empenamentos nas últimas camadas.

### 3.5.4 Avaliação das deformações resultantes das tensões de secagem (DTS)

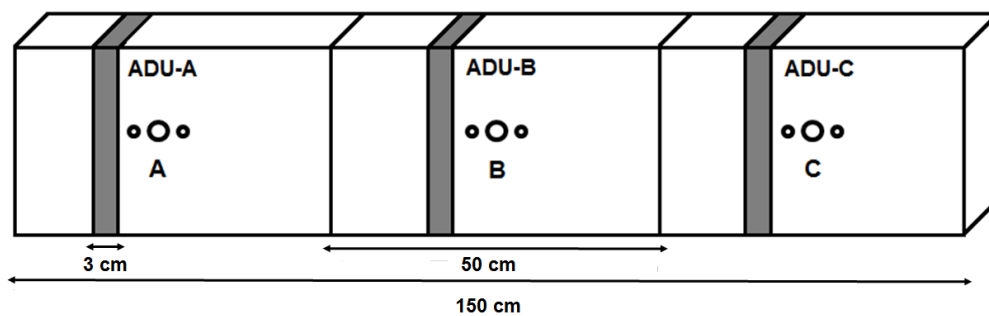
Cada tábua com 300 x 20 x 3 cm foi seccionada em partes iguais de 150 cm de comprimento. As leituras das deformações resultantes das tensões de secagem (DTS) foram medidas em duas etapas da secagem:

- a) após secagem, sendo medidas tábuas em estado quente e tábuas resfriadas após 48 horas até temperatura ambiente;

- b) após 6 horas de acondicionamento em vapor, sendo medidas tábuas em estado quente e tábuas resfriadas após 48 horas até temperatura ambiente.

Foram distribuídos três pontos (A, B, C) para a medição das DTS. Ao lado de cada ponto foram cortadas amostras para determinação da umidade da madeira (ADU - A, B, C), após a medição das deformações (FIGURA 11).

Figura 11 - Esquema da tábua com a distribuição dos pontos para medir as deformações resultantes das tensões de secagem e amostragem para determinação da umidade.



Fonte: Do autor (2017).

Foi utilizado o método do extensômetro (FIGURA 12), que consiste em medir com relógio comparador o afastamento de dois pinos fixados na superfície da tábua no sentido longitudinal a 45 mm um do outro (FIGURA 13). Para promover a movimentação dos pinos e medir as deformações resultantes da liberação das tensões de secagem, foi feito um furo entre eles (centro) com broca de 20 mm de diâmetro (FIGURA 14) como descrito por Lima et al. (2004) para medição das DRL em árvores.

Figura 12 - Detalhamento do equipamento utilizado para as medições das DTS.



Fonte: Do autor (2017)

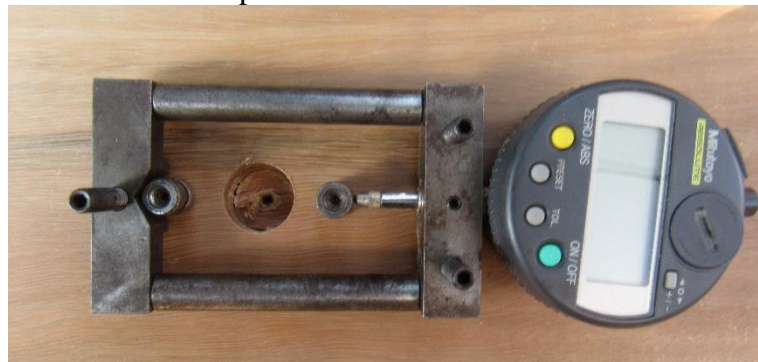
Em que: **1** = arco de pua; **2** = gabarito para fixação; **3** = pino para fixação dos pinos metálicos; **4** = pé de cabra; **5** = pinos metálicos; **6** = relógio comparador; **7** = martelo; **8** = broca de 20 mm.

Figura 13 - Representação da medição das DTS.



Fonte: Do autor (2017).

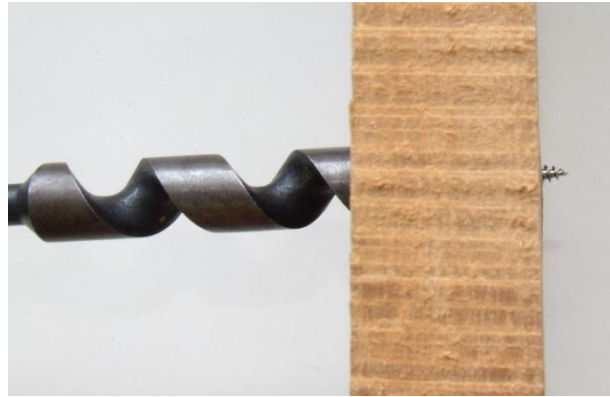
Figura 14 - Furo feito pelo extensômetro em uma tábua de madeira.



Fonte: Do autor (2017).

Como as medições visavam à avaliação das deformações das tensões totais apresentadas nas tábuas, a broca atravessou a tábua em sua espessura (FIGURA 15), não importando se fossem resultantes de tensões de compressão ou de tração.

Figura 15 - Processo da furação pela broca do extensômetro em uma tábua de madeira.



Fonte: Do autor (2017).

Durante a medição das DTS, para evitar a flexão e alteração das leituras no relógio, as tábuas foram apoiadas numa base metálica dividida em secções (FIGURA 16).

Figura 16 - Base metálica.



Fonte: Do autor (2017).

### 3.6 Análise estatística

Foi realizada a análise de variância (ANOVA) para as deformações resultantes das tensões de secagem (DTS), em delineamento experimental inteiramente casualizado a 5% de significância disposto em esquema fatorial  $2 \times 2 \times 3$ , para comparação das médias das DTS encontradas entre: árvores eretas e inclinadas; temperatura das tábuas quentes e resfriadas; tábuas sem e com acondicionamento a vapor; tábuas provenientes de lenho de tração e o lenho oposto. Para as variáveis que apresentaram diferenças significativas foi aplicado o teste de comparação de médias de Tukey, a 5% de significância.

O modelo estatístico utilizado é apresentado na Equação 10:

$$Y_{ijkn} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \alpha\beta_{ij} + \alpha\gamma_{ik} + \beta\gamma_{jk} + \alpha\beta\gamma_{ijk} + e_{ijkn} \quad (10)$$

Em que:

$Y_{ijkn}$  = valor observado para a variável em estudo referente à n-ésima repetição da combinação do i-ésimo nível do fator A com o j-ésimo nível do fator B e com o k-ésimo nível do fator C;

$\mu$  = média geral;

$\alpha_i$  = efeito do i-ésimo nível do fator A no valor observado  $Y_{ijkn}$ ;

$\beta_j$  = efeito do j-ésimo nível do fator B no valor observado  $Y_{ijkn}$ ;

$\gamma_k$  = efeito do k-ésimo nível do fator C no valor observado  $Y_{ijkn}$ ;

$\alpha\beta_{ij}$  = efeito da interação do i-ésimo nível do fator A com o j-ésimo nível do fator B;

$\alpha\gamma_{ik}$  = efeito da interação do i-ésimo nível do fator A com o k-ésimo nível do fator C;

$\beta\gamma_{jk}$  = efeito da interação do j-ésimo nível do fator B com o k-ésimo nível do fator C;

$\alpha\beta\gamma_{ijk}$  = efeito da interação do i-ésimo nível do fator A com j-ésimo nível do fator B e com o k-ésimo nível do fator C;

$e_{ijkn}$  = erro associado à observação  $Y_{ijkn}$ .

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização do material

As características dendrométricas, ângulo da inclinação e as densidades básicas das madeiras de cada árvore, ereta e inclinada, de *Corymbia citriodora*, encontram-se apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Características dendrométricas, ângulo da inclinação e densidade básica das árvores de *Corymbia citriodora* abatidas aos 60 anos de idade.

Árvore	D <sub>1,30m</sub> (cm)	Altura comercial (m)	Ângulo de Inclinação (°)	Db (g.cm <sup>-3</sup> )
Ereta 1	45,19	19	0	0,820
Ereta 2	35,49	19	0	0,826
Ereta 3	60,79	23	0	0,829
Inclinada 1	60,31	19	8,11	-
Inclinada 2	42,65	13	8,67	-
Inclinada 3	45,51	19	14,67	-

Em que: **D**<sub>1,30m</sub> = diâmetro a 1,30 metros; **Db** = densidade básica.

A madeira de *Corymbia citriodora* (TABELA 4) foi considerada madeira de alta densidade básica, apresentando valor médio igual a 0,820 g.cm<sup>-3</sup>. Por essa razão, foi encontrada baixa umidade inicial, de aproximadamente 49%. Esses valores foram semelhantes aos encontrados por Susin (2012) para a mesma espécie, aos 40 anos de idade.

É importante considerar que a madeira com densidade elevada apresentou baixo valor de máximo teor de umidade (MTU) calculado, de aproximadamente 48%. Madeiras de alta densidade contêm menor massa de água livre e maior massa de água de adsorção, em comparação às madeiras de baixa densidade. Normalmente, madeiras mais densas apresentam secagem mais lenta, demandando maior tempo para alcançar a condição seca.

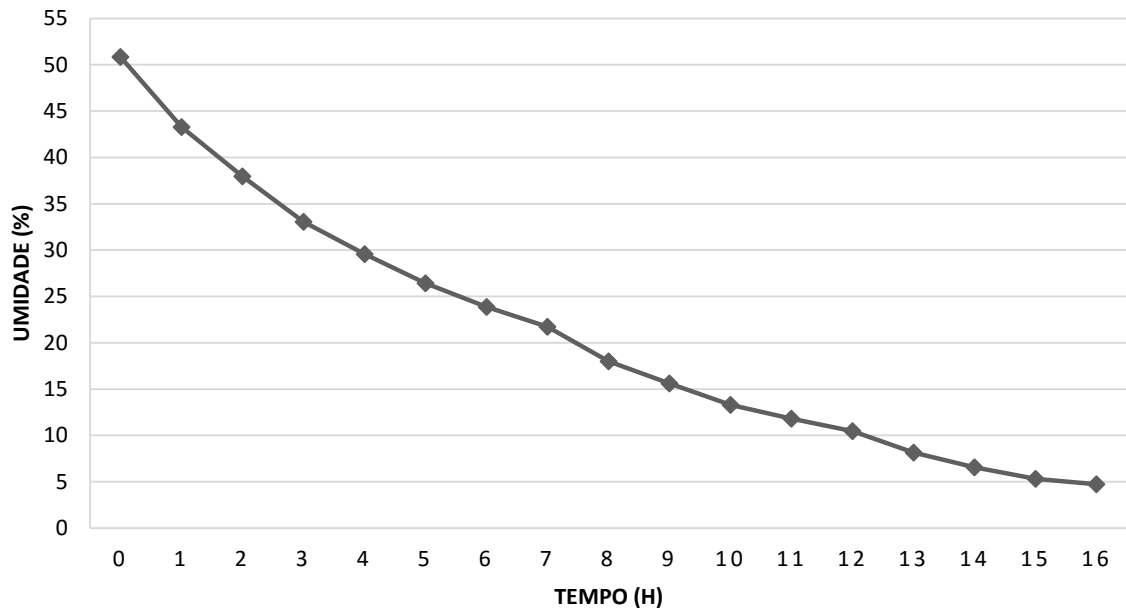
### 4.2 Elaboração do programa de secagem para *Corymbia citriodora*

#### 4.2.1 Curva de secagem drástica

O comportamento da umidade das amostras em função do tempo quando submetidas à secagem drástica a 100°C está ilustrado na Figura 17.



Figura 17 - Curva de secagem das amostras de 100 x 50 x 10 mm (comprimento, largura e espessura) de *Corymbia citriodora*.



Fonte: Do autor (2017).

Não foi possível observar na Figura 16 a fase de queda brusca da umidade média das amostras no início da secagem. Isso pode ter ocorrido em função da baixa umidade inicial apresentada pela madeira de *Corymbia citriodora*. Contudo, em madeiras com baixa densidade básica, sabe-se que na fase inicial do processo de secagem normalmente ocorre maior taxa de secagem por causa da saída da água livre, que se movimenta com mais facilidade (SANTINI e HASELEIN, 2002; KLITZKE, 2003).

#### 4.2.2 Variáveis para elaboração do programa de secagem

As médias das variáveis obtidas no ensaio da secagem drástica, que foram utilizadas na determinação dos parâmetros para a elaboração do programa de secagem para madeira de *Corymbia citriodora*, encontram-se apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Médias das variáveis encontradas no ensaio de secagem drástica para *Corymbia citriodora*.

Espécie	Tempo de secagem (h)			Taxa de secagem (g.cm <sup>2</sup> .h <sup>-1</sup> )			Rachaduras (escore)		
	T <sub>5%</sub>	T <sub>30%</sub>	T <sub>30→5%</sub>	TS <sub>5%</sub>	TS <sub>30%</sub>	TS <sub>30→5%</sub>	R <sub>5%</sub>	R <sub>30%</sub>	R <sub>30→5%</sub>
<i>C. citriodora</i>	14,80	3,60	11,20	0,0130	0,0344	0,0062	2	4	2

Observa-se na Tabela 5 que o tempo necessário para a madeira perder água da umidade inicial até 5% foi de 14,8 horas. Esse valor foi menor do que 27,2 horas ( $T_{5\%}$ ) encontrado por Susin (2012) para a mesma espécie, com 40 anos de idade. Isto pode estar relacionado às características da madeira que influenciam na secagem como: fatores de crescimento, propriedades físicas, variabilidade dentro da espécie ou até mesmo a posição de amostragem dentro da árvore.

Para que as amostras alcançassem 30% de umidade a partir da umidade inicial, foram necessárias 3,6 horas. Esse tempo é menor do que aquele necessário para secar as amostras entre 30% e 5% de umidade. No  $T_{30\%}$  ocorreu saída da água livre existente na madeira, que pode ser mais facilmente removida, em comparação com a água de adsorção. Além disso, como o material analisado é de alta densidade, havia nas amostras pouca massa de água livre a ser removida em relação à massa de água de adsorção. Observou-se que o  $T_{30\rightarrow 5\%}$  foi responsável pela maior parte do tempo total utilizado no processo de secagem, com 11,20 horas. Esse foi o tempo necessário para a remoção da água de adsorção, que exige mais energia do que para a remoção da água livre.

A taxa de secagem da umidade inicial até 30% ( $TS_{30\%}$ ) foi de  $0,0344 \text{ g.cm}^{-2}.\text{h}^{-1}$ , maior do que a taxa de secagem da umidade de 30% até 5% ( $TS_{30\rightarrow 5\%}$ ), que foi de  $0,0062 \text{ g.cm}^{-2}.\text{h}^{-1}$ , sendo semelhante às encontradas por Susin (2012) para  $TS_{30\%}$  e  $TS_{30\rightarrow 5\%}$ , respectivamente, para *C. citriodora* com 40 anos de idade. Essa diferença deve-se à facilidade ou dificuldade da retirada da água livre e de adsorção. Os valores da taxa de secagem apresentados na Tabela 5 são próximos aos encontrados por autores que elaboraram programas de secagem para madeiras de *Eucalyptus* (ELEOTÉRIO et al., 2015; SOARES et al., 2016).

Na Tabela 5 pode-se observar que a incidência de rachaduras nas amostras foi maior na fase inicial da secagem ( $R_{30\%}$ ) comparado com a fase final ( $R_{30\rightarrow 5\%}$ ). Esse resultado é compreensível, uma vez que a incidência de rachaduras geralmente ocorre no início da secagem, acima do PSF, pois as camadas mais externas das peças encontram-se sob contração, ocasionando rupturas no tecido xilemático (SIMPSON, 1991). O índice de rachaduras  $R_{5\%}$  foi menor que o  $R_{30\%}$ . Isto pode estar relacionado com a reversão das tensões de secagem nas mudanças de fases. Assim, pequenas rachaduras que surgiram no início da secagem drástica, quando as amostras estavam sob tração, nas camadas externas, deixaram de ser visíveis quando a madeira atingiu 5% de umidade. Este fato provavelmente ocorreu porque as camadas externas estavam sob compressão nesta fase, fazendo com que o índice de rachaduras geral ( $R_{5\%}$ ) fosse menor em comparação com o índice  $R_{30\%}$ .

A madeira de *Corymbia citriodora* não apresentou colapso. É compreensível que madeiras com alta densidade básica, com parede celular mais espessa como é o caso da madeira de *C. citriodora*, resistam às tensões geradas pela saída da água livre, não sofrendo, portanto o colapso. Sabe-se que o colapso se manifesta pela tensão capilar, quando as tensões superam a resistência das fibras na fase inicial da secagem na saída da água livre, o que é mais fácil de ocorrer em madeiras de baixa densidade básica (JANKOWSKY; GALVÃO, 1988).

#### **4.2.3 Parâmetros para elaboração do programa de secagem**

Os parâmetros do programa de secagem determinados para a madeira de *Corymbia citriodora*, a partir das variáveis do ensaio da secagem drástica (EQUAÇÕES 7, 8 e 9) foram de 40°C e 60°C para temperaturas inicial e final, respectivamente, e de 2,1 para o potencial de secagem. Estes resultados foram semelhantes aos encontrados por Susin (2012) para madeira da mesma espécie. A partir destes resultados, observa-se que o comportamento de secagem de madeiras do gênero *Corymbia* mostraram-se semelhantes às madeiras do gênero *Eucalyptus*. Já para a madeira de *Corymbia torelliana*, Eleotério et al. (2015) encontraram valores médios de temperatura inicial igual a 47°C, temperatura final igual a 71°C e potencial de secagem igual a 2,44.

#### **4.2.4 Programa de secagem**

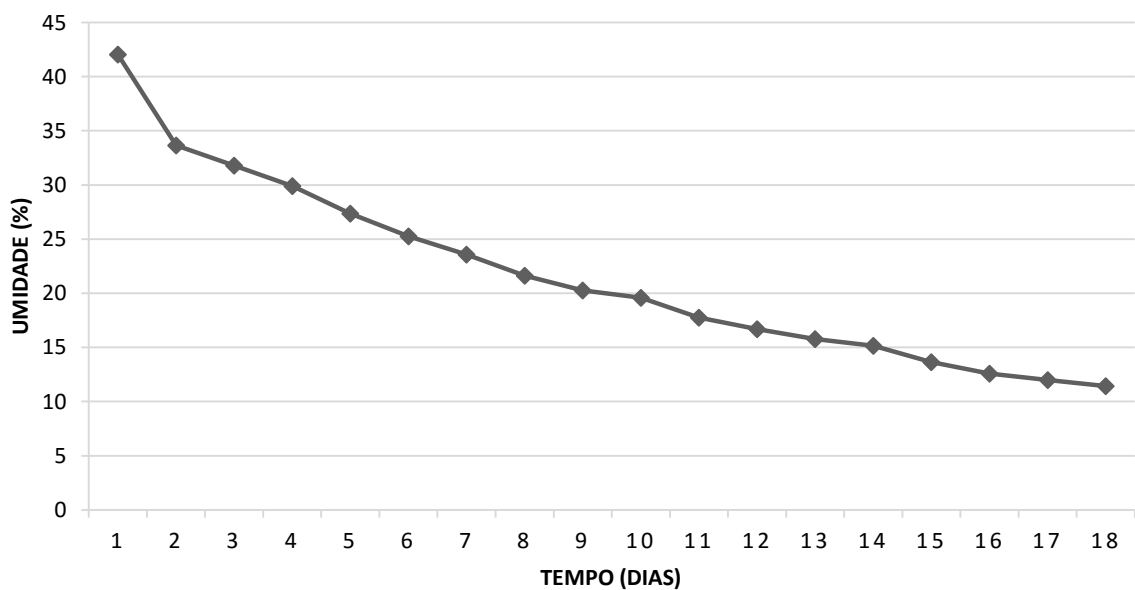
O programa de secagem elaborado e empregado na secagem convencional da madeira de *Corymbia citriodora* encontra-se na Tabela 6. Ele foi elaborado com auxílio das cartas psicrométricas para a determinação da umidade relativa do ar, umidade de equilíbrio da madeira e temperatura de bulbo úmido, tomando por base os parâmetros de temperatura de bulbo seco e o potencial de secagem. Foram empregados aumentos gradativos nas temperaturas e leves reduções da umidade desejada para a madeira em cada etapa da secagem convencional.

Tabela 6 - Programa de secagem para madeira de *Corymbia citriodora* com até 30 mm de espessura.

Etapas	Temperatura (°C)		Umidade (%)		Potencial de secagem
	Bulbo seco	Bulbo úmido	Relativa	Equilíbrio	
Aquecimento	40,0	39,5	97	23,6	-
Ui a 40%	40,0	38,5	91	19,0	2,1
40% a 35%	44,0	41,0	83	16,6	2,1
35% a 30%	48,0	44,0	80	14,0	2,1
30% a 25%	52,0	46,0	71	12,0	2,1
25% a 20%	56,0	47,0	60	9,5	2,1
20% a 15%	60,0	47,0	49	7,0	2,1
15% a 10%	65,0	46,0	35	5,0	2,1
Uniformização	65,0	57,0	67	10,0	-
Acondicionamento	65,0	59,0	74	12,0	-

### 4.3 Secagem convencional

Na Figura 18, é possível observar o comportamento da perda de umidade da madeira de *Corymbia citriodora* em função do tempo, submetida à secagem convencional. A curva de secagem registra o histórico da secagem desde seu estado verde até seu estado de equilíbrio, acompanhada com as amostras controladoras de umidade. Observa-se que a curva de secagem seguiu o comportamento típico.

Figura 18 - Curva de secagem convencional em estufa para madeira de *Corymbia citriodora*.

Fonte: Do autor (2017).

No início da secagem, o material apresentava umidade inicial de 44,4%, necessitando de 18 dias para atingir a umidade final desejada, próxima a 12%. A umidade final média foi de 11,4%.

O programa de secagem empregado em madeira de *Corymbia citriodora* possibilitou secagem considerada rápida. Possivelmente isso pode estar relacionado à baixa umidade inicial e também a fatores metodológicos como o tipo de estufa e a característica do programa de secagem (Etapas). No trabalho de Susin (2012), foram secas tábuas de *C. citriodora*, necessitando de 27 dias para alcançar a umidade desejada. Rosso (2006), em secagem da madeira da mesma espécie, necessitou de 27 dias ao ar livre, seguido de mais 13 dias em secagem convencional até a umidade desejada.

Além disso, outro aspecto que deve ser levado em consideração é o fato de que na secagem em estufa foram usadas tábuas provenientes de árvores eretas e inclinadas numa mesma condição de secagem. Assim, o lenho de tração pode ter influenciado na taxa de secagem, uma vez que essas madeiras apresentam propriedades diferenciadas, como por exemplo, a densidade que influencia na taxa de secagem. Green et al. (1999) não recomendam a secagem conjunta de peças provenientes de árvores eretas e inclinadas, pois as propriedades físicas, químicas e mecânicas da madeira normal diferem dos lenhos de tração e oposto.

#### **4.4 Avaliação das deformações decorrentes das tensões de secagem (DTS) em tábuas por extensometria**

Na Tabela 7 estão apresentados os valores da análise de variância (ANOVA) da DTS em função da etapa da secagem (pós-secagem e pós-acondicionamento a vapor), da temperatura das tábuas (quente e fria) e do lenho (lenho de tração e lenho oposto). Foi possível inferir que apenas a temperatura das tábuas apresentou diferença significativa entre os tratamentos, pelo teste F, a 95% de probabilidade. O coeficiente de variação dos dados foi de 37,6%.

Tabela 7 - Resumo da análise de variância das deformações resultantes das tensões de secagem (DTS) em função dos fatores.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado médio	F <sub>Calculado</sub>
Etapa da secagem	1	0,008	0,146 <sup>ns</sup>
Temperatura	1	1,444	25,064*
Lenho	2	0,137	2,377 <sup>ns</sup>
Etapa * Temperatura	1	0,040	0,699 <sup>ns</sup>
Etapa * Lenho	2	0,054	0,941 <sup>ns</sup>
Temperatura * Lenho	2	0,064	1,112 <sup>ns</sup>
Etapa * Temperatura * Lenho	2	0,038	0,668 <sup>ns</sup>
Erro	35	0,058	
Total corrigido	46		

ns = não significativo e \* = significativo, a 95% de probabilidade.

#### 4.4.1 DTS em tábuas de árvores eretas e de árvores inclinadas

Os valores das deformações resultantes das tensões de secagem (DTS) em tábuas quentes de *Corymbia citriodora*, medidos com o extensômetro, pós-secagem encontram-se descritos na Tabela 8.

Tabela 8 - Deformações resultantes das tensões de secagem (DTS) em tábuas quentes de *Corymbia citriodora*, pós-secagem.

Árvore	Deformações resultantes das tensões de secagem		
	Média (µm)	Desvio padrão (µm)	Coefficiente de Variação (%)
Ereta	24	5,0	21
Inclinada	25	8,0	32

Para DTS obtidas nas tábuas das árvores eretas quando quentes, foi encontrada média de 24 µm, enquanto, que para as árvores inclinadas foram encontradas valores médios de DTS igual a 25 µm. As médias das deformações para as duas classes de árvores foram próximas, quando se esperava comportamento diferente, uma vez que as árvores inclinadas apresentaram maiores DRL pela formação de lenho de tração (Abreu Junior et al., 2017), o que poderia resultar em diferenças na DTS, devido à natureza distinta das madeiras.

Considerando as tábuas das seis árvores, os valores de DTS foram menores que os valores de DRL encontrados por Sánchez et al. (2017), em tábuas verdes, que variaram entre 0 a 51 µm, uma vez que, possivelmente durante o processamento da madeira as tensões de crescimento e residuais foram se liberando pela formação de rachaduras e deformações.

De acordo com a análise de variância das DTS, entre as tábuas das árvores eretas e das árvores inclinadas não foi observada diferença significativa. O processo de secagem pode ser responsável por esse resultado, pois, empregando programas de secagem suaves, reduzindo a formação de defeitos em função da não formação de elevados gradientes de umidade. Mesmo tendo essa vantagem, a secagem lenta implica a remoção da água mais controlada.

Sánchez et al. (2017) também empregaram o extensômetro utilizado no presente estudo, analisaram as deformações residuais longitudinais após o processamento mecânico da madeira, em tábuas verdes das mesmas árvores usadas neste trabalho, encontrando valores médios de DRL igual a 20  $\mu\text{m}$ . Esse valor pode estar associado aos valores das DTS.

#### 4.4.2 Efeito da temperatura das tábuas nas DTS

Os valores de deformações resultantes das tensões de secagem (DTS) medidas com o extensômetro após a secagem, nas tábuas de *Corymbia citriodora* após resfriamento até a temperatura ambiente estão apresentados na Tabela 9. Foi possível encontrar diferenças significativas, sendo que para as tábuas quentes das árvores avaliadas foi obtido valor médio de DTS igual a 27  $\mu\text{m}$ , resultando em coeficiente de variação igual a 29%. Este valor foi maior que aquele encontrado nas tábuas resfriadas, que, em média, foi de 15  $\mu\text{m}$ , com coeficiente de variação de 54%

Tabela 9 - Valores médios das deformações resultantes das tensões de secagem (DTS) em tábuas quentes e tábuas após resfriamento até a temperatura ambiente de *Corymbia citriodora*.

Tratamento	Deformações resultantes das tensões de secagem		
	Média ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão ( $\mu\text{m}$ )	Coefficiente de Variação (%)
Tábuas quentes	27	7,5	29
Tábuas frias	15	7,9	54
F calculado	25,064*		

\* = significativo a 95% de probabilidade.

Os resultados das DTS medidas com o extensômetro são diferentes dos encontrados por autores que mediram as deformações resultantes das tensões de secagem com o teste do garfo em madeira de *Eucalyptus*, portanto podem ser de possível comparação. Santos (2002) na secagem combinada em madeira de *E. grandis*, observou 75% das tábuas tensionadas, após 48 horas do processo final de avaliação. Com o mesmo método Rosso (2006) em *E. grandis*, *E. citriodora* e *E. saligna*, observaram apenas 25% das peças com tensões leves para *E. grandis*, enquanto que nas tábuas das outras árvores resultaram em tensões fortes, após

24 horas do processo final de avaliação. É aceitável que madeira sem acondicionamento tenha elevadas tensões de secagem.

#### 4.4.3 Efeito do acondicionamento em vapor das tábuas nas DTS

Na Tabela 10, observa-se os valores médios das deformações resultantes das tensões de secagem (DTS), obtidas com o extensômetro em tábuas quentes e após o acondicionamento.

Tabela 10 - Deformações resultantes das tensões de secagem (DTS) em madeira quente de *Corymbia citriodora* após acondicionamento a vapor.

Árvore	Deformações resultantes das tensões de secagem		
	Média ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão ( $\mu\text{m}$ )	Coefficiente de Variação (%)
Ereta	30	4,0	12
Inclinada	25	8,4	33

Nota-se na Tabela 10 que nas tábuas quentes das árvores eretas pós-acondicionamento obteve-se valores médios de DTS igual a 30  $\mu\text{m}$ . Para as árvores inclinadas foi obtida média de DTS igual a 25  $\mu\text{m}$ , próximo ao encontrado nas árvores eretas. Possivelmente, os valores das médias de deformação das tábuas foram próximos aos resultados da secagem lenta, com sequências de temperaturas leves. Porém, pode-se considerar que o programa empregado foi adequado, uma vez que as tábuas não se apresentaram tensionadas.

Estudando as tensões de secagem em madeira de *Chlorophora excelsa* e *Millettia* spp após o acondicionamento com vapor utilizando sensores de tensão, Allegretti e Ferrari (2008) explicaram que, assim que a madeira ganha umidade pelo acondicionamento a vapor, a umidade da peça se homogeneiza, diminuindo então os gradientes de umidade que, consequentemente, alivia as tensões de secagem. Este resultado corrobora com a diminuição das DTS encontradas neste trabalho pós-acondicionamento (Tabela 11).

Assim que as tábuas foram esfriadas até a temperatura ambiente, após seis horas de acondicionamento em vapor, foram medidas as DTS, que estão dispostas na Tabela 11.

Tabela 11 - Deformações resultantes das tensões de secagem (DTS) em tábuas de *Corymbia citriodora* resfriadas até temperatura ambiente, após o acondicionamento a vapor.

Árvore	Deformações resultantes das tensões de secagem		
	Média ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão ( $\mu\text{m}$ )	Coefficiente de Variação (%)
Ereta	16	8,40	33
Inclinada	14	7,42	57



Quanto às DTS, não houve diferença estatística entre as tábuas com e sem acondicionamento em vapor (TABELA 7). A média das DTS nas tábuas frias das árvores eretas acondicionadas em vapor foi igual a 16  $\mu\text{m}$ , resultando em coeficiente de variação igual a 33% (TABELA 11). Esses valores foram menores que os encontrados nas tábuas quentes (Tabela 10). Para as tábuas das árvores inclinadas, obteve-se média igual a 14  $\mu\text{m}$ , resultando em um coeficiente de variação igual a 57%, menor do que o encontrado nas tábuas quentes pós-acondicionamento em vapor (25  $\mu\text{m}$ ).

Nas DTS médias encontradas nas tábuas frias após o acondicionamento a vapor e esfriamento, ocorreu o alívio das tensões de secagem e, conseqüentemente, menor intensidade de deformações. Rozas Mellado (1993) afirmou que mesmo quando os gradientes de umidades são pequenos ocorre formação de tensões de secagem nas tábuas. A redução das DTS a partir do acondicionamento em vapor das tábuas foi semelhante ao encontrado por Barrientos (2003), que trabalhou com tensões de secagem em *Pinus radiata*, com medições pós-acondicionamento e 48 horas após a primeira leitura.

O programa de secagem convencional empregado e o acondicionamento em vapor por 6 horas na madeira de *Corymbia citriodora* resultaram no alívio das tensões de secagem e redução das deformações, corroborando com Simpson (1976), Aguiar; Perré (2005) e Calonego et al. (2005). Nas tábuas provenientes das árvores eretas foram obtidas as maiores médias de DTS. Esse comportamento foi igual ao observado em todas as variáveis estudadas.

#### 4.4.4 DTS no lenho de reação de árvores inclinadas

Na Tabela 12 estão apresentadas as médias das deformações obtidas nas tábuas quentes e frias após a secagem e após o acondicionamento em vapor das árvores inclinadas que formam lenho de tração e lenho oposto.

Tabela 12 - Valores médios das deformações resultantes das tensões de secagem em tábuas obtidas de árvores inclinadas de *Corymbia citriodora*.

Lenho	Deformações resultantes das tensões de secagem		
	Média ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão ( $\mu\text{m}$ )	Coeficiente de variação (%)
Oposto	21	11	53
Tração	17	9,1	52
F calculado	2,377 <sup>ns</sup>		

ns = não significativo a 95% de probabilidade.

Como é possível observar na Tabela 12, as tábuas provenientes do lenho oposto apresentaram valores médios de DTS igual a 21  $\mu\text{m}$ , com coeficiente de variação de 53%, maior que as médias das DTS encontradas no lenho de tração de 17  $\mu\text{m}$ , com coeficiente de variação igual a 52%. Observou-se que o lenho oposto resultou em maior média de deformação nas duas etapas da secagem.

As DTS nas árvores inclinadas não diferiram estatisticamente entre o lenho de tração e o lenho oposto (TABELA 7). Esperava-se que o lenho de tração fosse superior nas DTS que o lenho oposto, uma vez que as madeiras apresentam características diferentes, que também podem interferir nos resultados durante a secagem (GREEN et al., 1999; TARMIAN et al., 2009). Porém, na secagem de madeira com essas características, poderia se esperar resultados não padronizados para as DTS, pois, como afirmam Ruelle et al. (2007), madeiras com essas características não seguem um padrão definido.

## 5 CONCLUSÃO

A secagem convencional da madeira de *Corymbia citriodora* foi concluída em 18 dias para a umidade final desejada de 12%.

O programa de secagem elaborado e empregado foi baseado em temperatura inicial de 40°C, temperatura final de 65°C e potencial de secagem de 2,1.

Nas deformações decorrentes das tensões de secagem (DTS) das tábuas quentes e das tábuas resfriadas foram identificadas diferenças estatísticas significativas, a 95% de probabilidade. Na secagem, no acondicionamento a vapor e nos diferentes lenhos não foram identificadas diferenças estatísticas.

Na fase pós-secagem das tábuas foram observadas as maiores médias de DTS.

As menores DTS ocorreram após o resfriamento até a temperatura ambiente.

Após o acondicionamento a vapor por seis horas, as DTS foram baixas. Portanto, considera-se que o acondicionamento a vapor foi adequado no alívio das tensões de secagem, uma vez que as tábuas não se encontravam com fortes tensões de secagem, no final do processo de secagem.

As DTS foram menores no lenho de tração que no lenho oposto.

O extensômetro mostrou-se viável e de fácil medição das DTS, com potencialidade para ser empregado na avaliação das tensões de secagem e podendo ser utilizado em processos industriais de secagem.

## REFERÊNCIAS

- ABREU JÚNIOR, Á. A. et al. Deformações residuais longitudinais em árvores de *Corymbia citriodora* propensas à formação de lenho de tração. In: III CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA, Florianópolis. 2017.
- AGUIAR, O. J. R.; PERRÉ, P. **Wood accelerating drying process based on its rheological properties**. U.S. Patent No. 6910284B2, 28 jun. 2005.
- ALLEGRETTI, O.; FERRARI, S. A. Sensor for direct measurement of internal stress in wood during drying: experimental tests toward industrial application. **Drying Technology**, v. 26, n.9, p. 1150-1154, 11 ago. 2008.
- ANANÍAS, R. A. et al. Estudio experimental del secado a temperaturas convencionales de Acacias. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v. 10, n. 2, p. 151-162, 12 jul. 2008.
- ANDRADE, A. **Indicação de programas de secagem convencional de madeiras**. 2000. 72 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.
- BADIA, M. A. et al. Assessment of tension wood detection based on shiny appearance for three poplar cultivars. **Forest Science**, v. 62, n. 1, p. 43-49, jan.-feb. 2005.
- BARBOSA, C. G. et al. Elaboração de programas de secagem para madeira de clones de híbridos de *Eucalyptus spp.* **Cerne**, v. 11, n. 1, p. 40-48, jan.-mar. 2005.
- BARBOSA, C. G. **Incidência dos defeitos de secagem como índice de qualidade e de seleção genética para madeira de *Eucalyptus***. 2003. 71 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.
- BARRIENTOS, D. A. C. **Efecto del vaporizado final en las tensiones de la madera aserrada, en *Pinus radiata***. 2003. 44 p. TCC (Ingeniero en Madera) – Universidad Austral de Chile, Valdivia, 2003.
- BATISTA, D. C. **Qualidade da secagem convencional conjunta da madeira de nove clones do gênero *Eucalyptus***. 2009. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- BATISTA, D. C.; KLITZKE, R. J.; ROCHA, M. P. Qualidade da secagem convencional conjunta da madeira de clones de três espécies de *Eucalyptus* sp. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 3, p. 711-719, jul.-set. 2015.
- BATISTA, D. C.; KLITZKE, R. J.; SANTOS, C. V. T. Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 4, p. 665-674, out.-dez. 2010.
- BODIG, J.; JAYNE, B. A. Mechanics of wood and wood composites. **Krieger Publishing Company**, Florida, ed. 2, p. 712, mai. 1993.
- BRANDÃO, A. T. O. **Determinação de metodologia para a indicação de programas de secagem de madeiras**. 1989. 100 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.

CALONEGO, F. W.; SEVERO, E. T. D.; ASSI, P. P. Mensuração do comprimento das fibras para a determinação da madeira juvenil em *Eucalyptus citridora*, **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 68, p. 113-121, 01 ago. 2005.

CAMPBELL, G. S.; HARTLEY, J. Drying and dried wood. In: HILLIS, W. E. & BROWN, A. G. *Eucalyptus for Wood Production*. Austrália: **Academic Press**, p. 322-7, 1978.

CARVALHO, A. M. et al. Correlações da altura e diâmetro com tensões de crescimento em árvores de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla*. **Revista Árvore**, Viçosa - MG, v. 34, n. 2, p. 323-331, 2010.

CARVALHO, A. Madeiras Portuguesas: estrutura anatômica, propriedades e utilizações. **Direção-geral das Florestas**, Lisboa, v. 1, 1996.

CHAFE, S. C. Effect of brief presteaming on shrinkage, collapse and other wood-water relationships in *Eucalyptus regnans*. **Wood science and technology**, v. 24, n. 4, p. 311-326, out. 1990.

CHRISTENSEN, F. J. Recent research on the high temperature drying of sawn *Eucalyptus delegatensis* below fibre saturation point. In: **For. Prod. Res. Conf.** v. 21, 1984.

CINIGLIO, G. **Avaliação da Secagem de Madeira Serrada de *E. grandis* e *E. uruphylla***. 1998. 69 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeira) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

ČUNDERLIK, I.; MOLÍŃSKI, W.; RACZKOWSKI, J. The monitoring of drying cracks in the tension and opposite wood by acoustic emission and scanning electron microscopy methods. **Holzforschung International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood**, v. 50, n. 3, p. 258-262, jan. 1996.

DAVIS, C. P.; CARRINGTON C. G.; SUN Z. F. The influence of compression wood on the drying curves of *Pinus radiata* in dehumidifier conditions. **Drying Technology: An International Journal**, v. 20, n. 10, p. 2005–2026, feb. 2007.

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**, p. 138, set. 2000.

DINWOODIE, J. M. Growth stresses in timber - a review of European investigations. **International union of forestry research organizations - iufro meeting seccion**, IUFRO; CSIRO, Melbourne, v. 41, p. 10, 1965.

DONALDSON, L. A; GRACE; J.; DOWNES, G. M. Within-tree variation in anatomical properties of compression wood in *radiata pine*. **IAWA Journal**, v. 25, n. 3, p. 253–271, jan. 2004.

ELEOTÉRIO, J. R. et al. Secagem drástica de madeiras de *Eucalyptus* e *Corymbia* fornece informações para a elaboração de programas de secagem. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 84, p. 451-457, dez. 2015.

ENGELUND, E. T. et al. A Critical discussion of the physics of wood-water interactions. **Wood Science and Technology**, New York, v. 47, n. 1, 141 - 161, jan. 2013.

- FERNANDES, P. S.; GALVÃO, A. P. M. Gradiente de umidade em peças de jatobá (*Hymenaea stilbocarpa* Hayme). **Silvicultura em São Paulo**, São Paulo, v. 11/12, p. 87-92, 1978.
- GREEN, D. W.; WINANDY, J. E.; KRETSCHMANN, D. E. Mechanical Properties of Wood. In: Wood handbook - Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113. Madison, W. I.: U.S. **Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory**, Cap 4, 1-45, 1999.
- HART, C. A. **The drying of wood**. Raleigh: North Caroline Agricultural Extension Service, p. 24, 1966.
- HARTLEY, J.; GOUGH, D. K. Future sawnood drying in Australia. **FDC**, v. 181, n. 94, p. 179-190, 1990.
- 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...** Piracicaba: IPEF/IPT, 1995. 109-118p.
- JANKOWSKY, I. P.; GALVÃO, A. P. M. Secagem Racional da Madeira, **Nobel**, São Paulo, 1988.
- JANKOWSKY, I. P.; SANTOS, G. R. V. Drying behavior and permeability of *Eucalyptus grandis* lumber. **Maderas, Ciencia y Tecnología**, concepción, v. 7, n. 1, p. 17-21, 2005.
- JANKOWSKY, I. P.; SANTOS, G. R. V.; ANDRADE, A. Secagem da madeira serrada de eucalipto. **Circular Técnica do IPEF**, Piracicaba, n. 199, p. 1-14, dez. 2003.
- JUACIDA, R.; INZUNZA, L.; BARRIA, C. Efecto del vaporizado inicial en el secado artificial de madera de coigüe de Magallanes (*Nothofagus betuloides*). **Bosque (Valdivia)**, v. 26, n. 3, p. 81-86, dez. 2005.
- KLITZKE, R. J. **Manual de secagem de madeira**. Apostila técnica. p. 119. 2005.
- KLITZKE, R. J. **Secagem da madeira**. Curitiba: UFPR, p. 98, 2003.
- KOBAYASHI, A. Handbook on Experimental Mechanics. **Englewood Cliffs**, NJ, Prentice-Hall Inc., 1987, 1020, 1987.
- KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A. Principles of wood science and technology. **Berlin: Springer-Verlag**, v. 1, p. 592, 1968.
- LAERMANN, K. H. Reliable evaluation of measured data—an inverse problem. In: Juptner W, Osten W, editors. Fringe 2001. Proceedings of the fourth International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, Paris: **Elsevier Science Publishing**, 200. p. 443-450.
- LIMA, J. T. et al. Deformações residuais longitudinais decorrentes de tensões de crescimento em *Eucalyptus* e suas associações com outras propriedades. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 107-116, feb. 2004.

- LIMA, J. T. et al. Deformações residuais longitudinais em *Eucalyptus sp.* e *Corymbia sp.* In: II CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA - Belo Horizonte - 20 a 22 set 2015.
- MACKAY, J. F. G. Influence of steaming on water vapor diffusion in hardwoods. **Wood Science**, v. 3, n. 3, p. 156- 160, 1971.
- MARTINS, V.A. **Secagem de madeira serrada**. Brasília: Ministério da agricultura IBDF/LPF, 1988. 89p.
- MCMILLEN, J. M. Drying stresses in red oak. **Forest Prod. J.**, v. 5, n. 1, p. 71–76, 1955.
- MCMILLEN, J. M. et al. **Stresses in wood during drying**. Madison, Wis.: US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1958.
- MENDES, A. S.; MARTINS, V. A.; MARQUES, M. H. B. Programas de secagem para madeiras brasileiras. Brasília: **IBAMA**, p. 114, 1998.
- MONTEIRO, T. C. et al. Influência do lenho de tração nas propriedades físicas da madeira de *Eucalyptus sp.* **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 1, n. 1, p. 6-11, nov. 2010.
- OLIVEIRA, J. T. S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. 1998. 429 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- OLIVEIRA, L. C. S. **Perguntas e respostas em secagem de madeiras**. São Paulo: IPT, p. 36, 1981.
- PEREZ, P.; ANANÍAS, R. A.; HERNANDEZ, G. Estudio experimental del secado de renovales de canelo *Drimys winteri*. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 9, n. 1, p. 59-70, jan. 2007.
- PONCE, R. H.; WATAI, L. T. **Manual de secagem da madeira**. Brasília: STI/IPT, p. 72, 1985.
- PRATT, G. H. **Timber drying manual**. London: Department of the Environment, Building Research Establishment, p. 152, 1974.
- RASMUSSEN, E. F. **Dry Kiln: Operator's Manual**. USDA, Madison, 1968.
- RASMUSSEN, E. F. **Dry Kiln: Operator's Manual**. USDA, Madison. 1961.
- REZENDE, R. N. et al. Efeito da vaporização na secagem de tábuas de *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, v. 21, n. 1, p. 37-41, 2015.
- RODRIGUES, E. A. C. et al. Seleção de clones de *Eucalyptus* para as propriedades físicas da madeira avaliadas em árvores no campo. **Cerne**, v. 14, n. 2, p. 147-152, abr.-jun. 2008.
- ROSEN, H. N. Recent advances in the theory of drying lumber. In: IUFRO DIVISION CONFERENCE, 5, 1983, **Madison. Proceedings: wood drying working party. Carbondale: Southern Illinois University, USDA**, p. 32-62, 1983.

- ROSSO, S. **Qualidade da madeira de três espécies de *Eucalyptus* resultante da combinação dos métodos de secagem ao ar livre e convencional.** 2006. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Florestal, Departamento de Centro de Ciências Naturais, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Maria, 2006.
- ROZAS MELLADO, E. C. E. **Contribuição ao desenvolvimento tecnológico para a utilização de madeira serrada de *Eucalyptus grandis* (Hill Ex. Maiden) na geração de produtos com maior valor agregado.** 1993. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal/Setor de Ciências Agrárias) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1993.
- ROZAS, C.; SANCHEZ, R.; PINEDO, P. Secado de *Eucalyptus Nitens* y *Globulus* y su Aprovechamiento en Blocks, Pisos y Muebles. **Maderas, Cienc. tecnol.**, Concepción , v. 7, n. 2, p. 109-120, ago. 2005.
- RUELLE, J. M. et al. Peculiar tension wood structure in *Laetia procera* (Poepp.) Eichl. (Flacourtiaceae). **Trees**, v. 21, n. 3, p. 345–355, feb. 2007.
- SÁNCHEZ, J. Y. C. S. Extensimetria aplicada à medição da deformação residual longitudinal em tábuas verdes de *Corymbia citriodora*. In: III CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA, 2017, Florianópolis.
- 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**, p. 15. (Série Técnica, 5), 1980.
- SANTINI, E. J. Métodos de secagem de madeira. In: I SEMINÁRIO SOBRE SECAGEM DE MADEIRA, 1. 1992, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM/CEPEF/FATE, p. 47-59; 1992.
- SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R. Efeito da temperatura e velocidade do ar sobre a taxa de secagem da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 2, p. 99-106. Out. 2002.
- SANTOS, G. R. V. dos. Curva característica de secagem para madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 63, p. 214- 220, jun. 2003.
- SANTOS, G. R. V. **Otimização da secagem da madeira de *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden).** 2002. 69 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- SIMPSON, W. T. **Dry kiln Operator's Manual.** Madison, Wisconsin, USA. USDA Forest Service. Agriculture Handbook, v. 188, 274 p, 1991.
- SIMPSON, W.T. Effect of presteaming on moisture gradient of Northern Red Oak during drying. **Wood Science**, v. 8, p. 156-159, 1976.
- SKAAR, C. J. **Water in wood.** Syracuse: Syracuse University, 1972.
- SOARES, B. C. D; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M. Analysing the drying behavior of juvenile and mature *Eucalyptus saligna* wood in drastic drying test for optimal drying schedule. **Maderas, Ciencia y Tecnología**, v. 18, n. 4, p. 543-554, 2016.



SOUSA, L. C. **Caracterização da madeira de tração em *Eucalyptus grandis* e sua influência na produção de polpa celulósica**. 2004. 93 p. Dissertação (Mestrado Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, 2004.

SOUZA, M. A. M. de et al. Deformação residual longitudinal e sua relação com algumas características de crescimento e da madeira em clones de *Eucalyptus*. **Revista Floresta**, v. 33, n. 3, p. 275-284, 2003.

STANGERLIN, D. M. et al. Uso de estufa solar para secagem de madeira serrada. **Ciência Florestal**, v. 19, n. 4, p. 461-472, out.-dez. 2009.

STEIN, F. da R. Avaliação técnica do tempo de estocagem da madeira. **Monografia Lato Sensu em tecnologia de celulose e papel**, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, feb. 2003.

SUSIN, Felipe. **Avaliação de programas de secagem para madeiras de eucalipto elaborados com base em testes prévios a alta temperatura**. 2012. 161 p. Tese de Doutorado. MS Thesis, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, 2012.

TARMIAN, A.; PERRÉ, P. Air permeability in longitudinal and radial directions of compression wood of *Picea abies* L. and tension wood of *Fagus sylvatica* L. **Holzforschung**, v. 63, n. 3, p. 352- 356, mai. 2009.

TARMIAN, A.; SEPEHR, A.; SHAHVERDI, M. Temperature evolution in poplar (*populus nigra*) tension wood and normal wood during a conventional drying process. **Notulae Scientia Biologicae**, v. 3, n. 3, p. 140, abr. 2011.

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

VERMAAS, H. F. Drying eucalypts for quality: Material characteristics, pre-drying treatments, drying, methods, schedules and optimization of drying quality. **South African Forestry Journal**, v. 174, n. 1, p. 41-49, nov. 1995.

WASHUSEN, R.; ADES, P.; VINDEN, P. Tension wood occurrence in *Eucalyptus globulus* Labill. I. The spatial distribution of tension wood in one 11-year-old tree. **Australian Forestry**, v. 65, n. 2, p. 120-126, 2002.

WEIK, B. R. et al. Practical drying techniques for yellow-poplar SDR flitches. **Forest products journal**, v. 34, n. 7-8, p. 39-44, 1984.

WILLIAMS, D. H. A comparison of rates of drying of “compression” and “Normal” 4 in. by 1 in. *P. radiata*. **NZ For. Res. Inst. Forest Product Report**, n. 303, 1971.

WRIGHT, G.W. Brief notes on moisture gradient, drying stress and movement on recutting. **Australia, For Prod J**, 1961.

ZEN, L. R. **Métodos combinados para secagem da madeira de Eucalyptus: pré-secagem ao ar livre com secagem em estufa convencional**. 2016. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal/Setor de Ciências Agrárias) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.