

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LINÉIA ROBERTA ZEN

**“MÉTODOS COMBINADOS PARA SECAGEM DA MADEIRA DE *Eucalyptus*: PRÉ-
SECAGEM AO AR LIVRE COM SECAGEM EM ESTUFA CONVENCIONAL”**

CURITIBA

2016

LINÉIA ROBERTA ZEN

**“MÉTODOS COMBINADOS PARA SECAGEM DA MADEIRA DE *Eucalyptus*: PRÉ-
SECAGEM AO AR LIVRE COM SECAGEM EM ESTUFA CONVENCIONAL”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Jorge Klitzke
Coorientador: Prof. Dr. Márcio Pereira da Rocha

CURITIBA
2016

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Zen, Linéia Roberta

Métodos combinados para secagem da madeira de eucalyptus: pré-secagem ao ar livre com secagem em estufa convencional / Linéia Roberta Zen. – Curitiba, 2016.

105 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Jorge Klitzke

Coorientador: Prof. Dr. Márcio Pereira da Rocha

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 25/02/2016.

Área de concentração: Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

1. Madeira – Secagem. 2. Madeira serrada. 3. Eucalipto. 4. Madeira - Qualidade. 5. Teses. I. Klitzke, Ricardo Jorge. II. Rocha, Márcio Pereira da. III. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. IV. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.847

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **LINEIA ROBERTA ZEN**, intitulada: "**MÉTODOS COMBINADOS PARA SECAGEM DA MADEIRA DE Eucalyptus: PRÉ-SECAGEM AO AR LIVRE COM SECAGEM EM ESTUFA CONVENCIONAL**" após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO.

Curitiba, 25 de Fevereiro de 2016.



Prof MARCIO PEREIRA DA ROCHA (UFPR)
(Presidente da Banca Examinadora)



Prof FERNANDO CARDOSO LUCAS FILHO (UFAM)



Prof JOSE TARCÍSIO LIMA (UFLA)



Dedico este trabalho ao meus pais, Lairton Zen e Maria Elizabete Zen a minha irmã Cátia Raquel Zen, e a minha avó Inorina Borges da Silva, por todo carinho, amor, compreensão, e principalmente por terem acreditado no meu potencial me dando apoio em todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Minha família: meus pais Lairton Zen e Maria Elizabete Zen, a minha irmã Cátia Raquel Zen, minhas avós Inorina Borges da Silva e Terezinha M. Zen. A minha madrinha querida Adriana Vigne Xavier, muito obrigada pelo amor e apoio, sem vocês tudo isso não seria possível.

Ao meu orientador Professor Dr. Ricardo J. Klitzke, pela sua amizade, compreensão, todo conhecimento passado a mim durante o mestrado e principalmente pela sua ajuda na realização desse trabalho.

Ao professor Dr. Marcio Pereira da Rocha, meu coorientador, pela amizade, apoio e sua valiosa contribuição neste trabalho.

Aos professores do curso de pós-graduação: Dr. Dimas Agostinho Silva, Dr. Umberto Klock, Dr. Romano Timofeiczuk, Dr. José Guilherme Prata, Dr. Jorge Luis Monteiro de Matos pelas ajudas conferidas no mestrado.

A empresa MADEMAPE madeiras pelo interesse na minha pesquisa e pela doação da madeira, especialmente ao Luciano Zatti e Piero Zatti pela parceria.

Aos amigos e colegas do Laboratório de Secagem de Madeiras pela ajuda conferida neste trabalho: Raquel Marchesan, Morgana C. França, Cláudio G. Juízo, Victor G. Cremonez, Emanuel Sakowicz, Bélika Y. Mori, Douglas E. Carvalho e Pedro L. Loiola.

As minhas amigas e companheiras de apartamento: Jaqueline Valérius e Manoela M. Duarte, pela ajuda, amizade conferida esses e nesses anos de mestrado e por todos os outros ensinamentos que vivenciamos juntas.

Aos amigos queridos de Pós-graduação, que sempre levarei no meu coração: Jaçanan E. de Freitas Milani, Aurélio L. Rodriguez, Victor Hugo Andrade, Francisco Higuchi, Dagma Kratz, Tainise Lourençon, Thiago W. Gonçalves de Oliveira e Vinicius R. Schweitzer.

Ao meu amigo Me. Felipe Susin por todas as dúvidas que me tirou e as ajudas técnicas para realização deste trabalho.

Aos companheiros do Laboratório de Usinagem de Madeira, que, também, sem vossa ajuda este trabalho não poderia ser realizado, os técnicos: Sr. Gilberto, Sr. Vitor Daniel Herrera e Sr. Ademir Cavalli, e as técnicas Gisele Brochini e Mari Torres.

Ao meu namorado Murilo Zavadinack, por todo amor, carinho, paciência e ajuda. E principalmente por estar sempre ao meu lado me dando apoio em todo meu crescimento pessoal e profissional. A família Zavadinack, pelo carinho e apoio.

Aos servidores da Secretaria de Pós-graduação em Engenharia Florestal, pela ajuda em todos os momentos nestes dois anos de curso: Sr. Reinaldo de Mendes de Sousa, Sr. David Teixeira de Araújo.

Muito obrigada a todos!

"Nunca se esqueça de quem você é, porque é certo que o mundo não se lembrará. Faça disso sua força. Assim, não poderá ser nunca a sua fraqueza. Arme-se com esta lembrança, e ela nunca poderá ser usada para lhe magoar."

(Tyrion Lannister- A Guerra dos Tronos-George R. R. Martin)

RESUMO

A dificuldade de se obter madeira seca com qualidade é um dos maiores obstáculos quando se trata da secagem da madeira do gênero *Eucalyptus*, visto que as espécies do gênero apresentam secagem lenta e com alta propensão a defeitos. Devido a isso, busca-se aplicar métodos que combinam a pré-secagem com secagem convencional como alternativa para melhorar a qualidade dessa madeira. Este trabalho teve por objetivo principal sugerir alternativas de secagem visando melhorar a qualidade final da madeira serrada de *Eucalyptus* spp. Foram realizadas: uma pré-secagem (ar livre), uma secagem combinada (pré-secagem + convencional) e uma secagem convencional. Em cada processo de secagem acompanhou-se a perda de umidade e a velocidade de secagem, foram mensurados os defeitos antes e após cada secagem (empenamentos, rachaduras e colapso) bem como os níveis de tensão e de gradiente de umidade após a secagem. Os resultados mostraram que a pré-secagem ao ar livre levou 65 dias para atingir 23% de umidade final, apresentando uma taxa de secagem média de 1%/dia, com baixos índices de defeitos e de tensões de secagem os gradientes de umidade foram de 20,22% para camada externa e 23,18% camada interna, sendo o gradiente médio de 3,17%. Na secagem convencional da madeira no estado saturado (verde) as tábuas levaram um tempo médio de 172 horas para atingir 10% de umidade final e na secagem combinada o tempo foi de 88 horas para um teor de umidade final de 11%. A madeira na secagem combinada apresentou maior taxa de secagem com menores tensões de secagem e melhor qualidade quando comparada com a madeira da secagem convencional. A secagem convencional da madeira verde apresentou alto índice de colapso 11,66%. A secagem combinada resultou em um menor tempo de secagem em estufa reduzindo o tempo de secagem em 51%, possibilitando uma maior rotatividade da estufa, maior produtividade e melhorando a qualidade da madeira.

Palavras-chave: Madeira Serrada, Eucalipto, Secagem, Umidade Final, Qualidade da Madeira.

ABSTRACT

The difficulty of obtaining dry wood quality is one major obstacle when it comes to drying of Eucalyptus wood, since the species of this genus have slow drying and high propensity to defect, making limited use. Because of this, we try to apply methods that combine pre-drying with conventional drying as alternatives to improve the quality of eucalipto wood. This work was the main objective drying suggest alternatives to improve the final quality of lumber Eucalyptus spp were performed: a pre-drying (outdoor), a combined drying (pre-drying + conventional) and a conventional drying. In each drying process was accompanied by the humidity loss and the drying rate, the defects were measured before and after each drying (warping, cracks and collapse) and tension levels and humidity gradient after drying. The results showed that pre-air drying took 65 days to reach 23% of final humidity, with an average drying rate of 1% / day with low defect rates and drying tensions moisture gradients were medium were 20.22% to 23.18% outer layer and inner layer, and the average grandiente 3.17%. In conventional drying the wood in the saturated state (green) the boards took an average time of 172 hours to reach 10% of final humidity, and the combined drying time was of 88 hours to a final moisture content of 11%. The drying wood in combination showed higher drying rate with lower drying stresses and better quality when compared with conventional timber drying. Conventional drying of green wood showed high failure rate 11.66%. The combined drying resulted in a shorter drying kiln reducing drying time by 51%, possibilitanto higher turnover greenhouse, increased productivity and improving the quality of wood.

Keywords : Lumber Wood, Eucalyptus, drying, humidity Final, Wood Quality.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1-PRINCIPAIS DEFEITOS DE SECAGEM.....	33
FIGURA 2-PILHA DE SECAGEM AO AR LIVRE DE TÁBUAS DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	38
FIGURA 3-EMPILHAMENTO DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp PARA	40
FIGURA 4-CONFECÇÃO DAS AMOSTRAS DE CONTROLE	41
FIGURA 5-MENSURAÇÃO DOS DEFEITOS PARA RACHADURAS.....	46
FIGURA 6-MENSURAÇÃO DO ARQUEAMENTO EM TÁBUAS DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	47
FIGURA 7-MENSURAÇÃO DO ENCURVAMENTO EM TÁBUAS DE <i>Eucalyptus</i> spp..	47
FIGURA 8-MENSURAÇÃO DO ENCANOAMENTO EM TÁBUAS DE <i>Eucalyptus</i> spp..	48
FIGURA 9-MENSURAÇÃO DO COLAPSO EM TÁBUAS DE <i>Eucalyptus</i> spp	48
FIGURA 10- AMOSTRAS PARA DETERMINAÇÃO DA UMIDADE FINAL (A), GRADIENTE DE UMIDADE (B) E TENSÕES DE SECAGEM (C) EM TÁBUAS DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	50
FIGURA 11-AMOSTRAS PARA A AVALIAÇÃO DAS TENSÕES DE SECAGEM.....	51
FIGURA 12-CLASSIFICAÇÃO DAS TENSÕES DE SECAGEM NA.....	51
FIGURA 13-CURVA DE SECAGEM AO AR LIVRE E UMIDADE DE EQUILÍBRIO DO AMBIENTE PARA SECAGEM DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	56
FIGURA 14-VARIAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE NA ENTRADA DO AR E NA SAÍDA DO AR NA PILHA DE MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp, NA SECAGEM AO AR LIVRE..	59
FIGURA 15-A: VARIAÇÃO MÉDIA DIÁRIA DE VELOCIDADE DO AR (M/S); B: VARIAÇÃO MÉDIA DIÁRIA DE TEMPERATURA (T°) C: VARIAÇÃO MÉDIA DIÁRIA DE PRECIPITAÇÃO (MM); D: VARIAÇÃO MÉDIA DIÁRIA DE UMIDADE RELATIVA (UR %), DURANTE A SECAGEM AO AR LIVRE	60
FIGURA 16-INCIDÊNCIA DE RACHADURAS DE SUPERFÍCIE EM TÁBUAS DE <i>Eucalyptus</i> spp SUBMETIDAS A SECAGEM AO AR LIVRE	63
FIGURA 17-AUSÊNCIA DE TENSÕES DE SECAGEM AO AR LIVRE DA MADEIRA de <i>Eucalyptus</i> spp.....	70
FIGURA 18-CURVAS DE SECAGEM PARA SECAGEM CONVENCIONAL E SECAGEM COMBINADA DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp	75
FIGURA 19-CURVA DE SECAGEM PARA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp EM CÂMARA DE SECAGEM CONVENCIONAL.....	77
FIGURA 20-CURVA DE SECAGEM COMBINADA (PRÉ-SECAGEM + CONVENCIONAL).....	78

FIGURA 21-MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp LIVRE DE RACHADURAS DE SUPERFÍCIE EM MÉTODOS DE SECAGEM CONVENCIONAL E COMBINADO.....	83
FIGURA 22-MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp LIVRE DE RACHADURAS	84
FIGURA 23-ENCANOAMENTO EM TÁBUAS NA SECAGEM CONVENCIONAL	90
FIGURA 24-COLAPSO SEVERO NA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp	92

LISTA DE TABELAS

TABELA 1-PARÂMETROS PARA DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS DOS PROGRAMAS DE SECAGEM	44
TABELA 2-GRAU DO COLAPSO	49
TABELA 3-VALORES MÉDIOS DE TEOR DE UMIDADE E MASSA ESPECÍFICA DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	53
TABELA 4-VALORES MÉDIOS DE TEOR DE UMIDADE FINAL E TEMPO DE SECAGEM AO AR LIVRE DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	55
TABELA 5-ANÁLISE DE VARIÂNCIA ENTRE AS UMIDADES NA PILHA PARA SECAGEM AO AR LIVRE NA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	58
TABELA 6-TAXA DE SECAGEM AO AR LIVRE PARA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp EM FUNÇÃO DO TIPO DE REMOÇÃO DE ÁGUA.....	61
TABELA 8-ÍNDICE DE RACHADURAS DE TOPO EM TÁBUAS DE <i>Eucalyptus</i> spp E A CLASSE DE QUALIDADE DAS TÁBUAS SUBMETIDAS A SECAGEM AO AR LIVRE	64
TABELA 9-EMPENAMENTOS NA SECAGEM AO AR LIVRE NA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp	66
TABELA 10-GRADIENTE DE UMIDADE MÉDIO NA SECAGEM AO AR LIVRE PARA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp	69
TABELA 11-PARÂMETROS DE ELABORAÇÃO DOS PROGRAMA DE SECAGEM NA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	71
TABELA 12-PARÂMETROS DOS PROGRAMAS DE SECAGEM DISPONÍVEIS NA LITERATURA PARA MADEIRA DE EUCALIPTO	71
TABELA 13- PROGRAMA PARA SECAGEM CONVENCIONAL PARA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp, VERDE EM CÂMARA DE SECAGEM	72
TABELA 15-TEOR DE UMIDADE INICIAL E TEMPO DE REMOÇÃO DA ÁGUA DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp, NA SECAGEM CONVENCIONAL E COMBINADA .	74
TABELA 16-TAXA DE SECAGEM MÉDIA PARA A SECAGEM CONVENCIONAL E SECAGEM COMBINADA PARA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp EM CÂMARA CONVENCIONAL.....	80
TABELA 18-FLECHA MÉDIA DO ARQUEAMENTO PARA SECAGEM CONVENCIONAL E COMBINADA PARA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp	85
TABELA 20-CLASSIFICAÇÃO DAS TÁBUAS QUANTO AO ENCURVAMENTO, EM PERCENTUAL PARA SECAGEM DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp	88
TABELA 21-FLECHA MÉDIA DO ENCANOAMENTO NA SECAGEM CONVENCIONAL E COMBINADA DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp	89

TABELA 22-PORCENTAGEM DE PEÇAS DEFEITUOSAS E NÍVEL DO COLAPSO
PARA A MADEIRA DE *Eucalyptus* spp NA SECAGEM CONVENCIONAL E
COMBINADA.....91

TABELA 23- TEOR DE UMIDADE FINAL E GRADIENTE DE UMIDADE PARA
SECAGEM CONVENCIONAL E COMBINADA DA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp ..93

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
2 REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1 O GÊNERO <i>Eucalyptus</i>	19
2.2 SECAGEM DA MADEIRA DE EUCALIPTO	20
2.3 ASPECTOS DA SECAGEM DA MADEIRA.....	22
2.3.2 Movimento da água na Madeira.....	22
2.3.2.1 Capilaridade.....	22
2.3.2.2 Difusão.....	23
2.3.3 Cinética da secagem.....	24
2.4 PROGRAMAS DE SECAGEM	25
2.5 SECAGEM AO AR LIVRE	27
2.6 SECAGEM CONVENCIONAL.....	28
2.7 SECAGEM COMBINADA	30
2.8 TAXA DE SECAGEM.....	31
2.9 DEFEITOS DE SECAGEM	32
2.9.1 Rachaduras	33
2.9.2 Empenamentos	34
2.9.3 Colapso	35
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	37
3.1. COLETA E PREPARO DO MATERIAL	37
3.2 MASSA ESPECÍFICA APARENTE.....	37
3.3 PRÉ SECAGEM AO AR LIVRE	38
3.4 SECAGEM CONVENCIONAL.....	39
3.4.1 Características da câmara de secagem.....	39
3.4.2 Preparação das cargas.....	39
3.5 MONITORAMENTO DO TEOR DE UMIDADE.....	40
3.5.1 Preparação das amostras de controle.....	40
3.5.1 Teor de umidade das tábuas na pilha.....	42
3.6 OBTENÇÃO DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS	43
3.7 TAXA DE SECAGEM	43

3.8 ELABORAÇÃO DO PROGRAMA DE SECAGEM.....	43
3.9 CONTRAÇÃO DA MADEIRA.....	44
3.10 INCIDÊNCIA DE DEFEITOS.....	45
3.11 AVALIAÇÃO DA SECAGEM	49
3.12 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1 SECAGEM AO AR LIVRE	53
4.1.1 Teor de umidade inicial e massa específica aparente	53
4.1.2 Teor de umidade final e curva de secagem.....	55
4.1.3 Variáveis ambientais na secagem ao ar livre.....	59
4.2. TAXA DE SECAGEM DA MADEIRA SECA AO AR LIVRE.....	61
4.4 QUALIDADE DA MADEIRA NA SECAGEM AO AR LIVRE	63
4.4.1 Rachaduras de superfície.....	63
4.4.2 Índice de rachaduras de topo.....	64
4.4.3 Empenamentos.....	66
4.4.4 Gradiente de umidade e tensões de secagem na secagem ao ar livre	69
4.5 PROGRAMA DE SECAGEM	70
4.5.1 Parâmetros do programa de secagem.....	70
4.5.2 Programa de secagem para madeira de eucalipto.....	72
4.6 SECAGEM CONVENCIONAL E COMBINADA	73
4.6.1 Teor de umidade inicial, tempo e curvas de secagem.....	73
4.6.2 Curvas de temperatura e umidade da secagem convencional.....	76
4.6.3 Taxa de secagem.....	79
4.7 CONTRAÇÃO TRANSVERSAL DA MADEIRA NA SECAGEM CONVENCIONAL E COMBINADA	81
4.8 QUALIDADE DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp NA SECAGEM CONVENCIONAL E COMBINADA	82
4.8.1 Rachaduras de superfície na secagem convencional e combinada.....	82
4.8.2 Rachaduras de topo na secagem convencional e combinada.....	84
4.8.3 Empenamento do tipo arqueamento na secagem convencional e combinada.....	85
4.8.4 Empenamento do tipo encurvamento na secagem convencional e combinada	86
4.8.5 Empenamento do tipo encanoamento na secagem convencional e combinada.....	88
4.8.6 Colapso.....	90
4.8.7 Qualidade final após a secagem convencional e combinada.....	92

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	96
REFERÊNCIAS	97

1 INTRODUÇÃO

Diante da pressão ambiental exercida sobre a exploração de florestas nativas como fonte de matéria-prima, os reflorestamentos tornaram-se importantes alternativas na confecção de produtos de madeira. Entretanto, com um mercado sempre em alta e cada vez mais comprometido com a qualidade da madeira, seria fora de propósito abster-se da derrubada dessas matas nativas se não houvesse uma opção adequada tanto no aspecto ecológico quanto no produtivo. Assim, aliado à elevação do valor econômico e à escassez das madeiras nobres, o uso diversificado de espécies do gênero *Eucalyptus* vem apresentando um papel fundamental no setor florestal brasileiro (TREVISAN, 2010).

Juntamente a isso o cenário brasileiro de florestas plantadas caracteriza-se pela grande diversidade de produtos e uma grande cadeia produtiva, compreendendo um conjunto de atividades e segmentos que incluem desde a produção até a transformação da madeira *in natura* em celulose, papel, painéis de madeira, pisos laminados, madeira serrada, carvão vegetal, móveis e outras matérias primas com grande versatilidade para uso da indústria florestal.

Dentre estes segmentos, das florestas plantadas que abastecem a indústria madeireira, o gênero *Eucalyptus* é um dos mais importantes no Brasil e cada vez mais está em ascensão, principalmente no enfoque internacional, onde exige produtos com altos padrões de qualidade. A atratividade para o uso da madeira de eucalipto se dá principalmente pelo rápido desenvolvimento dos povoamentos florestais, a facilidade de implantação do gênero e a grande versatilidade da madeira.

Melhorar a qualidade da madeira e otimizar os processos na indústria para as mais diversas finalidades é fundamental para as indústrias de base florestal, pois estas fornecem subsídios como novas técnicas de desdobro e secagem, principalmente quando se trata da secagem de madeiras refratárias como o gênero *Eucalyptus*.

De maneira geral, quando se trata da secagem da madeira de eucalipto essa deve ser conduzida de forma criteriosa, com a aplicação de programas de secagem que não sejam severos, caso contrário é inevitável a grande propensão a defeitos, como o desenvolvimento de colapso, rachaduras, empenamentos e demais defeitos de secagem. Em função disso, os métodos a baixas temperaturas são os mais indicados, principalmente durante a fase de secagem acima do ponto de saturação das fibras (SILVA, 2001).

Para minimizar esses defeitos na madeira de eucalipto e melhorar a qualidade da madeira seca, tem sido empregado o uso da secagem ao ar livre combinada com a secagem convencional. Essa alternativa tem como objetivo acelerar o processo de secagem, removendo

a água livre gradualmente com o mínimo de defeitos possível, para posteriormente secagem em câmara convencional, assim aumentando a velocidade de secagem, diminuindo o tempo e, por conseguinte os custos do processo.

Esses dois processos de secagem, quando aplicados individualmente, possuem características que não favorecem a secagem de eucalipto e que muitas vezes não são recomendadas. A secagem ao ar livre depende das condições atmosféricas locais, onde não se tem o controle das variáveis ambientais como velocidade do ar, temperatura e umidade relativa, motivo pelo qual o tempo de secagem para um teor de umidade de equilíbrio com o ambiente é relativamente longo e dispendioso, o que representa maiores custos. Por outro lado, a secagem convencional, permite o controle total do processo o que diminuiu a incidência de defeitos nas fases iniciais, mas a necessidade de pessoal qualificado aumenta os custos operacionais e possui altos custos de investimento, o que ocasiona certa restrição no emprego para secagem de madeiras em pequena a média escalas (ROSSO, 2006).

Dessa forma este trabalho teve por objetivo principal sugerir alternativas de secagem visando melhorar a qualidade final da madeira serrada de *Eucalyptus* spp. Os objetivos específicos do presente estudo foram:

- Elaborar programa de secagem: um para secagem convencional e outro para secagem combinada (pré-secagem + secagem convencional).
- Avaliar os parâmetros de secagem para cada método utilizado;
- Avaliar a qualidade da madeira de *Eucalyptus* spp após a pré-secagem ao ar livre e após a secagem convencional (combinada) e após a secagem convencional

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O GÊNERO *Eucalyptus*

O gênero *Eucalyptus* pertence à família das *Myrtaceae*, a qual possui aproximadamente 130 gêneros, e mais de 3.000 espécies (WATSON; DALLWITZ, 2016) tendo seus centros de diversidade na Austrália, sudeste da Ásia, na América Tropical e Temperada, e alguns representantes na África (WILSON et al., 2001).

Pertencente à subfamília *Leptospermoideae*, a grande maioria dos eucaliptos são encontrados nos limites da Austrália continental e Tasmânia, dominando a vegetação em 90% do território australiano. Ocorrem em locais de condições ambientais que vão desde áreas pantanosas, até muito secas, solos de alta e baixa fertilidade, e até solos arenosos (LAMPRECHT, 1990). Apenas em áreas excessivamente úmidas ou desérticas os eucaliptos não ocorrem (MARCHIORI; SOBRAL, 1997).

O gênero *Eucalyptus* nas regiões de origem é representado por árvores com alta taxa de crescimento, plasticidade, forma retilínea do fuste, desrama natural e madeira com variações nas propriedades tecnológicas, adaptadas às mais variadas condições de uso (OLIVEIRA et al., 1999). Ainda, inclui uma grande quantidade de espécies com madeiras de características físico-mecânicas e estéticas distintas, permitindo a sua utilização na substituição da madeira de espécies latifoliadas nativas (PEREIRA et al., 2000).

Quanto às características da madeira de eucalipto, Oliveira et al. (2009) destacam como apresentando pouco brilho, grã direita a reversa, textura fina a média, macia a moderadamente dura ao corte, com cheiro e gosto distinto. A massa específica aparente, varia desde leve a média, até aquelas consideradas pesadas, com variações de aproximadamente 0,40 a 1,20 g/cm³. Ainda conforme os mesmos autores, um aspecto positivo em relação à madeira de eucalipto é a grande variação nas suas propriedades, em função das diferentes espécies que são cultivadas no país. Tem-se desde madeiras leves e de baixa durabilidade, até aquelas aptas às utilizações estruturais e de relativa durabilidade, mesmo sem serem tratadas com preservantes químicos.

Os eucaliptos foram introduzidos no Brasil como monocultura no início do século XX, primeiramente destinados à produção de lenha e carvão, logo passando a ser usados em estruturas simples, como poste para transmissão de energia e telefonia, além de moirões. (NAHUZ, 1998), conseqüentemente as espécies continuaram sendo muito difundidas e são muito utilizadas como fornecedoras de matéria prima para as indústrias de celulose e papel, de chapas aglomeradas, madeira serrada, móveis e energia (ROCHA, 2000). Segundo Lobão et al.

(2014) o potencial de utilização múltipla da madeira de eucalipto tem crescido, sobremaneira, nos últimos tempos, principalmente se adotar o conceito de floresta de aplicação ampla, ou seja, podem-se conseguir diferentes tipos de floresta para cada um dos produtos a serem obtidos, havendo a possibilidade de se explorar todo o potencial do gênero *Eucalyptus*.

Segundo o IBÁ (2015) no ano de 2014, o consumo brasileiro de madeira proveniente de árvores plantadas para uso industrial foi de 190,03 milhões de m³, sendo que desse total, 143,21 milhões de m³ foi de madeira de eucalipto, o que representa aumento de 2,6% em relação ao consumo de 2013. Contudo a produção de madeira serrada ainda é pequena, sendo que desse total 7 milhões de m³ se destina a esta finalidade, acredita-se que a médio prazo essa tendência seja revertida (IBÁ, 2015)

Jankowsky et al. (2000), complementam que o eucalipto deixou de ser uma matéria-prima alternativa para a indústria madeireira, sendo realidade a sua transformação em produtos à base de madeira maciça. Por outro lado, completam que há necessidade de adequação dos processos de beneficiamento da madeira, já que o emprego do *Eucalyptus* implica no processamento de árvores jovens e de diâmetros reduzidos.

No entanto a qualidade da madeira serrada de eucalipto, depende de técnicas que são adotadas desde a formação da floresta até o desdobro e fases subsequentes. Rotações longas de plantações de eucalipto proporcionam maiores diâmetros das toras, beneficiando a qualidade e acarretando maiores rendimentos no desdobro, além de maior estabilidade da madeira, mas para isso deve-se também ter conhecimento de técnicas corretas de desdobro e secagem para obter produtos com maior qualidade final (REMADE, 2007).

2.2 SECAGEM DA MADEIRA DE EUCALIPTO

Em virtude da baixa permeabilidade do eucalipto, aliado à sua própria constituição anatômica que dificulta muito a saída de umidade do seu interior, o gênero *Eucalyptus* pode ser considerado de difícil secagem (OLIVEIRA; CARVALHO, 2001).

Os reflexos da constituição anatômica são muito expressivos e presentes na madeira. Apresentam pontuações de pequenos diâmetros, o que dificulta o deslocamento de água por capilaridade ou na forma líquida no interior dessa madeira (OLIVEIRA; CARVALHO, 2001). Aliado a isso, outro fator a ser somado para dificultar a secagem da madeira de eucalipto é a presença de tiloses em sua estrutura (ALFONSO, 1987).

A madeira de eucalipto não apresenta a fase de taxa constante na sua curva característica de secagem, comprovando a impermeabilidade da espécie. A permeabilidade reduzida implica

na necessidade de uma secagem lenta e no desenvolvimento, durante o processo, de gradientes de umidade acima do normal (JANKOWSKY; SANTOS, 2003).

As madeiras do gênero *Eucalyptus* em geral, devem ser secas em condições suaves de temperatura e umidade relativa do ar, a fim de proporcionar uma secagem mais lenta e com a menor incidência de defeitos possíveis (SILVA, 2001). Martins et al. (2001), recomendam uma secagem suave para a madeira de eucalipto. Utilizando-se de condições apropriadas de temperatura, umidade relativa, onde é possível evitar defeitos como rachaduras, colapso e empenamentos, reduzindo as perdas em volume de madeira que aumentam os custos do produto final.

Como características típicas que dificultam a secagem de eucalipto, Campbell e Hartley (1984) mencionam defeitos como colapso (particularmente em espécies com baixa massa específica), as rachaduras superficiais, as altas contrações, os gradientes de umidade severos e as tensões de secagem pronunciadas. Vermaas (1995) também afirma que, acima do ponto de saturação das fibras, o eucalipto apresenta uma grande tendência a rachaduras e colapso, principalmente em temperaturas elevadas, tendo o colapso com o defeito mais expressivo e severo.

Um dos defeitos que mais desvalorizam a qualidade da madeira, de acordo com Ilic e Hills (1986), é o colapso, assim como os empenamentos. As rachaduras também podem ocorrer na superfície e no interior, como as do tipo “favo de mel”, e particularmente associadas com colapso. No gênero *Eucalyptus* esses problemas variam de acordo com a procedência, a espécie e a posição na árvore.

Aprimorar o uso do eucalipto envolve uma série de práticas adequadas, a rápida conversão de toras em tábuas, transferência rápida das tábuas para o local de secagem, o uso combinado de pré-secagem com secagem convencional e a permanência da madeira em câmaras de secagem são fatores essenciais para o sucesso da secagem (CAMPBELL; HARTLEY, 1988).

Como alternativa para reduzir o tempo de permanência da madeira no secador, diversos autores Stöhr (1977), Campbell e Hartley (1988), Northway (1996) e Cinglio (1998) têm sugerido como métodos aplicáveis a madeira de *Eucalyptus grandis* o uso da pré-secagem ou a combinação da secagem ao ar com posterior secagem convencional. Esta combinação proporciona uma redução nos custos e otimização do processo.

Franzoni (2001), descrevendo a utilização do eucalipto para produção de móveis, indica como melhor procedimento a pré-secagem ao ar livre até um teor de umidade entre 30 e 40%, seguido de secagem convencional. Neuman (1989 citado por SEVERO, 2000) comenta que é

possível secar madeira de *Eucalyptus globulus* com 30 mm de espessura por meio de um sistema misto de pré-secagem e secagem à alta temperatura. Para isso, o tempo de secagem ao ar é de aproximadamente 35 dias para secar desde 70% até 21% de umidade. Já para secar de 21% até 10% de umidade, com uma temperatura de 110°C, o tempo de secagem seria de 20 horas.

Por estas razões o eucalipto é conhecido como madeira de secagem lenta, difícil e com alta propensão a defeitos, como colapso e rachaduras. A alternativa é buscar o desenvolvimento da tecnologia de secagem, e métodos alternativos visando soluções que permitam reduzir as perdas verificadas durante este processo (JANKOWSKY et al., 2003).

2.3 ASPECTOS DA SECAGEM DA MADEIRA

2.3.2 Movimento da água na Madeira

2.3.2.1 Capilaridade

O movimento de retirada de água livre segue as leis de capilaridade de *Poiseuille* (SIAU, 1971) a qual descreve esse movimento. Em um capilar cheio de um determinado líquido, o movimento da água é produzido pelas diferenças de tensão, devido as forças existentes na superfície do menisco dentro do capilar. A força de tensão “T” em um menisco balanceado com raio “r” pode ser calculado usando a equação 1:

$$T = H * d = \frac{2\beta}{d*r} = 2 \frac{\beta}{r} \quad (1)$$

Onde:

T= tensão capilar (g/cm²)

H= altura de ascensão do líquido no capilar (cm)

D= densidade da água (g/cm³)

β= tensão superficial da água (g/cm²)

A tensão superficial exerce uma força de subida, desde que haja adesão entre o líquido e a superfície interior do capilar, ou seja, a força de adesão entre o líquido e a parede do capilar é maior que a força de coesão do líquido. Neste caso o líquido tende a se espalhar na maior área possível do capilar por estar entrando em contato com uma superfície hidrofílica, formando assim um menisco com a forma côncava. Quando a tensão superficial exerce uma força de

descida, significa que não há adesão entre o líquido e a superfície interior do capilar, ou seja, a força de adesão entre o líquido e a parede do capilar é menor que a força de coesão do líquido. Neste caso, o líquido tende a reduzir sua área de contato com o capilar por estar entrando em contato com uma superfície hidrofóbica tomando a forma de um menisco convexo (SILVA, 2007)

A força capilar provoca um fluxo de água livre através dos espaços e pontoações de uma célula para outra. À medida que a água livre presente nos lumens das células é removida progressivamente, outras forças de secagem começam a agir. A força capilar age no centro da madeira e diminui gradualmente à medida que o teor de umidade das células internas aproxima-se do ponto de saturação das fibras (PSF). O movimento de água livre acima do PSF é facilitado pelo aumento da temperatura, pela existência de bolhas de ar no interior das células e pelo aumento do diâmetro das pontoações (SANTINI, 1981).

Hart (1966) complementa que a existência de uma bolha de ar dentro da cavidade celular, devido à pressão do ar, somado a pressão de vapor d'água produzida pelo aquecimento, pressiona a água através das pontoações das células adjacentes provocando o seu movimento.

2.3.2.2 Difusão

A água higroscópica se move na madeira, pelo fenômeno de difusão em consequência dos gradientes de umidade que se estabelecem nas paredes celulares ou na madeira. A movimentação das moléculas de água adsorvidas junto aos grupos hidroxilas (OH), ocorre de locais de alta para baixa umidade, requerendo menor quantidade de energia do que a necessária para o deslocamento em sentido inverso (GALVÃO; JANKOSKY, 1985). Também é definida por Bennett e Myers (1978) como o transporte de massa resultante do movimento casual das moléculas.

De acordo com Oliveira (1981), as moléculas de água se movimentam de regiões com elevadas concentrações para regiões com baixas concentrações. Assim como a velocidade de difusão da água higroscópica depende do gradiente de umidade, a difusão do vapor d'água é função do gradiente de pressão. No interior da madeira, a pressão de vapor aumenta de acordo com a elevação da umidade até o (PSF). Acima deste, dificilmente será possível observar de maneira significativa a movimentação de água no estado de vapor.

Ponce e Watai (1985) salientam que o movimento de vapor d'água através de espaços vazios na madeira depende da umidade relativa do ar confinado nestes espaços e do ar que envolve a madeira. Caso este ar possua uma baixa umidade relativa, o vapor d'água irá se mover

da madeira úmida para a atmosfera. Assim, a velocidade de secagem depende da umidade relativa do ar (externo) que envolve a madeira, da umidade na superfície da madeira e da diferença de umidade desenvolvida entre a superfície e o interior da peça.

A difusão de vapor d'água é de dez a mil vezes maior que a difusão d'água higroscópica nas paredes celulares. Ressalta-se que a difusão de vapor d'água a temperaturas abaixo da ebulição tem menor contribuição no processo de secagem devido ao pequeno número de aberturas que ligam as células entre si. Dessa forma, apesar da facilidade de difusão do vapor d'água através das aberturas naturais da madeira, a maior parte do movimento da água ocorre através da parede celular (KOCK, 1972).

Como o fluxo e o gradiente são variáveis no tempo e no espaço, quando se seca a madeira, a segunda lei de *Fick* representada pela Equação 2 é a que melhor expressa o fluxo de difusão.

$$\frac{Dm}{Dt} = Dg * \frac{d^2M}{dx^2} \quad (2)$$

Onde:

dm/dt = quantidade de umidade removida (m) na unidade de tempo (t)

Dg = coeficiente de difusão médio (cm^2/s)

d^2M/dx^2 = variação da umidade na distância (x)

2.3.3 Cinética da secagem

Do ponto de vista físico, a secagem de madeiras pode ser definida como um balanço dinâmico entre a transferência de calor do ar para a madeira, a evaporação superficial, difusão de umidade através da madeira e o fluxo de massa da água capilar (HART, 1965).

Também conforme Simpson (1991), a água na madeira normalmente se movimenta de zonas de maior teor de umidade para as de menor teor de umidade, podendo ser considerada em duas fases: movimento de água no interior para a superfície e remoção da água desde a superfície.

O calor é transferido do meio secante (ar) para a superfície da madeira por convecção. Após a superfície ser aquecida, este calor é transferido para o interior por condução. No início da secagem, quando a madeira está úmida, a transferência de calor do ambiente para a superfície é o fator mais importante. A medida que a madeira perde umidade, a transferência de calor da superfície para o interior passa a ser o fator limitante. É por esta razão que altas velocidades do ar são mais importantes na primeira fase de secagem do que no final (ANDRADE, 2000).

A transferência de calor e a evaporação superficial são controladas pelas condições externas, enquanto que a movimentação de umidade do interior até a superfície da madeira é controlada principalmente por propriedades da madeira como a permeabilidade e a massa específica (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

Segundo Baker (1956), a água na madeira se movimenta de zonas de alta umidade para zonas de baixa umidade, significando que a parte externa da madeira deve estar mais seca do que seu interior, para que haja secagem. Deste modo, começa a se formar um gradiente de umidade que, segundo (PERELYGIN, 1965), reflete-se nas diferentes umidades de uma peça de madeira ao longo de suas dimensões (largura, espessura e comprimento). Esta irregularidade na distribuição da umidade é mais acentuada em tábuas grossas, necessitando-se de mais tempo para sua uniformização.

Fernandes e Galvão (1978) citam que a rapidez da secagem está diretamente relacionada com a inclinação do gradiente de secagem e esse gradiente decresce à medida que a secagem progride, diminuindo também a rapidez da secagem. Ainda conforme os mesmos autores, durante esse processo, devido à retração da madeira em função da dessorção de umidade, surgem tensões internas capazes de ocasionar defeitos. Estudos conduzidos por Mcmillen (1963) mostram que se as tensões de secagem ultrapassarem o limite de proporcionalidade da madeira ocorrerá uma fixação de tensões, ou seja, a madeira sofrerá uma deformação permanente que irá causar problemas durante o processamento final.

2.4 PROGRAMAS DE SECAGEM

De acordo com Klitzke (2005), a secagem artificial é realizada através da circulação de ar quente e seco, de modo uniforme através da pilha de madeira. Entretanto, a velocidade da secagem e o risco de defeitos durante o processo são variados dependendo das características estruturais das espécies. Por esta razão, as madeiras de diferentes espécies requerem condições distintas na secagem, gerando a necessidade de programações diferenciadas para manter em um nível ideal as condições internas da estufa, buscando-se o equilíbrio entre a velocidade da secagem e o nível de perdas, ou seja, os defeitos de secagem.

Um programa de secagem é um ajuste trabalhado entre a necessidade de secar a madeira tão rápido quanto possível evitando condições severas que possam causar defeitos. É uma série de ações nas temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido que estabelecem a temperatura e

umidade relativa do ar dentro da câmara e são aplicados nos diversos estágios do processo de secagem (SIMPSON, 1991).

Os programas do tipo umidade-temperatura são os mais usuais na secagem convencional. Nestes programas, a temperatura do ar no interior do secador (e conseqüentemente a umidade relativa também) é ajustada em função do teor de umidade da madeira (HILDEBRAND, 1970; PRATT, 1974; GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

De acordo com Galvão e Jankowsky (1985), um programa típico de secagem apresenta três fases distintas:

Fase I: período de aquecimento inicial; fase na qual a madeira é aquecida sem iniciar o processo de secagem propriamente dito. Inicialmente, o ar do interior do secador é aquecido até atingir a temperatura de bulbo seco desejada. Posteriormente, promove-se o equilíbrio térmico entre o ar e a madeira. Como nesta fase é indesejável que a madeira comece o processo de secagem, utilizam-se umidades relativas elevadas (acima de 85%). É importante ressaltar que, durante a elevação da temperatura de bulbo seco, a diferença higrométrica (temperatura bulbo seco e temperatura do bulbo úmido) não deve exceder 2°C. Portanto, é desejável que a temperatura de bulbo seco (TBS) seja atingida através da liberação de vapor saturado e aquecido dentro da estufa. Tendo o ar atingido a temperatura (TBS) desejada, inicia-se a fase de aquecimento da madeira, cuja duração é proporcional à espessura das peças em secagem. Galvão e Jankowsky (1985) aconselham um período mínimo de 1 hora por 1 cm de espessura das peças.

Fase II: secagem propriamente dita; nessa fase acontece a retirada de umidade da madeira. Inicialmente, ocorre a remoção da água livre, durante a qual, baixas temperaturas (40°C a 60°C) e altas umidades relativas devem ser utilizadas para prevenir a ocorrência de colapso e rachaduras. Um gradiente de umidade reduzido deve ser mantido, pois um gradiente acentuado resultaria em tensões internas com os conseqüentes defeitos na madeira. A umidade relativa do ar (UR) inicial dependerá da espécie em secagem. Para espécies de difícil secagem, é aconselhável umidade relativa superior a 85%. A umidade relativa pode ser diminuída gradualmente após a madeira ter perdido parte da sua umidade inicial. A temperatura inicial do termômetro seco deve ser mantida até que a água livre da madeira seja removida. Os valores máximos dependem da espécie e da espessura da madeira, sendo que para maiores espessuras, adotam-se temperaturas mais baixas. A retirada de água de impregnação caracteriza-se pela elevação da temperatura com a redução simultânea da UR. Quando o centro das peças de madeira atingir 30% de umidade, a temperatura pode ser energeticamente elevada.

Fase III: período final de controle de qualidade; ocorrem a uniformização e condicionamento, que são fases necessárias visando homogeneizar o máximo possível a umidade em todas as peças da pilha eliminando suas tensões internas, mediante o reumidecimento das camadas superficiais. As tensões internas são eliminadas, pela redução do gradiente de umidade (a diferença de umidade entre o centro e a superfície).

Brandão (1989), baseado na metodologia proposta por (TERAZAWA, 1965), desenvolveu programas de secagem para diversas espécies, incluindo o *Eucalyptus saligna*. A partir de dados obtidos de um ensaio de taxa de secagem a 100°C, utilizou a análise de correlação (método *Stepwise*) para a determinação de equações que estimassem a temperatura inicial, a temperatura final e o potencial de secagem para espécies de programas de secagem desconhecido. A determinação destas três variáveis é tão importante para um programa de secagem de madeira de eucalipto que alguns autores repetiram essa metodologia para o desenvolvimento de programas de secagem (CINIGLIO, 1998; ANDRADE et al., 2001; BARBOSA et al., 2005).

2.5 SECAGEM AO AR LIVRE

Segundo Ponce e Watai (1985) o principal objetivo de secar a madeira ao ar livre é fazer com que esta perca a maior quantidade de água possível, utilizando as forças da natureza, onde muitas vezes esse método é usado como uma secagem parcial, mas também como uma secagem completa, dependendo do seu uso final.

A secagem ao ar livre consiste em gradear a madeira serrada em pátios, deixando a madeira secar naturalmente ao ar, de um determinado local, permitindo secar normalmente até que ela atinja a umidade de equilíbrio do ambiente. A taxa de secagem, ou seja, a velocidade com que a madeira seca depende, principalmente, da temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento (STANGERLIN, 2009).

Para que esse processo de secagem ao ar livre seja eficiente, são necessários alguns cuidados especiais, iniciando com a disposição adequada das pilhas no pátio, que devem estar 50 cm acima do solo e este solo deve possuir uma cobertura escura para maior retenção de energia ou se for um pátio gramado, a grama deve ser mantida sempre aparada (ROSSO, 2006). Ainda conforme a mesma autora outro fator preponderante é a direção dos ventos, onde as pilhas devem estar orientadas conforme a direção predominante dos ventos, pois o *layout* correto no pátio permitirá que a passagem de ar entre as peças seja uniforme.

Devido os fatores ambientais não serem controláveis, esta é a grande desvantagem do processo de secagem ao ar livre. Apesar disso, pode-se interferir sobre o processo, manipulando fatores como a largura da pilha, espessura dos sarrafos separadores, a ocupação horizontal das pilhas e o arranjo físico no pátio de secagem (GOMIDE, 1974; JANKOWSKY, 1992).

Conforme Santini (1992) as limitações da secagem ao ar livre estão geralmente associadas à sua dependência das condições atmosféricas. Particularmente na Região Sul do País, o processo é mais favorável no período da primavera/verão, quando a temperatura e insolação são mais intensas, e observa-se uma menor umidade relativa e precipitação.

Assim a secagem ao ar livre pode ser utilizada como secagem definitiva ou como uma pré-secagem, onde o conhecimento da umidade de equilíbrio da madeira na localidade, se torna parâmetro decisivo para determinar o ponto final da secagem (MENDES et al., 2000). Ainda conforme o mesmo autor, o que se observa é que a umidade de equilíbrio da madeira é uma ferramenta de suma importância no controle do processo de secagem da madeira ao ar livre. Recomenda ainda, se possível, uma análise dos dados de umidade de equilíbrio específica para o local de secagem de cada localidade.

2.6 SECAGEM CONVENCIONAL

A secagem convencional sofre influências da madeira, das variáveis do processo em si, ou seja, temperatura, umidade relativa, velocidade do ar e também da prévia preparação da madeira (ANDRADE, 2000) e é conduzida em câmaras de secagem, onde se opera com total controle da circulação do ar, da temperatura e da umidade relativa.

A secagem em câmara convencional é conduzida em um ambiente fechado onde o ar circula pela superfície da madeira e as temperaturas na câmara no início do processo variam entre 40 a 80°C e as temperaturas no final do ciclo, de 65 a 95°C (PONCE; WATAI, 1985). Também conforme Pratt (1974) a secagem convencional é conduzida com total controle das condições internas das mesmas. As estufas de secagem convencional são dotadas de um sistema de aquecimento, um sistema de umidificação do ar, um conjunto de “*dampers*” ou janelas, que permitem a troca de ar entre o interior da estufa e o meio externo, e um sistema de ventilação, que promove a circulação do ar através das pilhas de madeira.

O sistema de ventilação atua com duplo propósito: conduzir o calor seja dos elementos do irradiador, das serpentinas ou de outros tipos de aquecimento, à pilha de madeira e, também remover a umidade que vai evaporando e acumulando à superfície das tábuas, permitindo a sua substituição por nova massa de ar mais seco (MELO, 1999).

A circulação do ar, dependendo do tipo de câmara, é obtida naturalmente ou por meio de circuladores acionados eletricamente. Nesta última, as velocidades variam de 0,35 a 2 m/s, considerando-se as velocidades em torno de 2 m/s como as mais econômicas e efetivas. Velocidades maiores somente deveriam ser aplicadas para umidades iniciais elevadas (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

A umidade relativa está diretamente relacionada com a capacidade do ar em receber maior ou menor quantidade de vapor de água e com a remoção da água das superfícies da madeira. O controle da umidade relativa é obtido por quatro diferentes maneiras: pelo sistema de aquecimento, através do fornecimento de vapor, pela admissão de ar mais seco e frio do exterior e pela eliminação de ar úmido do interior do secador. Estas três últimas regulagens permitem ajustar principalmente o termômetro úmido, enquanto a primeira controla o termômetro seco (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

Santos (2002) afirma que o processo de secagem convencional possui vantagens sobre o método de secagem ao ar livre, no entanto, não pode ser indicado para qualquer espécie, sendo necessário realizar uma adequação do processo dependendo da espécie, da espessura e do uso destinado para este material. O autor ainda cita que o principal objetivo da secagem artificial é promover o equilíbrio entre a velocidade de evaporação da água na superfície da madeira, a taxa de movimentação interna (tanto de calor como de umidade) e as reações da madeira durante o processo, tornando a secagem mais rápida possível e com um nível de perdas ou um padrão de qualidade aceitável para o produto que se pretende.

Em relação ao material, as madeiras mais densas e as peças com maior espessura, requerem mais tempo para secar. De acordo com Martins (1998), a massa específica está muito relacionada com a permeabilidade, que é um dos fatores que mais influenciam na secagem. Por outro lado, menor massa específica implica em maior quantidade de água no estado líquido, cuja movimentação depende principalmente do raio dos capilares, através dos quais verifica-se o escoamento do fluído, devido à estrutura da madeira, os capilares de menor raio serão as pontoações que interligam os lúmens dos diversos elementos anatômicos (ANDRADE, 2000). Assim, a permeabilidade é uma propriedade extremamente variável dentro de uma mesma peça de madeira não se conhecendo uma relação direta com a massa específica (JANKOWSKY, 1986; CAVALCANTE, 1991).

Além das características do material e das variáveis do processo, a preparação da carga para entrada na câmara de secagem também é outro aspecto de extrema importância no desempenho da secagem e na qualidade das peças ao final do processo (PONCE; WATAI, 1985). Hildebrand (1970), Galvão e Jankowsky (1985) afirmam que, para reduzir o período de

secagem e minimizar os defeitos, a recomendação geral é secar uma espécie por vez e com peças, preferencialmente, de mesma espessura e qualidade. Além disso, a carga de madeira deve ter aproximadamente a mesma umidade no início da secagem.

Outro fator é o uso adequado dos tabiques ou sarrafos separadores que reduzem sensivelmente os empenamentos das tábuas, favorecendo que a secagem transcorra de maneira mais rápida e uniforme. Os tabiques devem ser confeccionados de madeiras com alta resistência, sem defeitos. Suas dimensões devem ser de acordo com a largura da pilha, tipo e dimensões das tábuas a serem secas. O posicionamento, espaçamento e o alinhamento dos tabiques também são importantes durante o processo de secagem. Para redução dos empenamentos das tábuas durante a secagem, as fileiras de tabiques devem ser alinhadas verticalmente (PONCE; WATAI, 1985).

As principais restrições da secagem convencional são o alto investimento inicial e a necessidade de mão de obra especializada. Segundo a STCP (1990), os investimentos não se referem apenas aos custos diretamente relacionados à compra do secador, pois um setor de secagem convencional necessita ainda de caldeiras, instalações hidráulicas, elétricas, rede de vapor, barracões e outras obras que em seu conjunto geram custos elevados.

2.7 SECAGEM COMBINADA

A secagem combinada trata-se da união dos dois métodos, ar livre e convencional, ou seja, a madeira é exposta à secagem ao ar livre para secar até um teor de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras, ou até um teor de umidade desejado. Após a madeira é submetida à secagem convencional em câmara de secagem para que atinja o teor de umidade final desejado. Pode-se ainda descrever a secagem combinada como um meio de facilitar a secagem da madeira até teores de umidade em torno de 25 a 30%, e logo após a saída da água livre, eliminar a água de impregnação de modo artificial (ROSSO, 2006).

Diversos autores Stohr (1977), Campbell e Hartley (1988), Nortway (1996) e Ciniglio (1998), têm sugerido como métodos aplicáveis à madeira de *Eucalyptus* o uso da pré-secagem ou a combinação da secagem ao ar com posterior secagem convencional. Esta combinação proporciona redução de custos e otimização do processo, através da maior operacionalidade dos secadores.

É prática tradicional, em países como Austrália e África do Sul, a secagem ao ar livre da madeira de eucalipto da condição verde até o PSF, sendo posteriormente seca em câmara de secagem convencional até o teor de umidade final (VERMAS, 1995).

Ciniglio (1998), trabalhando com madeira serrada de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, e realizando isoladamente secagens ao ar e convencional, sugere a combinação de pré-secagem ao ar em local coberto, até o PSF, seguida de secagem convencional.

Estudos, conduzidos por Tomaselli (1992) e Melado (1993), mostram que a utilização de um sistema combinado de pré-secagem ao ar livre e secagem convencional, para madeira de eucalipto de 25 mm de espessura destinado, a caixotaria, leva cerca de dois meses para atingir o PSF e posteriormente, varia de cinco a dez dias em câmara de secagem para alcançar o teor de umidade final desejado.

Objetivando melhorar o processo de secagem da madeira Jankowsky et al. (1998) realizaram experimentos com madeira recém cortada submetida diretamente à secagem convencional e envolvendo o uso da pré-secagem em lugares cobertos ou descobertos, com posterior secagem convencional, onde o estudo mostrou que a pré-secagem em ambiente coberto, mais secagem combinada proporcionou melhores resultados na qualidade da madeira.

Apesar da aceitação generalizada que a literatura registra sobre os efeitos positivos da pré-secagem na qualidade da madeira serrada, não há concordância entre os autores sobre o teor de umidade a partir do qual a madeira deveria ser submetida a secagem convencional. Stör (1977), considera que esse teor estaria entre 20% e 25% de umidade. Campbell e Hartley (1998), afirmam que a madeira deveria ser seca até atingir umidade em torno de 30%, enquanto que NORTHWAY, (1996), recomenda a secagem natural até umidade entre 40% e 50%.

2.8 TAXA DE SECAGEM

A taxa de secagem ou velocidade de secagem refere-se à quantidade de umidade evaporada, em certo intervalo de tempo, em relação à área de evaporação da peça de madeira. Com as informações fornecidas pode-se estimar o tempo de secagem de uma determinada espécie, da condição de madeira verde até um teor de umidade considerado a uma dada temperatura e umidade de equilíbrio (KLITZKE; BATISTA, 2010). A saída mais ou menos rápida da água por unidade de tempo é influenciada pela velocidade do ar, temperatura da madeira e umidade relativa do ar (HERZBERG et al., 1985). Kollmann e Côté (1968) relatam que a estrutura anatômica, a densidade, a espessura das tábuas e o conteúdo de umidade são características que também afetam a taxa de secagem.

Santini e Haselein (2002) complementam que o gradiente de umidade formado ao longo do processo de secagem também influencia na velocidade de secagem da madeira. Portanto a

taxa de secagem é uma variável que fornece informações relevantes do comportamento da madeira ao longo da secagem.

Simpson (1991) afirma que quanto menor a umidade relativa do ar circundante, maior é o fluxo de água capilar e que o movimento de difusão também é estimulado, pois a umidade da superfície das tábuas diminui, aumentando o gradiente de umidade e assim a taxa de difusão. O autor ainda afirma que quanto maior a temperatura da madeira, mais rapidamente a umidade se moverá do interior (mais úmido) para a superfície das tábuas (mais seco).

A velocidade de circulação do ar é outro fator que exerce influência de forma significativa na taxa de secagem durante o período de taxa constante, quando a madeira possui altos teores de umidade (SALAMON; MCLNTYRE, 1969; TOMASELLI, 1977; WENGERT; DENIG, 1995). Em razão disso, a ocorrência de altas taxas de secagem é comum no início do processo, porém, a partir do momento em que a água superficial é evaporada da madeira, a taxa torna-se decrescente (KLITZKE, 2002).

Brandão (1989) obteve taxas de secagem respectivas desde a condição verde até 5% e verde até 30% de umidade de 10,94 g/h e 2,50 g/h, para madeira de *Eucalyptus saligna* com umidade inicial de 91,8%. Batista (2009), na secagem de *Eucalyptus saligna* obteve taxas de secagem respectivas desde a condição verde até 30%, de 30%-5% e de verde até 5% de umidade de 0,0332 g/cm².h, 0,0131 g/cm².h e 0,0191 g/cm².h, com umidade inicial média de 63,49%. Barbosa et al. (2005) estudaram 10 clones de *Eucalyptus* e obtiveram taxas de secagem médias de 0,0187 g/cm².h, 0,0337 g/cm².h e 0,0082 g/cm².h, respectivamente para as condições de verde a 5%, verde a 30% e 30% a 5% de umidade, a um teor de umidade inicial médio de 102,4%.

2.9 DEFEITOS DE SECAGEM

Defeito de secagem é toda e qualquer alteração que venha a ocorrer na estrutura da madeira que dificulte seu reprocessamento, em uma fase posterior (BRANDÃO, 1989).

De acordo com Mendes et al. (1998), os principais defeitos gerados durante o processo de secagem são os empenamentos, as rachaduras, o colapso e o endurecimento superficial. A Figura 1 ilustra os tipos de defeitos decorrentes do processo de secagem.

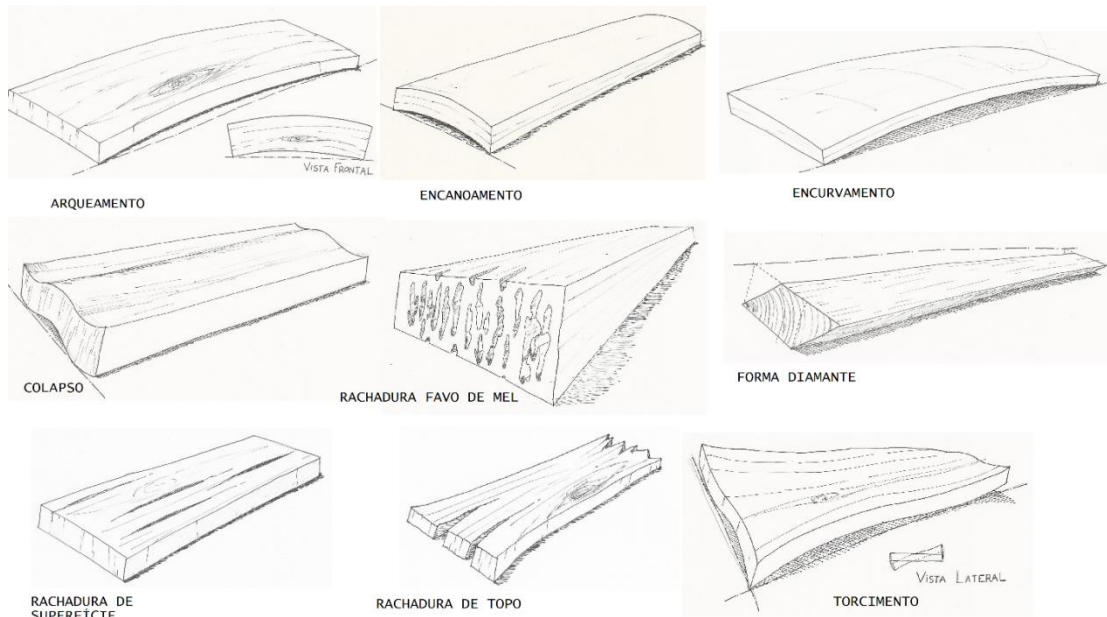


FIGURA 1-PRINCIPAIS DEFEITOS DE SECAGEM
 FONTE: a autora (2016).

De acordo com Santini (1992), para obtenção de um maior valor agregado da madeira serrada, é de grande importância adotar procedimentos adequados de secagem, como baixas temperaturas e alta umidade relativa nas etapas iniciais, visando minimizar a incidência de defeitos.

2.9.1 Rachaduras

De acordo com Oliveira (1981), Galvão e Jankowsky (1985), as rachaduras aparecem como consequência da diferença de retração nas direções radial e tangencial da madeira e da diferença de umidade entre regiões contíguas de uma peça, durante o processo de secagem e tensões de crescimento. Existem três tipos de rachaduras: de topo, superficiais e internas.

As rachaduras de superfície ocorrem no início da secagem quando as camadas mais externas da tábua estão tensionadas o suficiente para fraturar a madeira. Estas rachaduras são mais frequentes em tábuas tangenciais (SIMPSON, 1991). Melo (1999) afirma que as rachaduras surgem no decurso da secagem sempre que exista um elevado gradiente de umidade entre a parte central e a zona periférica da madeira e se desenvolvam forças de tração, em virtude da contração abaixo do PSF, a que esta não consegue opor-se.

As rachaduras de topo, como as de superfície, usualmente ocorrem nos raios da madeira, nos topos das tábuas. Estas rachaduras ocorrem porque o gradiente de umidade se move mais

rapidamente na direção longitudinal do que na transversal. Portanto, os topos das tábuas secam mais rapidamente do que o meio e tensões se desenvolvem nos topos (SIMPSON, 1991).

Rachaduras internas aparecem quando se desenvolvem as tensões de tração no interior da peça (superfície sob compressão e centro sobre tração). Estas tensões causam rachaduras internas quando o esforço excede as forças de coesão entre as células da madeira. Apesar dessas rachaduras manifestarem-se somente na fase de secagem, seu controle deve ser feito ainda na fase de aquecimento. Quando muito acelerada, a secagem causa um desequilíbrio entre as tensões no interior e na superfície da peça que acaba por produzir rachaduras internas, à medida que o processo evolui (MENDES et al., 1998).

2.9.2 Empenamentos

Os empenamentos, por sua vez, são definidos como qualquer distorção da peça de madeira em relação a seu plano original de superfície. Galvão e Jankowsky (1985), Martins (1988), citam que existem cinco formas comuns de empenamentos:

- a) Arqueamento: causado pela diferença na contração longitudinal entre laterais, da mesma peça de madeira (Figura 1);
- b) Encurvamento: também ocorre devido às diferenças de retração nas faces da peça quando uma delas sofre secagem mais acelerada que a outra, devido irregularidades de grã e a tensões desenvolvidas durante o crescimento da árvore (Figura 1);
- c) Encanoamento: observado quando ocorre secagem mais rápida de uma face ou quando uma face se contrai mais que a outra, mesmo com secagem uniforme, devido ao plano em que foi feito o corte da peça, radial ou tangencial (Figura 1);
- d) Torcimento: as causas podem ser as mesmas do encanoamento, podendo também ser gerado pela combinação de contrações diferentes e desvios da grã, espiralada, diagonal, intercruzada ou ondulada (Figura 1);
- e) Forma diamante: defeito característico de peças com seção quadrada, resultante da diferença entre as contrações tangencial e radial, quando os anéis de crescimento vão, diagonalmente, de um canto ao outro da seção (Figura 1).

Para Oliveira (1981), as técnicas de prevenção dos empenamentos devem ser iniciadas logo no primeiro manuseio da madeira, após a operação de desdobro. Na preparação das pilhas para secagem, conforme comentado anteriormente, recomenda-se a formação de pilhas planas, utilizando separadores com idênticas dimensões, atentando-se para o correto posicionamento dos mesmos.

2.9.3 Colapso

O colapso é uma distorção, achatamento ou esmagamento da madeira e, em casos severos, demonstra-se como um enrugamento da madeira conhecido como efeito “tábua-de-lavar” (SIMPSON, 1991; MELO, 1999). Sobretudo, o colapso é caracterizado por uma pronunciada alteração das células lenhosas que, em vez de apresentarem contorno poligonal, surgem esmagadas (MELO, 1999). É um defeito grave e deve ser evitado, o uso de programas de secagem especiais, planejados, para minimizar esse defeito é recomendado (SIMPSON, 1991).

De acordo com Simpson (1991) o colapso pode ser causado por tensões compressivas de secagem nas partes internas das tábuas que excedem a resistência de compressão da madeira ou forças de capilaridade nas cavidades celulares que estão completamente cheias de águas.

Além das características intrínsecas à madeira, fatores relacionados ao ambiente de secagem influenciam o surgimento deste defeito, conforme relatado por (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985; BRANDÃO,1989 e KLITZKE ,2007), sendo a temperatura, umidade relativa e o tempo de secagem fatores que contribuem para o surgimento do colapso na madeira. Brandão (1989) relata que a temperatura interna da madeira é a variável mais importante para a ocorrência do colapso, ficando em segundo plano a temperatura do ar secante. A intensidade de colapso aumenta com a temperatura, portanto, para diminuir sua intensidade deve-se reduzir a temperatura de secagem, pelo menos até a madeira atingir o PSF (STCP, 1990). A temperatura máxima neste início não deve ultrapassar 50°C. Em geral, a solução mais aplicada para evitar o colapso é secar a madeira a temperaturas iniciais abaixo de 45°C, uma vez que a baixas temperaturas a rigidez da parede celular é maior, o que a torna mais resistente às forças capilares (KEEY et al.,2000).

Com relação à umidade relativa, Santini e Tomaselli (1980) descrevem esta, como uma variável ambiental que propicia a ocorrência deste defeito sendo de forma indireta, pelo fato, da baixa umidade relativa proporcionar tensões residuais na madeira e que o colapso aumenta com a duração da secagem, para qualquer temperatura utilizada.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1. COLETA E PREPARO DO MATERIAL

Para realização do estudo, utilizou-se madeira de eucalipto provenientes de povoamentos florestais com idade média de 15 anos pertencentes à empresa MADEMAPE madeiras, localizada em Campina Grande do Sul-PR. As toras foram selecionadas no pátio da serraria, onde as prováveis espécies utilizadas neste estudo foram *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*, conforme a matéria prima disponível e utilizada pela empresa.

A madeira foi desdobrada na indústria MADEMAPE em serra fita simples vertical, o modelo de desdobro adotado pela empresa é o tangencial alternado que utiliza um ou mais cortes em uma face, com tombamento ou giro da tora o qual consiste em obter o maior número de peças, consequentemente um variado número de produtos, dentre eles as tábuas utilizadas neste estudo. As tábuas foram serradas nas dimensões de 25 mm x 110 mm x 2500 mm (espessura, largura e comprimento), na condição verde, posteriormente foram separadas e transportadas para o processo de secagem.

Para cada método de secagem (convencional e combinada), utilizou-se duas cargas de madeira serrada. Cada carga era composta por 60 tábuas contendo tanto peças radiais, tangencias e intermediárias com exceção da secagem ao ar livre que foi somente uma carga, com 220 tábuas. Primeiramente procedeu-se o desdobro das toras para confecção da pilha ao ar livre, e posteriormente foram cortadas as tábuas para a secagem convencional, sendo cada secagem realizada em tempos diferentes.

3.2 MASSA ESPECÍFICA APARENTE

Os ensaios para a determinação da massa específica aparente a (12%) das madeiras de eucalipto, foram realizados conforme recomendações da COPANT – 461 (1972). Para tanto, foram utilizadas 35 repetições, tendo as amostras dimensões nominais de 25 x 25 x 100 mm (radial x tangencial x longitudinal), permanecendo em câmara climática a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ de umidade relativa até a estabilização de todas as amostras em 12% de umidade.

Para a determinação da massa seca, as amostras foram colocadas em estufa de ventilação forçada a uma temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$. Para maior controle da secagem a perda de massa dos corpos de prova foi monitorada até permanecer constante.

3.3 PRÉ SECAGEM AO AR LIVRE

A secagem ao ar livre ou pré-secagem foi realizada nas dependências do Centro de Ciências Florestais e da Madeira (CIFLOMA), campus III, da Universidade Federal do Paraná. Foi selecionado um local de boa drenagem, plano e sem obstáculos à ventilação para uma boa circulação do ar.

A pilha de secagem ao ar livre foi montada sobre piquetes de concreto com travessas de madeira a uma altura 30 cm do solo, para boa circulação do ar e proteção contra possíveis agentes xilófagos. A pilha foi formada com 20 camadas de tábuas nas dimensões nominais de 1,00 x 1,20 x 2,50m (altura, largura e comprimento). As dimensões das tábuas foram de 25 mm x 110 mm x 2500 mm (espessura, largura e comprimento). Para a separação das tábuas utilizou-se sarrafos separadores de madeira aplainados e livre de defeitos com seção transversal de 24 mm x 24 mm e com comprimento 50mm maior que a largura da pilha. Foram colocados sete sarrafos por camada a uma distância de 35 cm um do outro, para minimizar incidência de defeitos (Figura 2).



FIGURA 2-PILHA DE SECAGEM AO AR LIVRE DE TÁBUAS DE *Eucalyptus* spp
FONTE: a autora (2016).

A disposição da pilha seguiu a orientação dos ventos predominantes no local de montagem da pilha. Para a cobertura da pilha foram utilizadas 4 telhas de fibra-cimento com 6 mm de espessura, com o objetivo de diminuir a incidência de raios solares e de precipitações

diretamente na pilha. Após o final da secagem, a madeira foi desempilhada e transportada para secagem combinada.

3.4 SECAGEM CONVENCIONAL

3.4.1 Características da câmara de secagem

Para a secagem da madeira foi utilizada uma câmara convencional de secagem (semi-industrial), da marca *Kiefer* com dimensão nominal útil de 0,80 x 0,80 x 4,00 m (largura x altura x comprimento), totalizando uma capacidade de aproximadamente 1m³ de madeira serrada.

O aquecimento da câmara ocorre por sistema elétrico, sendo realizado por três resistências blindadas (trocadores de calor) e dotada de circulação forçada de ar, com ventilador do tipo axial com produção de 3600 m³·h⁻¹. A umidade relativa da câmara ocorre pelo sistema de vaporização, sendo gerado por uma caldeira elétrica com capacidade de produção de vapor de 40 kg·h⁻¹ e por um conjunto de *dumpers*, localizados nas extremidades da câmara de secagem, sendo um de entrada e outro de saída de ar, respectivamente.

Para o monitoramento da secagem, a câmara é dotada de um sistema de gerenciamento automatizado no qual permite monitorar, controlar e modificar as variáveis do processo de secagem.

O controle da umidade das peças de madeira ocorre por quatro pares de pinos sensores (dois longos e dois curtos) totalizando dezesseis pinos sensores, os quais possuem o princípio de funcionamento resistivo. Os pinos foram introduzidos na madeira a 1/2 e a 1/3 da espessura das tábuas, no sentido perpendicular à grã, distantes 25 mm entre si. Portanto, cada tábua que possuía os pinos sensores, dispunha de um par introduzido a 1/2 da espessura (pino longo) e outro par de pino sensor introduzido a 1/3 (pino curto) da espessura da tábua.

3.4.2 Preparação das cargas

Para a secagem da madeira em câmara convencional, as tábuas que tinham dimensões nominais de 110 x 25 x 2500 mm (largura x espessura x comprimento) foram redimensionadas em 110 x 25 x 650 mm (largura x espessura x comprimento), sendo retiradas amostras de 25 mm em cada extremidade da peça para determinação do teor de umidade inicial. Cada carga constituiu de 60 peças, contemplando peças tangencias e radiais em proporções diferentes.

O empilhamento da madeira foi realizado em vagonete da câmara de secagem, com as tábuas dispostas no sentido transversal ao fluxo de ar da câmara de secagem, alocadas e separadas por tabiques separadores de seção quadrada de 25 mm e comprimento de 1100 mm (Figura 3).



FIGURA 3-EMPILHAMENTO DA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp PARA SECAGEM EM ESTUFA CONVENCIONAL
FONTE: a autora (2016).

Para verificar a perda de umidade das peças, bem como, as variações dimensionais em largura e espessura ao longo do ciclo de secagem, suas massas e dimensões foram mensuradas diariamente intercaladas por 12 horas ao longo de todo o período da secagem. O fluxo de ar dentro da câmara foi de aproximadamente 2,0 m/s.

3.5 MONITORAMENTO DO TEOR DE UMIDADE

3.5.1 Preparação das amostras de controle

Para acompanhar o teor de umidade durante a secagem ao ar livre foram utilizadas amostras de controle para cada carga com dimensões de 25 mm x 110 mm x 500 mm (espessura, largura e comprimento), totalizando seis amostras controle (Figura 4). Essas amostras foram confeccionadas a partir de tábuas utilizadas no empilhamento, tendo seus topos impermeabilizados com adesivo (cola branca), para as amostras não perderem água rapidamente, seguindo recomendação de Simpson (1991).

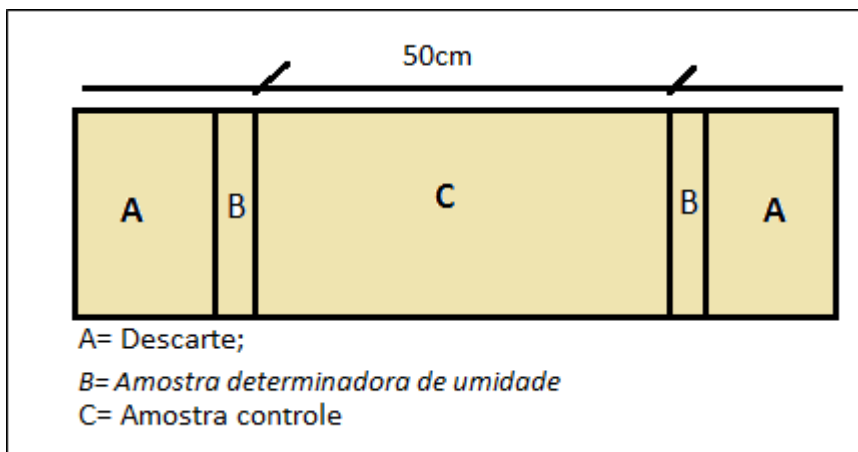


FIGURA 4-CONFECÇÃO DAS AMOSTRAS DE CONTROLE

FONTE: a autora (2016).

À medida que as amostras de controle foram retiradas das tábuas de origem, estas foram imediatamente pesadas em balança de precisão de 0,01 g para determinação do teor de umidade inicial.

Antes do início do processo de secagem, determinou-se o teor de umidade inicial de cada amostra onde empregou-se o método gravimétrico, descrito em diversos manuais de secagem (RASMUSSEN, 1961; PRATT, 1974; GALVÃO e JANKOWSKY, 1985), em que as amostras úmidas foram submetidas à secagem em estufa a $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, até atingirem massa constante, conforme as recomendações da Norma Brasileira Regulamentadora – NBR (7190) da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1997). Em seguida, foi aplicada a Equação 3 para obtenção do teor de umidade inicial (TU_i).

$$\text{TU}_i = \left(\frac{\text{Mu} - \text{Ms}}{\text{Ms}} \right) * 100 \quad (3)$$

Onde:

TU_i = teor de umidade inicial (%);

Mu = massa úmida da amostra (g);

Ms = massa seca da amostra (g).

As amostras de controle foram distribuídas na pilha da seguinte forma: três amostras localizadas na entrada do ar e três amostras localizadas na saída do ar, para obter-se uma distribuição uniforme e representativo das mesmas. O monitoramento do teor de umidade foi realizado a cada dois dias, sempre no mesmo horário, utilizando-se uma balança eletrônica de precisão de 0,01 g até a obtenção do teor de umidade final desejado. A perda de umidade neste ensaio foi acompanhada com base na Equação 4 (BRANDÃO, 1989).

$$UA = \frac{[MA*(UI+100)]}{MI} - 100 \quad (4)$$

Onde:

UA = teor de umidade do corpo de prova em um instante qualquer (%);

MA = massa do corpo de prova nesse mesmo instante (g);

UI = umidade inicial do corpo de prova (%);

MI = massa inicial do corpo de prova (g).

3.5.1 Teor de umidade das tábuas na pilha

Foram selecionadas 50 tábuas do lote, para avaliação da umidade da pilha e dos defeitos de secagem. Estimou-se o teor de umidade inicial das tábuas pelo método gravimétrico e obteve-se o peso inicial de cada tábua. As tábuas foram alocadas na pilha de forma aleatória, onde ao final da secagem foram obtidos os teores de umidades iniciais, por meio da estimativa da massa seca das tábuas (Equação 5) e determinados os teores de umidade final após a secagem ao ar de cada tábua, assim como os defeitos decorrentes da secagem ao ar livre.

$$ME\% = \frac{(100 \times MI)}{(100 + UI)} \quad (5)$$

Onde:

ME% = massa seca estimada (g);

MI= Massa inicial das tábuas (g);

UI= Umidade inicial das amostras (%)

Essas tábuas de medição após o final da secagem ao ar foram armazenadas para posteriormente proceder a secagem convencional, dando origem à secagem combinada.

Na secagem convencional, para o monitoramento da umidade foi utilizada balança digital (0,01g). Já o acompanhamento da variação dimensional (largura, espessura e comprimento) foi realizado através de medições com auxílio de um paquímetro de 0,01 mm de precisão, sendo que as medidas foram obtidas a 50 mm de comprimento das extremidades das peças.

Para o controle gravimétrico as amostras de controle foram alocadas na última camada da pilha, sendo seis tábuas por carga de secagem, totalizando 12 amostras. O controle do teor de umidade também foi acompanhado pelos pinos sensores.

3.6 OBTENÇÃO DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS

Para o monitoramento das variáveis ambientais durante a secagem ao ar livre, foi instalado próximo à pilha um psicrômetro analógico. Para maior precisão dos resultados também se obteve os dados da Estação Meteorológica do Paraná (SIMEPAR). As variáveis medidas foram: velocidade do vento (m/s); temperatura máxima e mínima (°C); umidade relativa do ar (%); umidade de equilíbrio (%) e precipitação (mm). As variáveis foram obtidas diariamente para acompanhamento da sua influência na secagem ao ar livre.

3.7 TAXA DE SECAGEM

A taxa de secagem, que corresponde à razão entre uma quantidade de água evaporada e a área total da peça em um determinado tempo, foi determinada através da diferença entre duas medições. A taxa de secagem foi determinada para os dois métodos de secagem e para a secagem combinada. Para tanto, utilizou-se os dados de umidade obtidos durante as secagens. O cálculo da taxa de secagem está de acordo com as recomendações de Simpson (1991) e Severo (2000).

Neste trabalho foram avaliadas as seguintes taxas de secagem: desde a condição de umidade verde até 30% (taxa capilar), de verde a 5% e de 30% até 5% (taxa higroscópica), para secagem ar ar livre, convencional e combinada. Para tal, utilizou-se, a equação 6.

$$T_s = \frac{T_{Ui} - T_{Uf}}{t} \quad (6)$$

Onde:

T_s = taxa de secagem ($U\% \cdot h^{-1}$)

T_{Ui} = teor de umidade inicial

T_{Uf} = teor de umidade final

3.8 ELABORAÇÃO DO PROGRAMA DE SECAGEM

Foi elaborado um programa de secagem, em duas condições: um a partir da madeira verde e o outro a partir da madeira pré-seca (secagem ao ar livre). O programa de secagem para a madeira pré-seca foi elaborado baseado no primeiro programa (madeira verde), onde foi estabelecido o teor de umidade da madeira pré-seca e deu-se sequência a elaboração do programa com todas as variáveis.

Para elaboração do programa utilizou-se as metodologias apresentadas por Ciniglio (1998) e Jankowsky (2009), denominada de secagem drástica, processo no qual baseia-se em pequenas amostras de madeiras submetidas à secagem em estufa com circulação forçada de ar a 100°C, essas apresentam comportamento proporcional aos que possivelmente ocorreriam na secagem convencional. Os principais parâmetros avaliados são temperatura inicial, temperatura final, e potencial de secagem.

Os parâmetros do programa de secagem foram determinados com base nos valores médios das amostras, aplicando-se as equações da Tabela 1, definindo-se a temperatura inicial (TI), a temperatura final (TF) e o potencial de secagem (PS).

TABELA 1-PARÂMETROS PARA DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS DOS PROGRAMAS DE SECAGEM

Parâmetro	Equação			
Temperatura inicial	27,9049 +	0,7881 * T2 +	419,0254* V1 +	1,9483 * R2
Temperatura final	49,2292 +	1,1834 * T2 +	273,8685 *V2 +	1,0754 * R1
Potencial de secagem	1,4586 -	30,4418 * V3 +	42,9653 * V1 +	0,1424 * R3

Onde: T2 = tempo de secagem da umidade inicial a 30% (h); V1 = velocidade de secagem até 5% (g/h); V2 = velocidade de secagem até 30% (g/h); V3 = velocidade de secagem de 30 a 5% (g/h); R1 = rachadura de topo até 5% (Un.); R2 = rachadura de topo até 30% (Un.); R3 = rachadura de topo de 30 a 5% (Un.).

FONTE: Ciniglio (1998).

Com base nos parâmetros encontrados pelas equações da Tabela 2, o programa de secagem foi elaborado com o auxílio de cartas psicrométricas.

Durante o ensaio acompanhou-se a perda de massa das amostras através da pesagem em balança digital com precisão de 0,01 g, e para acompanhar as aberturas das rachaduras de topo e superfície, quando necessário, utilizou-se de lâminas calibradoras graduadas de 0,00 a 1,00 mm.

A avaliação dos defeitos gerados nas amostras, foi realizada com base nas rachaduras de topo e de superfície. As rachaduras de superfície foram avaliadas quanto ao comprimento e largura (mm), seguindo as recomendações NBR 14806/2002 (Madeira serrada de eucalipto – Requisitos).

3.9 CONTRAÇÃO DA MADEIRA

Foram determinadas as contrações das amostras ensaiadas para a elaboração do programa de secagem, referentes às metodologias estudadas, sendo determinadas as contrações em largura, espessura e em volume (Equação 7). Foi desconsiderada a contração longitudinal (comprimento) das amostras.

$$\text{Contração (\%)} = \frac{\text{Dimensão verde (V)} - \text{Dimensão seca (V)}}{\text{Dimensão verde (V)}} * 100 \quad (7)$$

3.10 INCIDÊNCIA DE DEFEITOS

A avaliação dos defeitos manifestados nas peças ocorreu em todas as etapas para ambos os métodos (secagem ao ar livre, secagem combinada e secagem convencional). A primeira ocorreu antes do processo de secagem, e a segunda após o término da mesma, para que não fossem obtidos resultados distorcidos, visto que defeitos como rachaduras e empenamentos podem ser decorrentes da atividade de desdobro da madeira. Foram avaliadas todas as peças submetidas à secagem, correspondendo a 60 tábuas por lote, sendo dois lotes por método de secagem, e para secagem ao ar livre 50 tábuas.

Os resultados obtidos da avaliação realizada anteriormente à aplicação da secagem foram comparados com aqueles observados na avaliação após a secagem foi verificado se o defeito se manifestou ou não em virtude da realização da secagem.

A mensuração dos defeitos proporcionados pela secagem (empenamentos, rachaduras e colapso) foi realizada conforme recomendações da NBR 14806/2002 os quais compreenderam a determinação de empenamentos e rachaduras. Para a quantificação de colapso, a mensuração procedeu-se conforme recomendações de Ciniglio (1998), avaliando-se sempre a pior face.

a) Rachaduras de superfície

As rachaduras de superfície presentes nas tábuas foram avaliadas visualmente, antes e após a realização da secagem, quanto à presença ou ausência. Foi quantificado o número de peças em que tal defeito foi verificado, e os resultados foram apresentados na forma de percentagem do número de peças que apresentaram o defeito em relação ao total.

b) Rachaduras de topo

As rachaduras de topo foram avaliadas e classificadas segundo recomendação da norma referida anteriormente. As mesmas foram mensuradas através do somatório dos seus comprimentos individuais em cada face (Equação 8). Para tal, foi obtido o IRT para as duas faces, e considerou-se a pior face de cada peça para a avaliação neste aspecto.

$$IRT = \frac{Lr1+Lr2+Lrn}{L1} * 100 \quad (8)$$

Onde:

IRT = Índice de Rachaduras de Topo (%);

Lrn = comprimento individual das rachaduras (mm);

L1 = comprimento da peça (mm).

As rachaduras foram mensuradas com auxílio de um paquímetro digital, com precisão de 0,01 cm. Para facilitar a avaliação após a secagem, as rachaduras foram marcadas com lápis de anilina, durante as avaliações, após o desdobro. Na Figura 5, é apresentado um modelo esquemático para demonstração do procedimento adotado para quantificação do IRT.

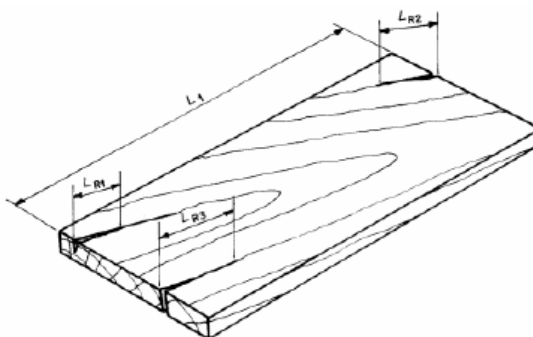


FIGURA 5-MENSURAÇÃO DOS DEFEITOS PARA RACHADURAS
FONTE: ABNT 14806 (2002).

As peças que apresentaram IRT igual ou inferior a 10% foram classificadas como primeira, segunda ou terceira classe, visto que, para serem classificadas em uma dessas classes, deve-se considerar as demais condições exigidas. As peças com IRT entre 10% e 20% foram classificadas como de quarta classe, observando a restrição quanto ao número de peças. Por fim, as que apresentaram IRT acima ou igual a 20% foram consideradas defeituosas.

c) Arqueamento.

O arqueamento foi determinado a partir da flecha central formada entre a face curva da madeira e uma mesa plana alinhada fixando o topo das tábuas o procedimento é mostrado na Figura 6.

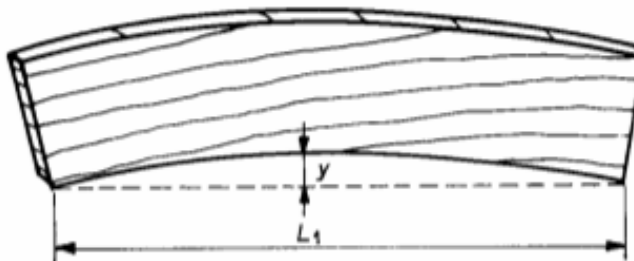


FIGURA 6-MENSURAÇÃO DO ARQUEAMENTO EM TÁBUAS DE *Eucalyptus* spp
 FONTE: ABNT 14806 (2002).

O arqueamento foi determinado a partir da Equação 9, e as peças que apresentaram um valor superior a 5 mm.m^{-1} foram classificadas como defeituosas, observando a restrição quanto ao número máximo de peças por lote para a primeira, segunda e terceira classes, e sem restrição para a quarta classe.

$$A = \frac{fa}{L1} \quad (9)$$

Onde:

A= arqueamento (mm.m^{-1});

fa= flecha de arqueamento da peça (mm);

L1= comprimento da peça (m).

d) Encurvamento

O encurvamento foi determinado utilizando a mesma metodologia descrita para o arqueamento e mostrada esquematicamente na Figura 7

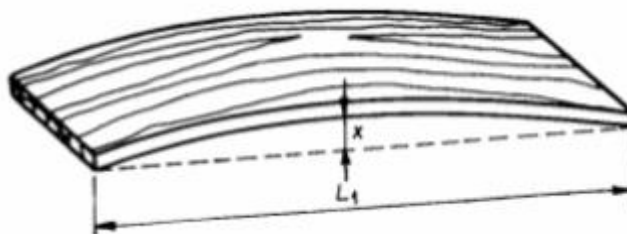


FIGURA 7-MENSURAÇÃO DO ENCURVAMENTO EM TÁBUAS DE *Eucalyptus* spp
 FONTE: ABNT 14806 (2002).

O encurvamento foi determinado com a mesma equação que o arqueamento (Equação 9), e as peças que apresentaram um valor superior a 5 mm.m^{-1} foram classificadas como defeituosas, observando a restrição quanto ao número máximo de peças por lote para a primeira, segunda e terceira classes, e sem restrição para a quarta classe.

O encanoamento foi obtido através da mensuração direta da flecha. Considerou-se determinada peça como defeituosa se a mesma apresentasse uma flecha maior do que 4 mm, de acordo com a norma. Assim como para os demais empenamentos, observou-se a restrição quanto ao número máximo de peças por lote para a primeira, segunda e terceira classes, e sem restrição para a quarta classe. O procedimento utilizado para a avaliação do encanoamento é apresentado na Figura 8.



FIGURA 8-MENSURAÇÃO DO ENCANOAMENTO EM TÁBUAS DE *Eucalyptus* spp
FONTE: ABNT 14806 (2002).

e) Colapso

Em um primeiro instante, a presença de colapso foi avaliada visualmente nas peças. Verificada a manifestação deste defeito, o mesmo foi avaliado através da redução da espessura nominal útil. O grau de deformação foi calculado de acordo com as recomendações de Galvão; Jankowsky (1985), conforme a Figura 9.

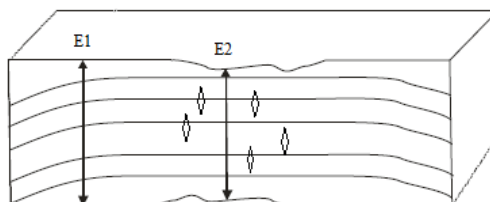


FIGURA 9-MENSURAÇÃO DO COLAPSO EM TÁBUAS DE *Eucalyptus* spp
FONTE: Galvão e Jankowsky (1985).

A determinação do colapso foi realizada pela diferença de espessuras da amostra, sempre considerando a menor espessura (Equação 10). As amostras que apresentaram este defeito, foram resserradas para verificação da ocorrência de rachaduras internas.

$$\text{Colapso (dc)} = E1 - E2 \quad (10)$$

Onde:

Colapso = grau de deformação do colapso (mm);

E1 = maior espessura (mm);

E2 = menor espessura (mm).

Posteriormente, o colapso foi classificado de acordo com a recomendação da *European Drying Group*, que é apresentado na Tabela 2.

TABELA 2-GRAU DO COLAPSO

Grau do Colapso	Redução na espessura (d_c), representando o nível atual de colapso
Severo	d_c menor ou igual a 6 mm (ou removido com o aplainamento)
Moderado	d_c menor ou igual a 4 mm (ou removido com o aplainamento)
Leve	d_c menor ou igual a 2 mm (ou removido com o aplainamento)

FONTE: Adaptado de Welling (1994).

3.11 AVALIAÇÃO DA SECAGEM

As avaliações da secagem das cargas em todos os métodos foram realizadas de acordo com a umidade final, gradiente de umidade, presença de tensões de secagem e incidência de defeitos. Estas avaliações foram realizadas após 24 horas do término da fase de resfriamento, segundo recomendações de GALVÃO; JANKOWSKY, (1985).

Para a avaliação da umidade final, gradiente de umidade e tensões de secagem utilizou-se a metodologia proposta por (SIMPSON, 1991), conforme ilustração da Figura 10 onde foram utilizadas para cada tratamento 20 amostras por carga, para cada método estudado.

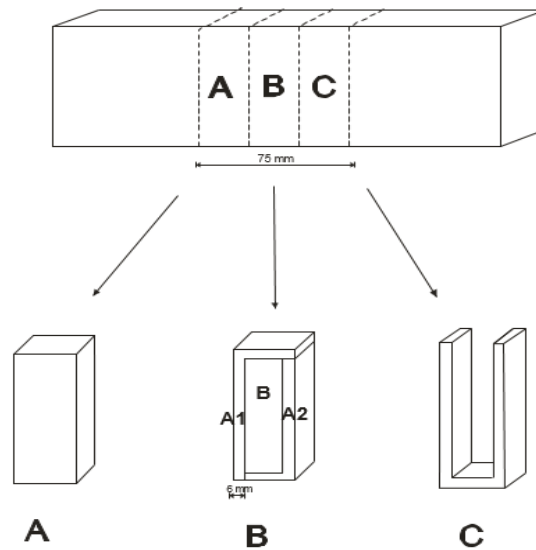


FIGURA 10- AMOSTRAS PARA DETERMINAÇÃO DA UMIDADE FINAL (A), GRADIENTE DE UMIDADE (B) E TENSÕES DE SECAGEM (C) EM TÁBUAS DE *Eucalyptus* spp
 FONTE: Batista (2009).

Para cada tábua selecionada de forma aleatória em cada carga de secagem foram cortadas três amostras (A, B e C) com 25 mm de largura. Todas amostras demarcadas com a letra A foram utilizadas para a determinação da umidade final. Já as amostras demarcadas com a letra B foram utilizadas para a avaliação do gradiente de umidade.

As amostras demarcadas em A1(MCSs) e A2 (MCSi) foram utilizadas para a determinação da umidade da superfície das tábuas, enquanto, as amostras denominadas em A (MCC) foram utilizadas para a determinação da umidade no centro da peça, conforme a Equação 11.

$$\Delta MC (C - S) = MCC - \frac{(MCSi + MCSs)}{2} \quad (11)$$

Onde:

$\Delta MC (C-S)$: Gradiente de umidade entre centro e a superfície (%);

MCC: Teor de umidade no centro da peça (%);

MCSi: Teor de umidade na superfície inferior da peça (%);

MCSs: Teor de umidade na superfície superior da peça (%)

Para as avaliações das tensões de secagem foram utilizadas as amostras marcadas com a letra C (Figura 11), em que foram classificadas em madeira livre de tensões, madeira com tensões (suave e forte).

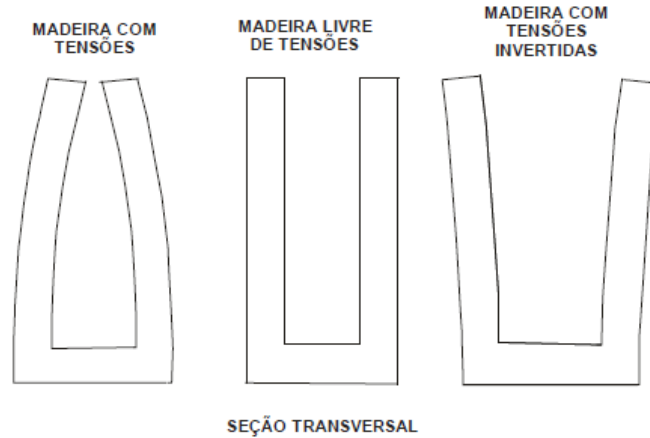


FIGURA 11-AMOSTRAS PARA A AVALIAÇÃO DAS TENSÕES DE SECAGEM EM TÁBUAS DE *Eucalyptus* spp.
 FONTE: Simpson (1991).

Quando observado o tensionamento de secagem, decidiu-se somente classificar as tábuas tensionadas em tensionamento suave e forte. O tensionamento suave foi aquele nos quais os extremos dos garfos não se tocavam, em contraposição ao tensionamento forte foi aquele onde se tocavam. Esta diferenciação pode ser evidenciada nas Figura 12.

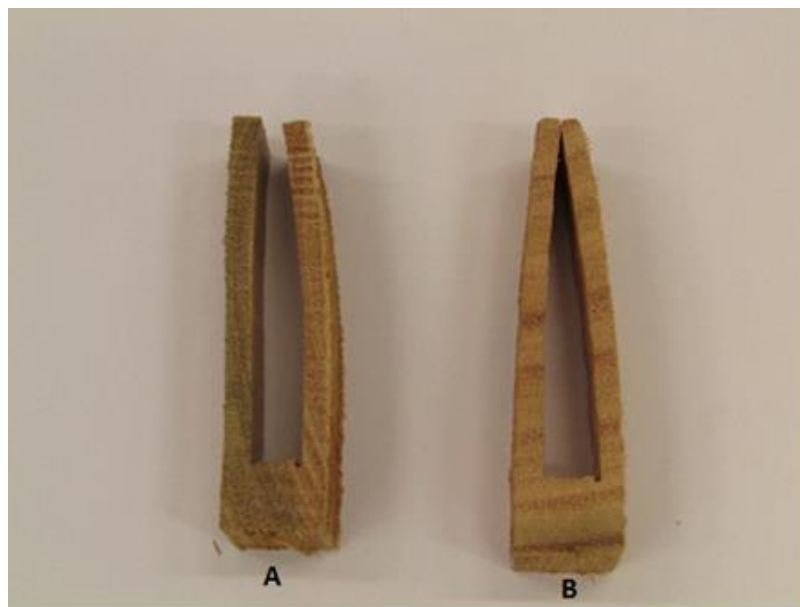


FIGURA 12-CLASSIFICAÇÃO DAS TENSÕES DE SECAGEM NA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp .
 Nota: A= tensionamento suave; B=tensionamento forte.

3.12 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística foi efetuada utilizando-se da estatística descritiva, análise de variância e análise de regressão. As variáveis referentes à qualidade da madeira foram analisadas estatisticamente através da Análise de Variância (ANOVA) e teste de “Tukey” ao nível de 95% de probabilidade. Aplicou-se o teste de “Bartlett” para verificar a homogeneidade das variâncias, as análises seguiram metodologia proposta por STEEL; TORRIEL (1960).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 SECAGEM AO AR LIVRE

4.1.1 Teor de umidade inicial e massa específica aparente

Na Tabela 3 encontram-se os valores médios do teor de umidade inicial das amostras de controle (6 amostras), das amostras grandes distribuídas na pilha (50 amostras) e a massa específica aparente média a 12% de umidade da madeira de *Eucalyptus* spp.

TABELA 3-VALORES MÉDIOS DE TEOR DE UMIDADE E MASSA ESPECÍFICA DA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp

Variáveis	Média	CV%	F
T.U inicial amostras grandes (%)	94,08%	24,57	0,9144 ^{ns}
T.U inicial amostras de controle (%)	88,18 %	17,81	
Massa específica a 12%	0,61 g.cm ⁻³	13,58	

Nota: ns: não significativo pelo teste de tukey ($p \geq 0,05$); C.V%= coeficiente de variação

Nota-se que os valores médios de umidade inicial das amostras de controle e das amostras grandes para madeira de eucalipto, não apresentaram diferença estatística entre si (Tabela 3) sendo, portanto, recomendado o uso de pequenas amostras para o controle da perda de umidade durante a secagem. Tal metodologia vem sendo adotada por diversos autores, Galvão e Jankowsky (1985); Simpson (1991); Klitzke (2007), entre outros.

A variação observada (6 pontos percentuais) entre o teor de umidade das amostras grandes e das amostras de controle, pode ser considerada normal, pois a madeira serrada foi proveniente de várias árvores que não possuíam controle do tempo de derrubada, transporte e de estocagem no pátio, além da madeira ficar exposta a secagem após o desdobro. Os resultados médios encontrados de 94,08% e 88,01% estão de acordo com o teor de umidade inicial para o gênero, sendo as espécies utilizadas *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*. Os coeficientes de variação são considerados elevados (PIMENTEL GOMES, 2000) e indicam grande dispersão dos dados o que poderia justificar a diferença encontrada na umidade inicial.

As amostras grandes apresentaram um teor de umidade inicial máximo de 149,18% e as amostras de controle apresentam um valor máximo de 110,28%, essa diferença no teor de umidade acabou causando um teor de umidade médio maior para as amostras grandes.

Os teores de umidade inicial encontrados estão de acordo com os estudos de diversos autores, Carmo (1996) encontrou variação de umidade inicial para *Eucalyptus grandis* de 50 a 133% assim como Oliveira et al. (2005) que encontraram valores médios variando de 62 a 102% para teor de umidade inicial de sete espécies de eucalipto. Por outro lado, outros autores encontraram valores inferiores ao deste estudo. Susin (2012) obteve valores para o teor de umidade inicial para *Corymbia citriodora* (50,64%), *Eucalyptus robusta* (79,36%) e *Eucalyptus saligna* (64,70%). Klitzke e Batista (2010) obtiveram 63,49% para *E. saligna* já Stangerlin et al. (2009) obtiveram para madeira de *E. saligna* 75,62% de teor de umidade inicial. A alta variação encontrada no teor de umidade inicial pode ser explicada devido à grande variação de umidade da madeira de eucalipto em “estado verde”, podendo oscilar entre 60 a 100% (BAUER, 2003).

A massa específica aparente média a 12% obtida foi de 0,61 g/cm³. Segundo Oliveira et al. (2009) o resultado está dentro da faixa de variação para o gênero *Eucalyptus*, sendo classificada pelo IBAMA (2014) como madeira de média massa específica. O valor médio obtido está de acordo aos encontrados na literatura (TRUGILHO et al., 1996; PEREIRA et al., 2000; STANGERLIN et al., 2009; BATISTA, 2009). Porém podem ser encontrados resultados acima, como Stangerlin (2009), que obteve para *E. saligna* 0,69 g/cm³ para massa específica aparente e outros resultados abaixo como Rocha (2000) que observou valor médio de 0,56 g/cm³ para o *E. grandis*.

A massa específica é uma propriedade física da madeira que exerce grande influência na taxa de secagem, no teor de umidade inicial e na contração da madeira, principalmente em madeiras chamadas refratárias e de baixa permeabilidade como eucalipto, exigindo muito cuidado na condução da secagem. A matéria-prima processada pela indústria (MADEMAPE) hoje é comercializada no mercado de construção civil, indústria de painel EGP (*Edge Glued Panel*) e moveleira. Contudo, para uma maior segurança na sua utilização, faz-se necessário avaliações das suas propriedades mecânicas antes de qualquer definição, pois de acordo com Silva (2002), a massa específica, quando analisada de forma isolada, não representa um bom e seguro parâmetro para uma definição de usos da madeira.

4.1.2 Teor de umidade final e curva de secagem

Na Tabela 6 encontram-se os valores médios do teor de umidade final das amostras de controle, das amostras grandes distribuídas na pilha e dos dias de secagem para a madeira de *Eucalyptus* spp.

TABELA 4-VALORES MÉDIOS DE TEOR DE UMIDADE FINAL E TEMPO DE SECAGEM AO AR LIVRE DA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp

Variáveis	Média	CV%	F
T.U. final amostras grandes (%)	23,16 %	8,74	5,2964*
T.U. final, amostras de controle (%)	21,13 %	6,97	
Dias de secagem	65		

Nota: * significativo pelo teste de tukey ($p \geq 0,05$); CV% = Coeficiente de variação %

Os resultados médios do teor de umidade final das amostras grandes e das amostras de controle diferiram estatisticamente entre si, onde as amostras grandes apresentaram um valor médio de umidade final 2% superior às amostras de controle pequenas. Apesar de diferentes estatisticamente os resultados são próximos, comprovando a eficiência na utilização de amostras de controle sugeridas por diversos autores. Segundo Kollmann e Côté (1968) a permeabilidade no sentido longitudinal é cerca de 30 vezes maior que no sentido perpendicular às fibras, portanto a secagem dos topos das amostras de controle com apenas 50cm de comprimento foi eficiente e fez com que as amostras de controle pequenas tivessem o mesmo tempo de secagem das amostras grandes.

Tal diferença pode estar relacionada com a distribuição das amostras grandes na pilha de secagem, que foram distribuídas aleatoriamente, onde tiveram grande número de peças alocadas no meio da pilha (local de difícil secagem), enquanto que as amostras de controle pequenas foram alocadas somente nas bordas laterais da pilha, podendo secar com maior facilidade. Klitzke (2005) afirma que normalmente a madeira situada nas bordas das pilhas e na parte superior da pilha, por estarem mais expostas ao ar e a radiação solar a secagem é mais rápida. Enquanto nas partes inferiores das pilhas onde o ar é de maior umidade e menor temperatura, a secagem é mais lenta, justificando o menor teor de umidade final das amostras de controle.

Os coeficientes de variação encontrados para as amostras grandes e pequenas são considerados baixos, e indicam uma alta precisão dos dados, conforme (PIMENTEL GOMES, 2000). As amostras grandes apresentaram um teor de umidade final máximo de 25,60% e as amostras de controle apresentaram teor de umidade final máximo de 22,30%, essa diferença no teor de umidade pode ter causado um teor de umidade final médio maior para as amostras grandes.

A secagem foi considerada finalizada quando as amostras de controle pequenas atingiram o teor de umidade final em torno de 23%. As amostras foram pesadas a cada três dias do início, gerando a partir dos dados a curva de secagem que pode ser observada na Figura 13.

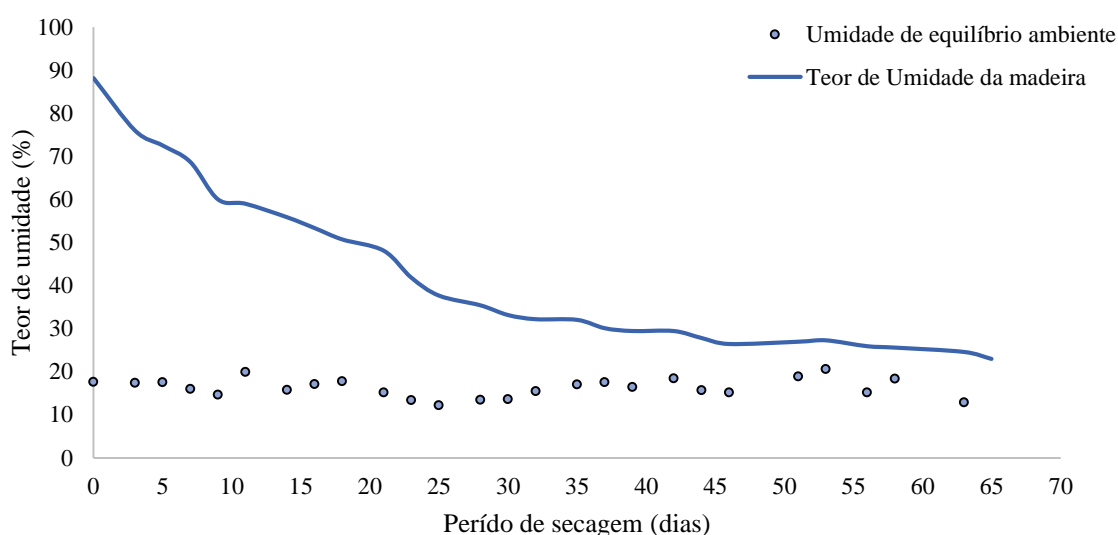


FIGURA 13-CURVA DE SECAGEM AO AR LIVRE E UMIDADE DE EQUILÍBRIO DO AMBIENTE PARA SECAGEM DA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp.

A pré secagem ao ar da madeira de eucalipto foi finalizada com 65 dias (Figura 13), sendo iniciada no dia 13 de maio e finalizada no dia 20 de julho de 2015, compatível com as condições ambientais decorrentes do período de outono-inverno para a cidade de Curitiba-PR. O teor de umidade final médio obtido foi de 23%, apresentando uma amplitude de variação entre 19,1 e 25,19% de umidade. Os valores observados apresentam a mesma tendência encontrada por Duarte et al. (2015), que durante a primavera, obtiveram 63 dias de secagem ao ar livre para madeira de eucalipto, na cidade de Frederico Westphalen- RS para que seu teor de umidade inicial de 54% atingisse 15,5%. Por outro lado, o tempo de secagem foi superior aos observados por Rosso (2006) que obteve teor de umidade final de 25% em 47 dias de secagem ao ar livre na cidade de Santa Maria-RS, no período do inverno.

Nota-se na Figura 13 que a madeira apresentou taxa constante na perda de umidade apesar de serem constatados períodos de chuva intermitentes durante a secagem. A partir do

35° dia ocorreu uma redução drástica da velocidade de secagem com certa estabilização da umidade, levado 30 dias para a umidade cair de 32% de umidade para 23%. Esta dificuldade foi causada pela retirada em grande parte da água de difusão da madeira (TOMASELLI, 1981; JAKOWSKY, 1996; KLIZTKE, 2007). Este período, porém, fundamental para que ocorresse maior homogeneidade da umidade entre as tábuas, ficando comprovado este resultado quando observado o baixo coeficiente de variação obtido no teor de umidade final das tábuas.

Pode-se destacar também o curto período que as tábuas levaram para atingir o PSF (ponto de saturação das fibras, próximo aos 30% de teor de umidade), sendo esse de 39 dias, durante este período de secagem, ocorreram altas temperaturas, atípicas dessa época (outono-inverno), que favoreceram a secagem reduzindo o teor de umidade da madeira de forma mais acelerada. Em nenhum momento houve um ganho de massa das amostras de controle, nem durante a remoção da água livre e nem na remoção da água de impregnação, demonstrando que a perda de umidade ocorreu normalmente, períodos chuvosos e mais úmidos não proporcionaram aumento no teor de umidade da madeira.

Segundo Ponce e Watai (1985), Forest Products Laboratory (1999), Klitzke (2007), vários fatores podem influenciar na velocidade de secagem ao ar livre, dentre eles podem ser destacados: a espécie, a espessura das tábuas, o teor de umidade inicial, o local, entre outros. Por estas razões diferentes tempos de secagem para a madeira de eucaliptos são observados. Stangerlin et al. (2009) utilizando *C. citriodora* verificou que foram necessários 58 dias para reduzir o teor de umidade de 60% para 20,7% no período do inverno, utilizando a secagem ao ar. Nesse mesmo período os mesmos autores necessitaram de 104 dias para atingir 20,3% de teor de umidade final com teor de umidade inicial de 73,6% para o *E. tereticornis*, enquanto que para o *E. saligna* foram necessários 33 dias para redução no teor de umidade de 75,6% para 20,75% de teor de umidade final. Todos os autores citados obtiveram um teor de umidade final em torno de 20%, estando acima da umidade de equilíbrio da região.

Ainda na análise da curva de secagem (Figura 13) nota-se que as tábuas ao final da secagem apresentaram um teor de umidade acima da umidade de equilíbrio do ambiente (UEa), a madeira ficou com 23,0% numa UEa de 15,8%. Esses resultados foram satisfatórios principalmente pelo fato do objetivo da secagem ao ar foi para realizar uma pré-secagem, ou seja, uma secagem intermediária, sendo necessário finalizar a secagem em estufa convencional até um teor de umidade final de 10%. Segundo Denig et al. (2000) e Reeb (1997) a pré secagem tem como objetivo retirar a água livre reduzindo a umidade da madeira em torno de 25 a 30% para conseqüentemente reduzir o tempo de secagem em estufa, para que isso aconteça eficientemente é necessário obter um teor umidade homogêneo entre as tábuas.

A umidade de equilíbrio média foi calculada em função dos dados coletados da estação meteorológica, resultando em 16,3 %. Este valor está de acordo com a umidade de equilíbrio para cidade de Curitiba-PR que é de 16,7 % (GALVÃO, 1975). É difícil, simplesmente por método natural, alcançar conteúdos de umidade menores aos correspondentes a umidade de equilíbrio da região, justificando o uso da secagem ao ar livre como uma pré secagem, para posteriormente finalizar a secagem até o teor de umidade final desejado. De acordo com Ponce e Watai (1985), o teor de umidade final geralmente está em função do uso final a que a madeira se destina.

Ainda pode-se ressaltar uma relação interessante entre a umidade da madeira na entrada e na saída do ar na pilha (Tabela 5).

TABELA 5-ANÁLISE DE VARIÂNCIA ENTRE AS UMIDADES NA PILHA PARA SECAGEM AO AR LIVRE NA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp

Fonte de Variação (FV)	F
TU na entrada do ar	0,2381 ^{ns}
TU na saída do ar	

Nota: ^{ns} não significativo ao nível de 5% ($p \geq .05$)

Verifica-se que não houve diferença estatística no teor de umidade, ocorrendo somente uma pequena diferença nas curvas (Figura 14), sendo que na saída do ar da pilha (Figura 2) o teor de umidade foi constantemente inferior a partir de 55% de umidade, resultado naturalmente esperado. Segundo Santini e Tomaselli (1997) durante a secagem ocorre uma variação entre a umidade da madeira na entrada e na saída de ar na pilha (delta T), essa variação vai depender de variáveis como temperatura, umidade relativa e principalmente da velocidade do ar.

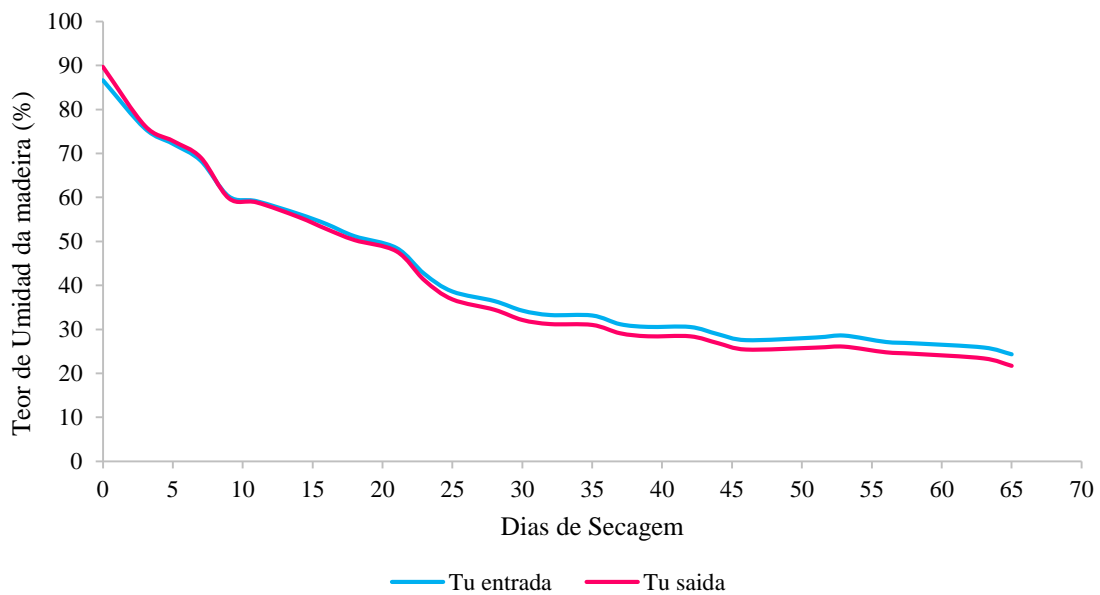


FIGURA 14-VARIAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE NA ENTRADA DO AR E NA SAÍDA DO AR NA PILHA DE MADEIRA DE *Eucalyptus* spp, NA SECAGEM AO AR LIVRE.

A diferença de umidade na largura da pilha entre a entrada e a saída do ar obtida ao final da secagem ao ar livre foi em média de 2,6%, onde a umidade média da madeira na entrada de ar foi 24,3% e na saída foi de 21,7%, resultando no teor de umidade médio de 23% entre as tábuas.

4.1.3 Variáveis ambientais na secagem ao ar livre

Na Figura 15, são apresentadas as oscilações de temperatura média (T°), umidade relativa do ar média (UR%), precipitação pluviométrica média (mm) e velocidade do vento média ($m.s^{-1}$), monitoradas diariamente, durante a secagem ao ar livre da madeira de eucalipto.

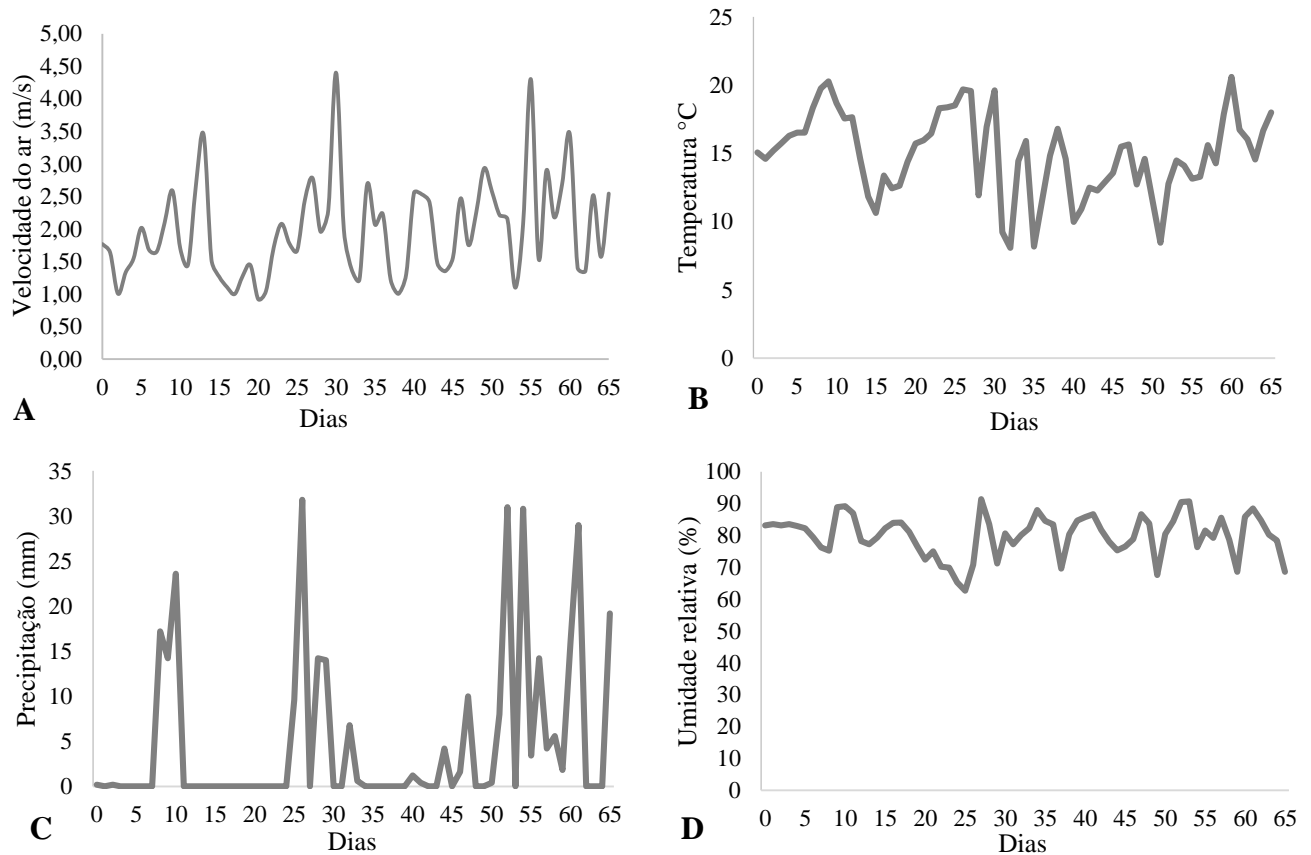


FIGURA 15-A: VARIAÇÃO MÉDIA DIÁRIA DE VELOCIDADE DO AR (M/S); B: VARIAÇÃO MÉDIA DIÁRIA DE TEMPERATURA (T°) C: VARIAÇÃO MÉDIA DIÁRIA DE PRECIPITAÇÃO (MM); D: VARIAÇÃO MÉDIA DIÁRIA DE UMIDADE RELATIVA (UR %), DURANTE A SECAGEM AO AR LIVRE

Observa-se que no período de secagem (maio a julho/2015) (Figura 15) que houve predomínio de maiores médias de temperaturas e maiores velocidades do ar e baixa precipitação. O período de secagem pode ser considerado normal para o gênero *Eucalyptus*, mesmo com a umidade relativa sendo acima de 80%. Quando a temperatura e a umidade relativa do ar permanecerem aproximadamente constantes, é a circulação do ar o fator determinante na velocidade de secagem, por isso é importante levar em conta a formação da pilha no sentido do vento predominante (KLITZKE, 2005).

Nota-se que a velocidade do vento (A) teve alguns picos elevados, chegando em alguns dias a 4,5 m/s, valor máximo encontrado, que corresponde a 16,2 km/h. Já os valores mínimos de velocidades do ar diárias foram de 1,10 m/s ou 3,96 km/h. Esses resultados são extremamente normais pois são referentes a médias diárias. Segundo a classificação de Beaufort (1979 citado por SOARES, 2015), as velocidades máximas e mínimas do vento encontradas neste estudo estão inseridas na escala 3, onde os ventos são classificados como suaves e muito fracos. Deve-

se salientar que o fluxo de ar na pilha não corresponde aos mesmos valores diários de velocidade do vento referente a média do dia obtidos pela estação meteorológica, sendo que na pilha a média para o fluxo de ar encontrada com anemômetro foi de 0,5m/s, isso ocorre pelo fato do vento apresentar um fluxo turbulento e aleatório sem um direcionamento pré estabelecido. Para fins de comparação Stangerlin (2009), no período de setembro, para região de Santa Maria-RS observou condições suaves de secagem ao ar livre para madeira de *C. citriodora*, encontrando nas análises das variáveis ambientais condições semelhantes à deste estudo.

4.2. TAXA DE SECAGEM DA MADEIRA SECA AO AR LIVRE

Na Tabela 6, são apresentadas as taxas de secagem médias nas seguintes condições de teor de umidade: verde até 23% (água livre e de impregnação), verde a 30 % (água livre) e de 30% a 23% (água de impregnação).

TABELA 6-TAXA DE SECAGEM AO AR LIVRE PARA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp EM FUNÇÃO DO TIPO DE REMOÇÃO DE ÁGUA

Faixas de Umidade	T.S U%/dia	
	Média	CV%
Verde a 30 %	1,5	21,5
30% a 23%.	0,25	32,3
Verde a 23%	1,00	21,3

Nota: U %=: umidade; h: hora; T.S: taxa de secagem; CV%=Coeficiente de variação

A Tabela 6 permite observar que foram obtidas diferentes taxas de secagem, fato esse esperado devido aos diferentes tipos de água que a madeira apresenta no seu interior. Para Viscarra (1998) a velocidade de retirada da umidade ocorre de maneira diferente dependendo do teor de umidade da madeira, se estiver acima ou abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF). Klitzke (2007), complementa que a taxa de secagem depende das características das espécies, das condições climáticas, da forma de empilhamento, e da disposição e da formação do pátio de secagem.

Na retirada da água acima do PSF (verde a 30 %), a taxa de secagem apresentou valor médio de apenas 1,5% U/dia, apesar disso, pode-se notar que a velocidade de secagem acima do PSF foi 6 (seis) vezes maior do que a retirada da água abaixo do PSF (0,25% U/dia). A movimentação de água no interior da madeira é fortemente influenciada pelos elementos que compõem a estrutura da madeira. A permeabilidade do gênero de maneira geral é considerada baixa a muito baixa, por apresentar uma estrutura anatômica com pequenas dimensões,

pontoações de pequenos diâmetros e principalmente de vasos obstruídos por tiloses (SIAU, 1995; SANTOS 2003). Quando comparamos a velocidade de secagem com outras espécies de folhosas, por exemplo Susin et al. (2014) analisando amostras de *Hovenia dulcis* submetidas a secagem ao ar necessitaram de apenas 25 dias para que a madeira atingisse 15,43%, obtendo velocidades de secagem acima do PSF de 7,88% U/dia, uma velocidade média de 3,68%U/h (verde até 15,43%) e abaixo do PSF de 0,88%U/h, sendo tais resultados bem superiores, provavelmente influenciados pela maior permeabilidade da madeira de *Hovenia dulcis*.

Na faixa de 30 a 23%, na remoção da água de impregnação, a taxa de secagem reduziu 83,33% (0,25%U/dia), evidenciando que nessa faixa a remoção da água de impregnação é difícil e lenta, principalmente pelo fato da água da madeira estar aderida na parede celular movimentando-se por difusão. Tomaselli (1977) e Jankowsky et al. (2003) resumem a secagem da madeira em três etapas, sendo a terceira fase (fase da difusão) iniciada quando a linha de evaporação de água se restringe ao centro da peça, não havendo mais água livre no material e a taxa de secagem será regulada pelas características do material, até que o teor de umidade de equilíbrio seja alcançado.

Os resultados obtidos nesse estudo são semelhantes aos encontrados por Stangerlin et al. (2009) na secagem ao ar livre para madeira de *E. tereticornis* apresentando valores de 1,51, 0,12 e 0,51 %U/dia, para as avaliações acima do PSF, abaixo do PSF e média, respectivamente, enquanto que para o *C. citriodora* os valores obtidos foram de 2,12, 0,21 e 0,68 %/dia. Duarte et al. (2015) também com valores próximos encontrando 1,21%U/ dia acima do PSF, 0,16 %U/dia abaixo do PSF e 0,36 %U/dia no total para secagem ao ar livre na primavera, para *Eucalyptus* spp. No entanto, outros autores obtiveram resultados diferentes de taxa de secagem, Susin (2012) encontrou para o *E. robusta*, velocidade de secagem para a remoção da água capilar somente duas vezes mais rápida que no fluxo da água de difusão, valores bem diferentes aos deste estudo que foi cerca de 6 vezes mais lenta. Da mesma maneira Batista (2009) estudando *E. dunnii*, obteve o fluxo por capilaridade de aproximadamente três vezes maior ao fluxo por difusão.

4.4 QUALIDADE DA MADEIRA NA SECAGEM AO AR LIVRE

4.4.1 Rachaduras de superfície

Na Figura 16 são apresentados os percentuais de peças com rachaduras de superfície, após desdobro e após a secagem, para secagem ao ar livre da madeira de *Eucalyptus* spp.

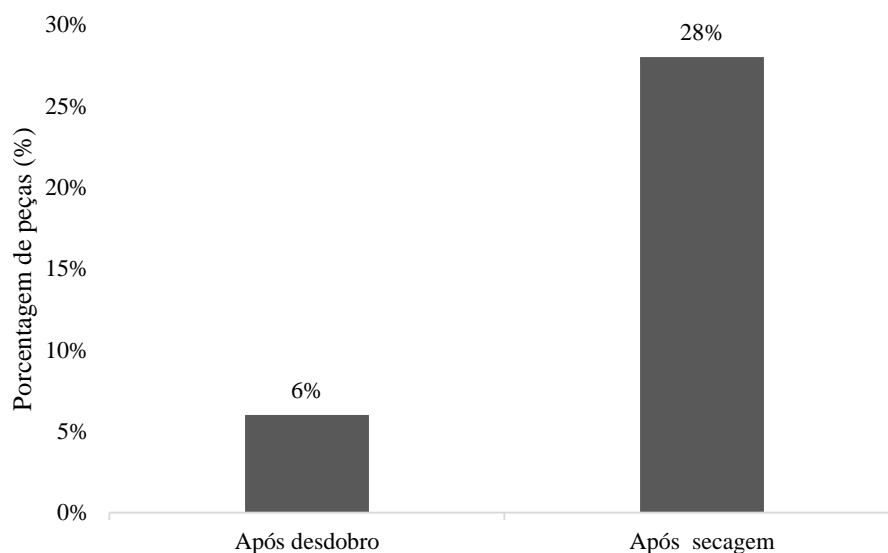


FIGURA 16-INCIDÊNCIA DE RACHADURAS DE SUPERFÍCIE EM TÁBUAS DE *Eucalyptus* spp SUBMETIDAS A SECAGEM AO AR LIVRE

Considerando a totalidade de peças avaliadas, observa-se (Figura 16) que após o desdobro as tábuas apresentaram um baixo percentual de peças com rachaduras, e a incidência de rachaduras de superfície foi maior após a secagem ao ar livre, sendo que aproximadamente 1/3 das peças apresentaram esse tipo de defeito. Resultados semelhantes foram encontrados por Rocha (2000) e por Del Menezzi e Nahuz (1998), em que todas as peças centrais, contendo a medula, apresentaram rachaduras. Comparando-se os resultados deste estudo, Rocha (2000) e Del Menezzi (1999) também encontraram aumento no índice de rachaduras de superfície em tábuas de *E. grandis* após a secagem da madeira.

Stangerlin (2009) encontrou valores um pouco inferiores a este estudo para *E. saligna* com 16,36 % de peças com rachaduras de superfície seca a ar livre. O mesmo autor ainda encontrou valores médios superiores de peças com rachaduras de superfície, 58,18% para *E. tereticornis* e 80 % para *C. critiodora*. Susin et al. (2014) obtiveram para *Hovenia dulcis* 29,63% de rachaduras de superfície após a secagem ao ar livre. Apesar de as temperaturas na secagem ao ar livre, serem menores que qualquer outro método de secagem, verificou-se um alto percentual de peças defeituosas. O alto índice de rachaduras de superfície, pode ser

justificada pela propensão de algumas espécies de eucalipto apresentarem rachaduras, a presença de medula em muitas tábuas avaliadas, aliado ao gradiente de umidade da madeira, e a taxa de secagem conforme citado anteriormente, foram preponderantes ao acréscimo de rachaduras de superfície.

Quanto à incidência de rachaduras de superfície Ciniglio (1998) ressalva que podem aparecer quando as condições de secagem são muito severas, ou seja, baixas umidades relativas provocando a rápida secagem das camadas superficiais, enquanto as camadas internas estão com mais de 30% de umidade. Dening et al. (2000) complementam que as rachaduras de superfície são resultantes da presença de gradientes de umidade, nesse caso entre a umidade na superfície e no centro da tábua, ocorrendo quando as tensões que excedem a resistência da madeira à tração perpendicular às fibras. As rachaduras de superfície não causaram grandes prejuízos na qualidade da madeira, em virtude das dimensões reduzidas das mesmas, podendo aproveitar a madeira normalmente.

4.4.2 Índice de rachaduras de topo

Na Tabela 8 observa-se a índice de rachaduras de topo (IRT%) antes e após a secagem, bem como a separação das tábuas avaliadas em classes de qualidade, conforme as recomendações da (NBR 14806-ABNT, 2002).

TABELA 7-ÍNDICE DE RACHADURAS DE TOPO EM TÁBUAS DE *Eucalyptus* spp E A CLASSE DE QUALIDADE DAS TÁBUAS SUBMETIDAS A SECAGEM AO AR LIVRE

Avaliação	IRT (%)	Classes de qualidade (%) das tábuas				
		1ª classe	2ª classe	3ª classe	4ª classe	5ª classe
Após desdobro	2,50	84	10	4	2	0
Após a secagem	4,77	68	14	10	6	2

Nota: IRT: Índice de rachaduras de topo (%)

Como pode ser observado (tabela 8), o índice de rachaduras de topo (IRT), apresentou uma maior porcentagem de tábuas defeituosas após a secagem, aproximadamente 2 vezes mais rachaduras de topo, do que as peças quantificadas após o desdobro, o IRT encontrado pode ser considerado baixo. Os baixos índices de rachaduras de topo se devem principalmente pela posição dos sarrafos separadores e pelo perfeito alinhamento dos mesmos, minimizando com isso, a velocidade de secagem dos topos com conseqüente formação de rachaduras. Tal

procedimento seguiu recomendação de Simpson (SIMPSON, 1991; JUNAC, 1989 e KLITZKE, 2007).

Estes resultados estão de acordo com Stangerlin et al. (2009) que encontraram valores de IRT para a secagem ao ar de 4,11%, 5,88% antes e após a secagem para madeira de *E. saligna*. Todavia, valores superiores a este estudo, foram encontrados por Silva et al. (1997) secando ao ar livre *E. grandis* para a produção de móveis até um valor de 14,7%, verificaram que 10,8% das tábuas com rachaduras antes da secagem e 11,5% após a secagem

A possível explicação para o baixo índice de rachaduras de topo pode ser o baixo gradiente de umidade encontrado, aliado as condições de secagem suave e também pelo fato de a madeira ser coberta após o empilhamento, fazendo com que os raios solares não incidissem diretamente nas tábuas, diminuindo dessa forma as rachaduras. Mendes et al. (1998), ao testarem o comportamento de 25 espécies do gênero *Eucalyptus* na secagem ao ar livre, concluíram que em relação aos parâmetros de qualidade relacionados as rachaduras, é possível se obter madeira serrada deste gênero com qualidade satisfatória exigida pelo setor moveleiro, desde que se tenha um desenvolvimento e acompanhamento rígido das condições de secagem, bem como técnicas corretas de empilhamento.

Quanto a classificação das peças de acordo com a norma, em classes de qualidade (Tabela 8), após a secagem todas as classes tiveram um aumento em porcentagem de peças com rachaduras. Apesar disso, nota-se que as peças que apresentaram maior porcentagem de qualidade ficaram inseridas na classe 1, que correspondem a 68% após a secagem, seguida das demais classes, somente 2% das peças foram classificadas na 5ª classe, sendo classificada como imprópria para uso conforme as recomendações da NBR 14806-ABNT (2002). Dessa forma, essa classificação permite abordar a qualidade final das peças após a secagem, mostrando que a melhor qualidade de peças secas sem maiores prejuízos para madeira, sendo notoriamente reaproveitada para usos posteriores. Estes resultados estão de acordo com Susin (2012) que na avaliação antes da secagem, a madeira de *E. robusta* apresentou a melhor qualidade neste aspecto, com 98,38% de peças classificadas como de 1ª, 2ª ou 3ª classes, e que após a secagem houve uma redução da porcentagem, apresentando 84,70 % de peças de 1º 2º e 3º classe.

Skolmen (1963) avaliando a secagem ao ar de *E. robusta* verificou que 36,1% das tábuas apresentaram rachaduras de topo ao final da secagem. No presente estudo, considerando-se o percentual de tábuas que apresentaram tal defeito após a secagem, o valor foi superior ao obtido pelo autor.

De maneira geral, a secagem ao ar livre no período do outono inverno deste estudo, obteve uma pequena quantidade de rachaduras de topo, mesmo o Eucalipto sendo um gênero refratário, os resultados obtidos são satisfatórios.

4.4.3 Empenamentos

A classificação das peças quanto ao arqueamento, encurvamento e encanoamento foi realizada de acordo com as recomendações da NBR 14806-ABNT (2002) e consistiu na avaliação da flecha para cada tábua, e no percentual de peças adequadas e defeituosas antes e após a secagem para madeira de *Eucalyptus* spp é apresentada na Tabela 9.

TABELA 8-EMPENAMENTOS NA SECAGEM AO AR LIVRE NA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp

Tipo de Empenamento	Após desdobro	Após secagem
Arqueamento (mm/m)	1,36	0,58
Encurvamento (mm/m)	1,91	1,34
Encanoamento (mm)	0	0,46

Os índices de empenamentos obtidos são considerados baixos, ao analisar a Tabela 9, nota-se que a flecha média do arqueamento diminui após a secagem, o que corresponde a uma redução de 42% desse defeito. O arqueamento é um defeito que se manifesta durante o desdobro e que pode ser intensificado durante a secagem. Essa redução na flecha média do arqueamento pode ser justificada pelo fato de que a madeira de eucalipto após o desdobro, libera suas tensões, e que ao longo do processo de secagem ao ar, em condições não controláveis das variáveis ambientais essas tensões vão sendo “aliviadas” e os índices de arqueamento ao longo dos dias vão diminuindo. Rocha (2000) afirma também que a manifestação deste defeito está mais associada às tensões de crescimento ainda presentes nas tábuas do que ao processo de secagem. O empilhamento bem feito e o posicionamento das peças na pilha, também podem ter sido favoráveis para reduzir esses índices.

Comparando os resultados apresentados na Tabela 9, com outros, Stangerlin (2009) obteve um acréscimo na flecha média de arqueamento, após secagem ao ar livre, 2,59 mm/m para *E. saligna* e de 2,81mm/m para madeira de *E. terenticornis*. Rosso (2006) observou para o *E. saligna*, uma flecha de arqueamento médio igual a 4,09 após desdobro e 4,69 mm/m após a secagem, para secagem ao ar livre no período de verão e inverno. Duarte et al. (2015) também observaram um aumento na flecha de arqueamento para *Eucalyptus* spp após a secagem ao ar

livre obtendo 2,14 mm/, respectivamente. Todos autores referenciados, encontraram valores superiores para as flechas médias de arqueamento, mesmo neste trabalho contrariando os resultados da literatura, pode-se dizer que se conseguiu reduzir os índices de arqueamento.

Ainda na Tabela 9 pode-se analisar que logo após o desdobro, as tábuas já apresentaram encurvamento e que após a secagem ocorreu uma redução (1,34 mm/m) na flecha média. A redução deste empenamento se deve provavelmente à ação do peso das próprias tábuas (restrição) e que o correto empilhamento e ótimo alinhamento dos sarrafos separadores, foram os fatores preponderantes na redução do índice. Rocha (2002) e Del Menezzi (1999) também encontraram redução no encurvamento médio após a secagem de espécies de eucaliptos, Rocha (2000) ainda afirma que o principal fator de redução do encurvamento foi a restrição mecânica do empilhamento.

Duarte et al. (2015) obtiveram valores médios de encurvamento de 3,4 mm/m e 1,87 mm/m antes e após a secagem, ao ar livre de *Eucalyptus* spp. Tal redução também foi observada por Stangerlin et al. (2009) para a madeira de *E. saligna* e *E. tereticornis*, com valores de 1,82 e 2,06 mm/m, respectivamente, para a avaliação antes da secagem e 1,67 e 1,57 mm/m após a secagem. Diferentemente dos resultados apresentados na Tabela 9, Rosso (2006) não encontrou encurvamento em nenhuma das três espécies de eucalipto submetidas à secagem ao ar no verão e no inverno. Susin et al. (2014) verificaram um aumento na flecha média de 1,17mm/m após o desdobro e 1,63mm/m após secagem de *Hovenia dulcis* seca ao ar livre, resultados superiores aos encontrados neste estudo (Tabela 9).

Segundo Simpson (1991), e Dening et al. (2000) o encurvamento não é um defeito problemático da madeira, uma vez que pode ser eliminado facilmente durante o processo de empilhamento da carga de madeira. De maneira geral, o encurvamento é influenciado muito mais pelo método de empilhamento do que pelas circunstâncias de secagem. Mediante a adição de pesos sobre a pilha, possibilita-se uma redução significativa nos índices de encurvamento (CINIGLIO, 1998).

Deve-se salientar que o encurvamento reduziu com a secagem demonstrando que o empilhamento foi eficiente, melhorando a qualidade da madeira após a secagem ao ar livre. Jankowsky (1991), Ducati (2000) e Klitzke (2007) ressaltam a necessidade do empilhamento bem feito para minimizar a ocorrência de empenamentos durante a secagem de madeira.

Tanto para o arqueamento quanto para o encurvamento, todas as peças avaliadas foram adequadas, nenhuma peça apresentou flecha superior de 5 mm conforme o estabelecido pela norma, podendo afirmar ainda que a secagem ao ar foi de boa qualidade não intensificando esses defeitos e que as peças foram classificadas como adequadas para serem usadas

futuramente. Estes resultados também estão de acordo com Rosso (2006), Stangerlin et al. (2009) que não verificaram peças com encanoamento superior a 5 mm para *C. citriodora* e *E. saligna*, na secagem ao ar livre.

O encanoamento não foi observado na condição verde (após desdobro) (Tabela 9), o que já era esperado, pois este defeito está associado às diferenças de contração entre os planos tangencial e radial, quando seca. Após a secagem tornou-se presente apresentando um baixo índice (0,46mm/m). A presença de peças encanoadas ocorre principalmente em tábuas com orientação tangencial/radial, ou seja, em peças que estão próximas da medula e apresentam uma face tangencial e outra radial, ocorrendo o encanoamento devido os diferentes índices de contração entre as faces tangencial e radial.

O encanoamento também está ligado basicamente as condições de secagem, e sofrem principalmente grande influência do plano de corte, onde peças radiais apresentam maior estabilidade dimensional enquanto que tábuas tangenciais e de corte misto são muito mais instáveis favorecendo o surgimento de encanoamento (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010)

Estes resultados estão de acordo com Rocha (2000), que avaliando a secagem da madeira de *E. dunnii*, não encontrou peças com encanoamento antes da secagem e sim somente após a secagem. Galvão; Jankowsky (1985), Simpson (1991) relatam que o encanoamento pode ser resultante da diferença entre as retrações transversais da madeira, assim como, da exposição de apenas uma face da tábua à secagem.

O número de peças defeituosas, maiores que 4 mm conforme a norma foi de 26%, e de peças adequadas foi de 74%, após a secagem. A disposição das peças tangenciais nas posições intermediárias e inferiores na pilha, correto empilhamento e restrição mecânica favoreceram esses baixos índices. Susin (2012), enfatiza que o correto empilhamento da carga, dispondo peças tangenciais nas primeiras camadas, aliado à utilização de utilização de placas de concreto, com função de restrição mecânica, a secagem uniforme e a utilização de tábuas com largura inferior a 250 mm proporcionam baixos índices desse defeito. Silva et al. (1997), Bauer (2003), Rosso (2006), Stangerlin (2009) ao realizarem a secagem da madeira de eucalipto na secagem ao ar livre não verificaram a incidência de encanoamento, diferentemente aos resultados encontrados nesse estudo.

4.4.4 Gradiente de umidade e tensões de secagem na secagem ao ar livre

4.4.4.1 Gradiente de umidade

Na Tabela 10 encontram-se as médias do gradiente de umidade, para secagem ao ar livre para madeira de *Eucalyptus* spp, submetidas à secagem ao ar livre.

TABELA 9-GRADIENTE DE UMIDADE MÉDIO NA SECAGEM AO AR LIVRE PARA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp

Umidade (%)	Média (%)	CV%
Camada externa	20,22	8,62
Camada central	23,18	4,74
Gradiente de umidade médio (%)	3,17	32,36

Como pode se observar (Tabela10) a região externa das tábuas de *Eucalyptus* spp apresentaram menor teor de umidade que a região interna, gerando um gradiente de umidade médio de 3,17%. Tal gradiente não ocasionou altos índices de defeitos, apesar de serem considerados elevados. O fato se deve ao alto teor de umidade residual presente nas tábuas, em torno de 23%, próximo ao PSF, o que justifica os baixos índices de defeitos encontrados. Batista (2009) e Mellado (1993) encontraram em média 0,58% de gradiente de umidade em secagem convencional, valores inferiores ao deste estudo.

Os defeitos de secagem estão ligados diretamente às características intrínsecas das espécies e as condições ambientais de secagem. Quando são aplicadas altas velocidades de secagem ocorrem elevados gradientes de umidade e elevadas tensões, podendo ocasionar defeitos como rachaduras, empenamentos, colapso, entre outros. Estas considerações são amplamente citadas por diversos autores na literatura (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985; PONCE; WATAI, 1985; JUNAC, 1989; SIMPSON,1991; KLITZKE, 2007).

4.4.2 Tensões de secagem

As avaliações visuais das tensões de secagem produzidas pelo teste de garfo são apresentadas na Figura 17. Não foram observadas tensões de secagem na madeira de *Eucalyptus* spp seca ao ar livre. As tensões de secagem normalmente estão associadas ao gradiente de umidade e a alta velocidade de secagem (MELLADO, 1993).



FIGURA 17-AUSÊNCIA DE TENSÕES DE SECAGEM AO AR LIVRE DA MADEIRA de *Eucalyptus* spp
FONTE: a autora (2016).

Neste caso, apesar da madeira apresentar em média um gradiente de umidade de 3,1% (alto), o teste de garfo não demonstrou tensão de secagem, provavelmente pela baixa velocidade de secagem empregada e pelo teor de umidade final estar em média com 23%, muito próximo ainda do PSF, não sendo suficiente para causar tensões internas na madeira. Resultados similares também foram encontrados por Stangerlin (2009), que não observou tensões de secagem para madeira de *E. terenticornis*, *E. saligna* e *C. citriodora*, na secagem ao ar livre.

4.5 PROGRAMA DE SECAGEM

4.5.1 Parâmetros do programa de secagem

Para obtenção das variáveis Temperatura inicial, Temperatura final, Potencial de Secagem, foram utilizadas as variáveis encontradas na elaboração dos programas e inseridas nas equações para a estimativa dos parâmetros do programa de secagem cujos valores médios são apresentados na Tabela 11.

TABELA 10-PARÂMETROS DE ELABORAÇÃO DOS PROGRAMA DE SECAGEM NA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp

	Variáveis		
	TI (°C)	TF (°C)	P.S
Média	36,83	64,78	1,90
C.V%	1,79	4,66	2,13

Nota: TI = Temperatura inicial (°C); TF = Temperatura final (°C); PS = Potencial de secagem.

Os presentes parâmetros para elaboração do programa secagem para madeira de eucalipto encontrados nesse estudo estão de acordo com a bibliografia, como pode ser observado na Tabela 12.

TABELA 11-PARÂMETROS DOS PROGRAMAS DE SECAGEM DISPONÍVEIS NA LITERATURA PARA MADEIRA DE EUCALIPTO

Espécie	TI (°C)	TF (°C)	P.S	Autor
<i>Eucalyptus grandis</i>	40,5	64,9	2,10	Ciniglio (1998)
<i>Eucalyptus grandis</i>	41,7	65,7	2,17	Andrade et al (2000)
<i>Eucalyptus terenticornis</i>	39,0	62,7	2,01	Andrade et al (2000)
<i>Eucalyptus grandis</i>	40,0	65,0	2,0	Santos (2002)
<i>E. saligana; E.dunni; E. grandis</i>	40,0	66,0	2,0	Batista (2009)
<i>Eucalyptus robusta</i>	37,2	67,0	1,92	Susin (2012)
<i>Eucalyptus saligna</i>	39,7	67,2	2,07	Susin (2012)
<i>Eucalyptus</i> spp	36,83	64,78	1,90	Presente estudo (2015)

Nota: TI = Temperatura inicial (°C); TF = Temperatura final (°C); PS = Potencial de secagem.

Nota-se que os parâmetros obtidos (tabela 11) estão muito próximos aos encontrado na Tabela 12 por Batista (2009); Susin (2012); Santos (2002); e Andrade (2000), para várias espécies. Ressalva-se que o potencial de secagem para todas as espécies incluindo as deste estudo, foi baixo, e as temperaturas iniciais e finais também foram baixas para secagem de madeiras refratárias como do gênero *Eucalyptus*.

Complementarmente pode-se dizer que os parâmetros indicados no presente trabalho mostram segurança, estando dentro da faixa dos programas que empregam condições de

secagem suaves, e concordantes com Campbell; Hartley (1988); Jankowsky, (1995) e Vermaas, (1995), dentre outros, que recomendam a utilização de temperaturas iniciais inferiores a 45°C.

4.5.2 Programa de secagem para madeira de eucalipto

A Tabela 13 apresenta o programa de secagem elaborado para madeira de *Eucalyptus* spp, em câmara secagem convencional, para madeira de eucalipto na condição de umidade inicial completamente saturada (verde) até um teor de umidade final de 9% e a secagem combinada (ar livre mais convencional) começando a primeira fase da secagem com teor de umidade inicial de 23% até um teor de umidade final de 9%.

Para a secagem combinada a madeira decorrente da pré-secagem (ar livre) o teor de umidade inicial, na elaboração do programa combinado é aquele onde o teor de umidade em que a madeira seca ao ar foi encerrada (23%). A temperatura inicial empregada foi de 48°C, pois a madeira já se encontrava pré-seca, partindo direto para remoção da água de impregnação, elevando também a temperatura final em 65°C. Andrade (2000) confirma esses resultados, onde indica programas mais agressivos para madeira com umidade abaixo do PSF, reduzindo o tempo de secagem. O autor recomendando que a madeira seja submetida a uma pré-secagem anterior à secagem convencional.

TABELA 12- PROGRAMA PARA SECAGEM CONVENCIONAL PARA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp, VERDE EM CÂMARA DE SECAGEM

Temperatura °C							
FASE	UMIDADE	TBS	TBU	U.R %	U.E %	TEMPO (horas)	P.S
Aquecimento	-	40	40	100		3	-
1	35	40	38	87	18	-	2
2	31	44	42	82	16	-	1,9
3	28	46	42	76	14	-	1,9
4	24	48	43	73	12	-	1,9
5	20	52	43	63	10	-	1,9
6	18	56	45	58	9	-	1,9
7	15	60	46	54	8	-	1,9
8	12	63	46	40	6	-	1,9
9	9	65	47	35	5	-	1,9
Uniformização	10	63	43	63	9	8	
Acondicionamento	10	61	53	72	11	8	
Resfriamento	10	44	37	54	9	4	

Nota: TBS= Temperatura do bulbo seco (°C); TBU= Temperatura do bulbo seco (°C); U.R= Umidade relativa (%) U.E= Umidade de Equilíbrio (%); P.S= Potencial de secagem.

Estudos similares a este, com madeiras pré-secas, também foram desenvolvidos por Jankowsky et al. (1998), empregando três programas de secagem distintos para madeira de *E. grandis* (40 mm de espessura) com diferentes umidades iniciais, encontraram parâmetros diferentes para cada programa (Tabela 14).

TABELA 14-CONDIÇÕES DE SECAGEM CONVENCIONAL DO *Eucalyptus grandis*

Condição	Umidade inicial (%)	TI °C	TF (°C)	P.S
1	73,3	35	60	2,2
2	27,3	40	70	2,5
3	19,3	45	70	3,0

Nota: TI = Temperatura inicial (°C); TF = Temperatura final (°C); PS = Potencial de secagem.

FONTE: Jankowsky et al. (1998).

As madeiras secas pelos programas 2 e 3 conforme a tabela 14 foram submetidas à pré-secagem ao ar em ambiente coberto, por períodos de 140 e 220 dias, respectivamente. As condições de secagem, como pode ser observado, vão ficando mais rigorosas à medida que a umidade inicial vai diminuindo. Considerando a duração da secagem e a qualidade final da madeira, foi recomendado pelos autores a adoção do programa de secagem que emprega as condições 2, mesmo para madeiras com alta umidade inicial. Com base nos resultados obtidos e nas informações da literatura supracitadas, pode-se concluir que para secagem da madeira de eucalipto os programas indicados foram adequados e sua aplicação resultou em madeira seca com pequena incidência de defeitos.

4.6 SECAGEM CONVENCIONAL E COMBINADA

4.6.1 Teor de umidade inicial, tempo e curvas de secagem

Na Tabela 15 encontram-se os valores médios, para o teor de umidade inicial para secagem em câmara convencional e secagem em câmara convencional combinada (pré-secagem ao ar livre + convencional) e o tempo de secagem médio para que a madeira atingisse o teor de umidade final.

TABELA 13-TEOR DE UMIDADE INICIAL E TEMPO DE REMOÇÃO DA ÁGUA DA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp, NA SECAGEM CONVENCIONAL E COMBINADA

	Média T.U. inicial %	C.V%	Tempo de permanência na câmara (horas)
Convencional	79,47	24,25	172
Combinada	23,5	7,57	88,33

Nota: valores entre parêntesis correspondem ao coeficiente de variação (CV%)

Nota-se (Tabela 15) que as diferenças de umidade inicial para secagem convencional e combinada são grandes, pois na secagem convencional a madeira encontrava-se em estado inicial de umidade (verde), já na secagem combinada o teor de umidade inicial encontrado corresponde à umidade da madeira referente ao teor de umidade final obtido na pré-secagem (ar livre). Os resultados de umidade inicial para secagem convencional foram inferiores aos obtidos por Ciniglio (1998), Severo (1998) e Rocha (2000) e superior aos valores encontrados por Batista (2009) e Santos (2002). A umidade inicial sofre influência de muitas variáveis dentre elas da idade, da espécie, do sítio, da época do ano em que foi cortada além dos fatores operacionais relacionados ao transporte, tempo de estocagem das toras e serragem até a secagem.

A variação encontrada neste estudo pode ser considerada normal para o material madeira. Na secagem em estufa convencional com o material saturado (verde) o teor de umidade inicial apresentou maior variação, enquanto que o material da secagem combinada, vinda da pré-secagem apresentou uma baixa variação da umidade inicial, o que era esperado devido a secagem ao ar ser lenta.

Todavia observa-se um pequeno acréscimo da umidade inicial na secagem combinada (0,5%), que pode ser justificado pelo fato de que as tábuas que saíram da pré-secagem, ficaram armazenadas no ambiente, assim adquirindo pequena quantidade de umidade até serem secas em câmara de secagem convencional. Apesar da aceitação generalizada que a literatura registra sobre os efeitos positivos da pré-secagem na qualidade da madeira serrada, não há concordância entre os autores sobre o teor de umidade a partir do qual a madeira deveria ser submetida à secagem convencional. Stöhr (1977) considera que o teor de umidade estaria entre 20% e 25%, já Campbell e Hartley (1988) consideram que a madeira deveria secar ao ar até atingir um teor umidade em torno de 30%; enquanto que Northway (1996) recomenda umidades entre 40% e 50%. Os resultados desse estudo estão de acordo com Stöhr (1977).

Stangerlin (2009) obteve valores médios de umidade inicial para secagem combinada similares encontrando para *E. terenticornis* 20,30% *C. citriodora* 20,71% e *E. saligna* 20,75%. A mesma tendência também foi observada por Rosso (2006) na secagem combinada, no período do inverno obteve na secagem combinada umidades iniciais de 24% para *E. grandis* e 25% para *E. saligna*,

A perda de umidade em função do tempo no comportamento da secagem convencional e na secagem combinada estão representas na Figura 18.

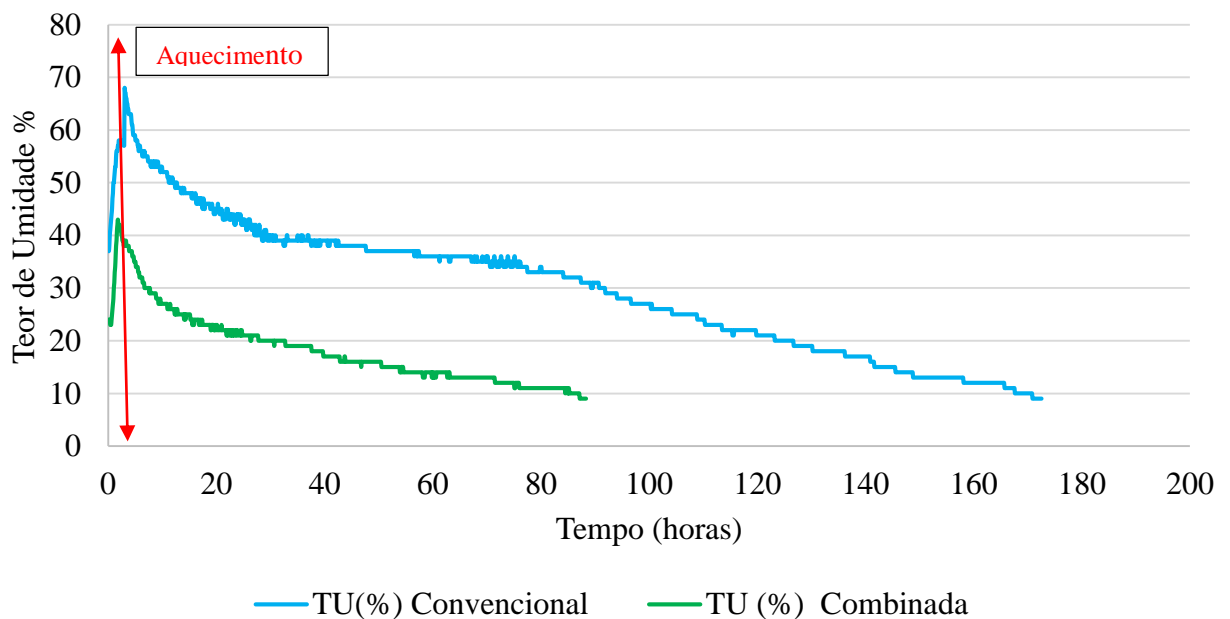


FIGURA 18-CURVAS DE SECAGEM PARA SECAGEM CONVENCIONAL E SECAGEM COMBINADA DA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp

Conforme a Tabela 15 e Figura 18, o tempo para a secagem convencional para a madeira de *Eucalyptus* spp foi de 172 horas, enquanto que na secagem combinada o tempo foi de 88 horas de secagem, apresentando uma redução de 51% no tempo de secagem.

Essa redução na umidade correspondeu a 51% na redução do tempo de secagem total, que equivale 4 dias a menos em câmara convencional, quando comparada com somente a secagem convencional. Isso permite assegurar que esses resultados são satisfatórios pois tem-se um ganho na capacidade produtiva da estufa, diminuindo os dias, consegue-se ter uma maior rotação de cargas na estufa e também uma redução significativa tanto no consumo de energia térmica como elétrica. Diversos autores Stöhr (1977), Campbell e Hartley (1988), Northway (1996), Ciniglio (1998) e Franzoni (2001) indicam que para reduzir o tempo nas câmaras de secagem métodos aplicáveis como a pré-secagem na madeira de eucalipto ou a combinação da

secagem ao ar somado a secagem convencional são satisfatórios. Esta combinação proporciona redução de custos e otimização do processo, através da maior operacionalidade das câmaras.

Nota-se também na curva de secagem combinada a curva de umidade cresceu no processo de secagem, causado pela fase de aquecimento, onde a madeira começou com teor de umidade inicial de 23,5% e ganhando umidade nesta fase, mesmo a madeira ganhando umidade pela fase de aquecimento, a perda de umidade ocorreu constantemente, reduzindo o teor de umidade com o tempo de secagem decorrente das fases de secagem estabelecidas no programa.

Os resultados do tempo de secagem obtidos neste estudo para a secagem convencional são superiores aos encontrados por Susin (2012), que obteve 92 horas de secagem para *C. citriodora*, 31 horas para secagem de *E. robusta* e 45 horas para secagem de *E. saligna*. Por outro lado, utilizando-se uma pré-secagem ao ar até o PSF, associada à secagem convencional Ciniglio (1998) obteve valores inferiores, para *E. grandis* (15 dias ao ar + 7 em câmara convencional). Rosso (2006) da mesma forma encontrou na secagem combinada 42 dias sendo que a secagem ao ar livre durou 39 dias e a secagem convencional durou 3 dias, para madeira de eucalipto.

Rosso (2006) afirma que a secagem combinada, quando comparada com a secagem convencional, reduz o tempo de secagem e a incidência de defeitos o que leva a um custo total reduzido de secagem, o que pode ser vantajoso tratando-se de uma madeira de difícil secagem como do gênero *Eucalyptus*, quando se busca melhora da qualidade da madeira.

4.6.2 Curvas de temperatura e umidade da secagem convencional

As figuras 19 e 20 contemplam o comportamento da secagem da madeira de eucalipto, em função do programa aplicado para cada método de secagem (convencional e combinada). A perda de umidade ao longo do tempo foi fornecida pela média dos pares de pinos sensores.

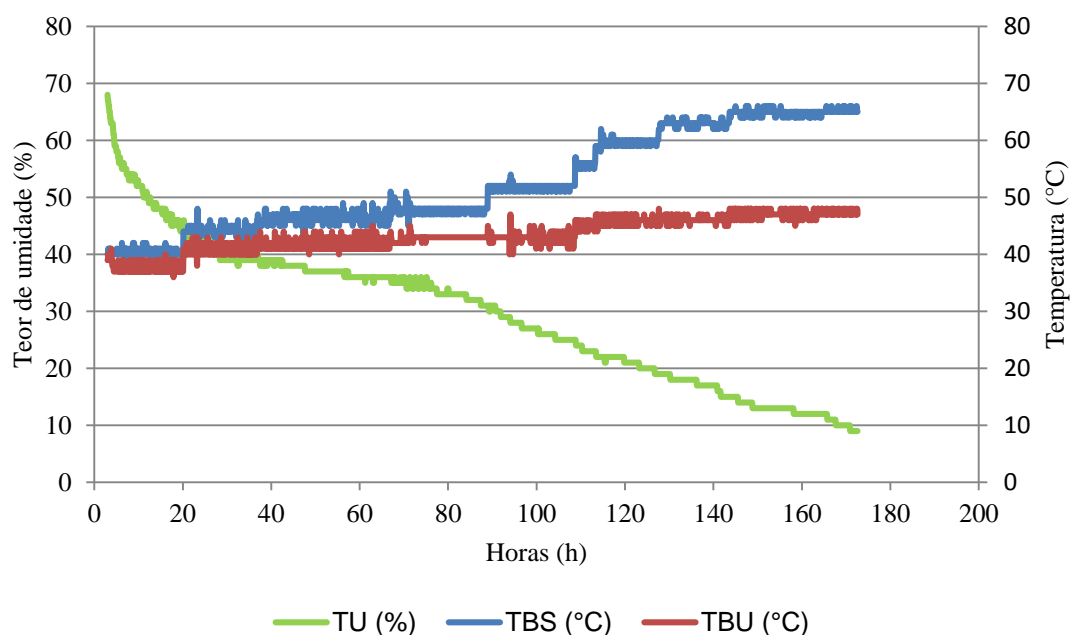


FIGURA 19-CURVA DE SECAGEM PARA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp EM CÂMARA DE SECAGEM CONVENCIONAL

Nota: TBS: temperatura do bulbo seco (°C), TBU: temperatura do bulbo úmido (°C), TU%: umidade da madeira.

Analisando as Figuras 19 e 20, se observa que as condições de temperatura desejada (TBS e TBU), estabelecidas pelo programa de secagem foram obtidas durante o processo de secagem, demonstrando o bom funcionamento da câmara e do sistema de controle. Baixas temperaturas (TBS e TBU) e alta umidade relativa devem ser mantidas principalmente no início do processo, onde necessita-se conduzir a secagem de modo suave, para evitar o aparecimento de defeitos como o colapso. É de acordo entre todos os estudiosos de secagem que o eucalipto é uma madeira que deve ser seca a baixas temperaturas e elevadas umidades relativas, principalmente nas fases iniciais, onde os teores de umidade são elevados (ROCHA, 2000; KLIZTKE, 2002; SANTOS, 2002; JANKOWSKY, 2003 e LUÍS, 2014).

Na secagem convencional (Figura 19) percebe-se que na curva de umidade para retirada da água livre (capilar) da madeira levou aproximadamente 89 horas até PSF e que para remoção da água de impregnação até 9 % (abaixo do PSF) necessitou 83 horas, totalizando 172 horas de secagem. Pode-se observar que para secagem da madeira de eucalipto praticamente 50% do tempo total foi necessário para remover cada tipo de água.

De acordo com Viscarra (1998), a perda de água pela madeira ocorre de forma diferente dependendo do teor de umidade, se está acima ou abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF). Para a retirada da água livre da madeira por capilaridade segundo vários autores Galvão e Jankowsky (1985), Simpson (1991), Klitzke (2007) alguns cuidados devem ser tomados no

início do processo principalmente para espécies consideradas de baixa permeabilidade, para minimizar a ocorrência de defeitos.

O longo período de tempo necessário neste estudo para a retirada da água de impregnação por difusão demonstrou que é um processo lento (JANKOWSKY, 1993; TOMASELLI, 1978; MELLADO, 2007; RASMUSSEN, 1961) e complexo por ocorrer simultaneamente difusão de vapor através das cavidades celulares e difusão de água de impregnação nas paredes celulares da madeira, processo conhecido como difusão impedida.

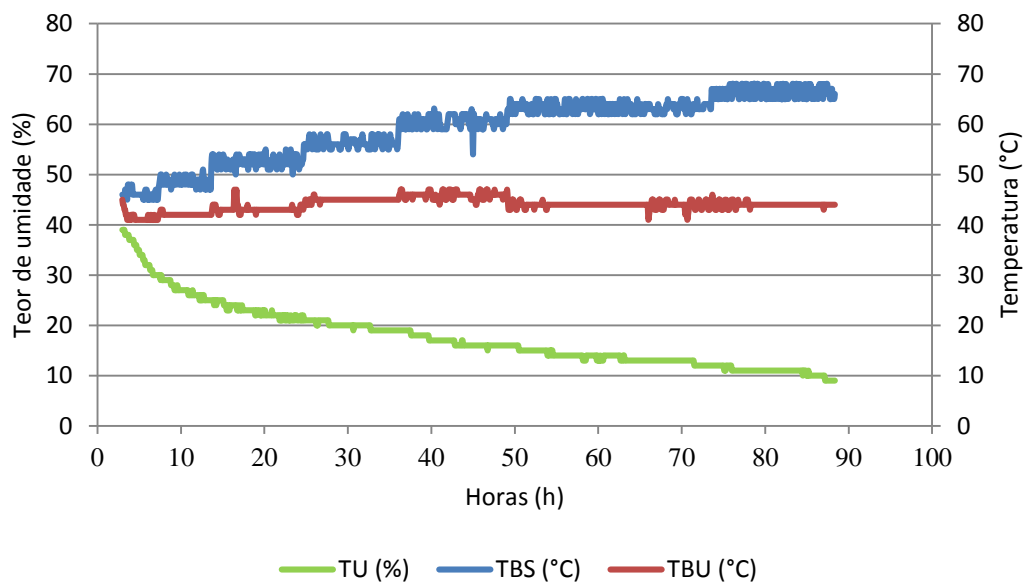


FIGURA 20-CURVA DE SECAGEM COMBINADA (PRÉ-SECAGEM + CONVENCIONAL) PARA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp EM CÂMARA CONVENCIONAL

Nota: TBS: temperatura do bulbo seco (°C), TBU: temperatura do bulbo úmido (°C), TU (%): teor de umidade da madeira.

Na curva de secagem combinada (Figura 20), nota-se que mesmo a secagem iniciando com teor de umidade inicial de 23,5%, iniciou-se com a fase de aquecimento elevando a umidade relativa para posterior secagem propriamente dita. Essa elevação da umidade relativa na curva evidencia um ganho de umidade inicial, nota-se ainda que se elevou também a temperatura durante o processo de secagem. De acordo com Christensen (1985), a secagem final da madeira de eucalipto, com espessura de 25-50 mm, pode ser completada com temperaturas de até 110°C sem maiores problemas para qualidade da madeira. Conforme Stör (1977), a secagem em câmara convencional é mais eficiente quando se está operando com condições de temperatura elevada e baixa umidade relativa, para acelerar a taxa de evaporação de umidade da madeira.

O tempo necessário para a secagem convencional da madeira vinda da pré secagem ao ar foi de 88 horas (Figura 20) tempo semelhante ao obtido na secagem da madeira verde para retirada da água de impregnação. A pré secagem resultou numa redução de tempo na secagem em câmara convencional de aproximadamente 50%. Esta redução no tempo de secagem pode gerar uma maior capacidade de produção e provavelmente maior aproveitamento da madeira devido a melhor qualidade alcançada. Segundo Concanonn (1982) muitos defeitos podem ser reduzidos na secagem ao ar livre até o teor de umidade em torno de 30% e posterior secagem em câmara.

Examinando mais detalhadamente o processo de secagem combinada, pode-se afirmar que as condições climáticas de cada local são muito importantes na redução do tempo de secagem ao ar livre para uma posterior secagem em câmara convencional. Associada, é claro, com a colocação correta das peças no pátio de secagem, um bom empilhamento e acompanhamento da perda de umidade ao longo do processo.

Por se tratar de um método de secagem combinada, os resultados obtidos quanto ao tempo gasto no processo são satisfatórios, salientando-se que as condições climáticas do sul do Brasil (PR), são menos favoráveis à secagem ao ar livre, principalmente no inverno. Porém os resultados obtidos mostram que a pré-secagem quando executada de modo correto, pode fornecer resultados muito satisfatórios quanto ao tempo de secagem, teor de umidade final e à qualidade do material, como aos encontrados neste estudo.

4.6.3 Taxa de secagem

Na Tabela 16, são apresentadas as taxas de secagem médias nas seguintes condições de teor de umidade: Verde até 30% (água capilar), verde a 9 % (água capilar e impregnação) e de 30% a 9% (água de impregnação), para secagem convencional e para a secagem combinada somente de 23% a 9%. Os resultados foram apresentados em $U\% \cdot h^{-1}$, referente aos pares de pinos sensores da câmara de secagem

TABELA 146-TAXA DE SECAGEM MÉDIA PARA A SECAGEM CONVENCIONAL E SECAGEM COMBINADA PARA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp EM CÂMARA CONVENCIONAL

Secagem	Taxa de secagem %U. h ⁻¹			F
	Verde a 30% (água capilar)	De 30 a 9% (água de impregnação)	Verde a 9% (água impregnação e capilar)	
Convencional	0,7468	0,17153	0,2845	36,1187**
Combinada	-	0,32548 *	-	

Nota: significativo (Tukey, p <0 .01). *remoção da água de impregnação a partir de 23% de umidade.

Para efeitos de comparação entre a taxa de secagem média na secagem convencional e na secagem combinada, foi realizado teste F entre a faixa de água higroscópica de 30 a 9 % e de 23 a 9 %, pois a secagem combinada é decorrente de uma pré-secagem onde já ocorreu a remoção da água livre, por isso só apresenta essa faixa de umidade.

Observa-se (Tabela 16), que a taxa de secagem na remoção da água higroscópica entre a secagem convencional e combinada, diferiram estatisticamente entre ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de F respectivamente. Nota-se ainda que na secagem combinada a taxa de secagem foi maior, ou seja, obteve-se uma maior velocidade de secagem até o teor de umidade final, praticamente duas vezes maior que a convencional. Comportamento semelhante aos resultados encontrados foi descrito por Batista (2009) para a taxa de secagem de três espécies de *Eucalyptus*, tendo o autor verificado a menor taxa de secagem na faixa da água de impregnação. Luiz (2014), também encontrou uma redução na faixa higroscópica na taxa de secagem, estudando o efeito da vaporização da madeira de eucalipto, para dois tratamentos.

Analisando ainda a secagem convencional (Tabela 16), verifica-se que a taxa de secagem ocorreu de forma normal, a remoção da água livre (verde a 30%) ocorreu de forma esperada, apresentado alto valor médio de taxa de secagem, assim proporcionando maior velocidade de secagem, ou seja, maior remoção dessa água, em comparação com a água de impregnação, isso justifica-se pelo alto teor de umidade da madeira e o curto período de tempo decorrido, independente do programa de secagem. Na fase de remoção da água higroscópica, observa-se o decréscimo da taxa de secagem à medida que a umidade da madeira vai se aproximando do teor de umidade final. E finalmente uma redução pouco pronunciada na faixa total de remoção, de ambas as águas. Os resultados obtidos para a taxa de secagem encontram-se em concordância com aqueles obtidos por CINIGLIO,1998; ANDRADE et al., 2001; BARBOSA et al., 2005 e KLITZKE; BATISTA, 2010.

Stangerlin et al. (2009) obtiveram valores médios de taxa de secagem para *C. citriodora* iguais a 0,054 e 0,028 U% h⁻¹, para a secagem em estufa solar e ao ar, respectivamente. Já para *E. saligna*, os mesmos autores obtiveram valores médios de 0,112 e 0,069 U% h⁻¹, para a secagem em estufa solar e ao ar. Os valores médios verificados no presente estudo, são superiores aos obtidos por esses autores para ambos os métodos de secagem.

De maneira geral, o comportamento apresentado para a taxa de secagem foi influenciado pelo teor de umidade inicial e pela massa específica. É possível inferir acerca da influência da permeabilidade da madeira para o gênero, mesmo que esta característica não tenha sido avaliada, visto que a permeabilidade da madeira influencia diretamente na taxa de secagem da madeira, podendo-se assim estabelecer um paralelo entre tais variáveis.

4.7 CONTRAÇÃO TRANSVERSAL DA MADEIRA NA SECAGEM CONVENCIONAL E COMBINADA

Na Tabela 17 são apresentados os valores médios das contrações em largura, espessura, e total para madeira de eucalipto, na secagem convencional e para secagem combinada.

TABELA 17-CONTRAÇÃO DA MADEIRA PELA SECAGEM CONVENCIONAL E COMBINADA PARA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp EM CÂMARA CONVENCIONAL

Secagem	Contração da madeira %		
	Largura	Espessura	Total
Convencional	9,12	6,99	16,11
	*(28,21)	*(28,55)	*(25,20)
Combinada	6,55 b	6,47 a	13,02 b
	*(27,80)	*(22,32)	*(18,84)

NOTA: médias seguidas por letras diferentes na vertical diferem entre si (Tukey, $p \geq 0,01$). *Valores entre parêntesis correspondem ao coeficiente de variação (%)

Nota-se (Tabela 17) que houve diferenças estatísticas na contração em largura entre a secagem convencional e a secagem combinada e que também na secagem combinada a contração da madeira foi menor, tanto em largura como em espessura. Já para a contração em espessura as secagens não diferiram estatisticamente entre si apresentando valores médios de 6,99% e 6,47%. Diferenças estatísticas entre a secagem convencional e a secagem combinada também ocorreram para contração total. Verifica-se que a contração total diminuiu significativamente na secagem combinada. Também deve-se salientar que a contração na

secagem combinada sofreu influência da pré-secagem, pois esta é somada a contração combinada.

O comportamento apresentado pode ser devido às cargas apresentarem maior proporção de tábuas tangenciais do que radiais, justificando as diferenças de contração em largura. Na secagem convencional as contrações foram maiores que na combinada, fato que pode ser justificado pela secagem combinada apresentar um teor de umidade inicial abaixo do PSF. Oliveira (2003) obteve contrações em largura menores avaliando as madeiras submetidas ao pré-tratamento em água quente apresentaram aumento nos valores para a contração em largura, para madeira de *E. grandis*, resultados considerados semelhantes a este estudo.

Os resultados encontrados neste estudo, mostram que as características de contração da madeira são diferentes para as diferentes tábuas na madeira de eucalipto, dependendo do modo de condução da secagem e do próprio comportamento da madeira, o que frequentemente leva a alterações e à formação de rachaduras e empenamentos. Ainda, conforme Oliveira et al. (2005), as variações de umidade e densidade no lenho associado as contrações da madeira também são as principais causas dos defeitos de secagem como o empenamento e rachaduras das peças de madeiras.

4.8 QUALIDADE DA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp NA SECAGEM CONVENCIONAL E COMBINADA

4.8.1 Rachaduras de superfície na secagem convencional e combinada

A madeira de eucalipto não apresentou rachaduras, durante a secagem convencional. Já para secagem combinada, apresentou uma mínima quantidade de rachaduras em 1,67 % das peças (Figura 21). As prováveis justificativas para o baixo índice encontrado, podem estar ligados as baixas temperaturas iniciais empregadas no programa de secagem, principalmente na secagem convencional, onde este defeito foi ausente. Resultados similares foram encontrados por Batista (2009), avaliando a secagem de *E. saligna* e *E. grandis*, o autor obteve 3,70% para o percentual de peças que apresentaram rachaduras de superfície. Vermaas (1995) afirma que, acima do ponto de saturação das fibras (PSF) as madeiras de eucalipto apresentam uma grande tendência a rachaduras e colapso, principalmente em temperaturas elevadas. Para a secagem de madeira de eucalipto com 25 mm ou mais de espessura, a temperatura não deve exceder 45°C durante as fases iniciais do processo, caso contrário, essa madeira torna-se propensa ao desenvolvimento de rachaduras de superfície (VERMAS, 1995).



FIGURA 21-MADEIRA DE *Eucalyptus* spp LIVRE DE RACHADURAS DE SUPERFÍCIE EM MÉTODOS DE SECAGEM CONVENCIONAL E COMBINADO

FONTE: a autora (2016).

Por outro lado, Rosso (2006) estudando secagem combinada (ar livre + convencional) de *E. saligna* e *C. citriodora*, verificou nas duas espécies, elevados percentuais de peças com rachaduras de superfície após o final da secagem. Stangerlin et al. (2009), realizando secagem ao ar livre e em estufa solar verificaram após a secagem para *C. citriodora* e *E. saligna*, que 80,00% e 58,18%, das peças apresentaram rachaduras de superfície, resultados superiores aos encontrados neste estudo.

Outro fator a ser justificado para a ausência de rachaduras após a secagem combinada é que pode ter ocorrido uma redução do teor de umidade superficial ou até mesmo a reversão das tensões de secagem nas peças que apresentaram rachaduras de superfície na avaliação após desdobro, fechando, após a secagem, as fendas verificadas inicialmente.

Os diferentes programas de secagem avaliados para ambos os métodos foram adequadamente elaborados para esta variável (surgimento de rachaduras), sendo que, uma das maiores dificuldades durante a secagem de madeiras refratárias como eucalipto é a elaboração de curvas de secagem que proporcionem a otimização dos tempos de secagem, assim como, atendam a qualidade do produto final.

4.8.2 Rachaduras de topo na secagem convencional e combinada

O índice de rachaduras de topo em ambos os métodos ocorreu de forma reduzida. Para secagem convencional as rachaduras de topo foram ausentes em todas as fases da avaliação. Já na secagem combinada o índice de rachaduras de topo foi de 3,33%, após o desdobro, e ausente após secagem (Figura 22). Susin (2012) encontrou valores médios de Índice de Rachaduras de topo (IRT) 3,56 e 3,83 %, para madeira de *E. citriodora* e *E. saligna*, similares aos encontrados neste estudo. Rosso (2006) obteve valores médios de IRT em secagem combinada para *E. saligna* após desdobro de 1,9% no verão e 3,1%, após desdobro no inverno, por outro lado Loiola (2015) não encontrou rachaduras de topo para madeira de *Tectona grandis*, seca em diferentes programas de secagem.



FIGURA 22-MADEIRA DE *Eucalyptus* spp LIVRE DE RACHADURAS DE TOPO EM MÉTODO SECAGEM CONVENCIONAL E COMBINADA
FONTE: a autora (2016).

Os baixos índices de rachaduras de topo são justificados pelo fato de que os programas de secagem elaborados, tanto para secagem combinada como para secagem convencional foram ideais, as baixas temperaturas, elevada UR e uma baixa taxa de secagem, o que juntamente com o baixo gradiente de umidade, favoreceram a ausência de rachaduras de topo após a secagem. Segundo Susin (2012) uma das maiores dificuldades durante a secagem de madeira de eucalipto é reduzir, evitar e controlar a incidência de rachaduras de topo.

Quanto a classificação da madeira de acordo com a norma NBR 14806-ABNT (2002) os resultados referentes ao percentual das classes, para secagem convencional e combinada, em

ambos os métodos mostraram que 100% das tábuas apresentaram para 1º, 2º e 3º classe, enquanto nenhuma peça apresentou a 5 e 4º classe e nenhuma foi desclassificada, podendo considerar que todas às tábuas são propícias para manufatura, comprovando um bom comportamento e uma maior qualidade da madeira seca por ambos os métodos. Susin (2012) na avaliação antes da secagem, a madeira de *E. robusta* apresentou valores semelhantes neste aspecto, com 98,3% das peças classificadas como de 1ª, 2ª ou 3ª classes, seguido pelo *C. citriodora* (90,62%) e pelo *E. saligna*, com 75% das peças.

De modo geral, a secagem provocou uma mínima redução na qualidade das tábuas avaliadas, possibilitando sua comercialização normalmente, considerando que o gênero em estudo é tido como de difícil secagem e muito propenso a defeitos, os resultados obtidos foram positivos.

4.8.3 Empenamento do tipo arqueamento na secagem convencional e combinada

A flecha de arqueamento médio para a secagem convencional e combinada para secagem da madeira de eucalipto nas avaliações, antes e após a secagem é apresentada, na Tabela 18.

TABELA 158-FLECHA MÉDIA DO ARQUEAMENTO PARA SECAGEM CONVENCIONAL E COMBINADA PARA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp

Avaliação	Secagem Convencional (mm /m)	Secagem Combinada (mm /m)
Após desdobro	0,29	0,10
Após secagem	0,87	0,05

Observa-se (Tabela 18) que as tábuas na secagem convencional apresentaram um aumento da flecha média do arqueamento após a secagem, mesmo o arqueamento sendo baixo após o desdobro, as tábuas continuaram a arquear, durante a perda de umidade. Já na secagem combinada houve uma diminuição da flecha média do arqueamento após a secagem, podendo ser considerado muito baixo. Em ambos os métodos analisando as flechas médias conforme a NBR 14806-ABNT (2002) todas as peças apresentaram flecha inferior a 5 mm/m, não se apresentando como defeituosas. Os resultados observados são similares aos encontrados por Severo (1998) que avaliando três programas de secagem com intensidades variadas para *E. grandis*, não verificou peças com arqueamento acima de 5 mm/m para o programa mais suave. Rosso (2006), por outro lado, encontrou valores superiores na flecha do arqueamento na secagem combinada no inverno para madeira de *E. grandis* que apresentou menores porcentagens de peças afetadas quando comparada ao verão. Susin (2012) também obteve um

acréscimo da flecha média do arqueamento para madeira de *E. saligna* seca em câmara convencional.

As maiores médias das flechas do arqueamento na secagem convencional pode ter sido resultado da diferença de teor de umidade inicial em comparação com teor de umidade inicial da secagem combinada (decorrente da pré-secagem), visto que as contrações na secagem convencional foram maiores e principalmente pelo fato de a madeira apresentar ainda tensões nas tábuas. Rocha (2000) afirma que a manifestação desse defeito está mais associada às tensões do que o processo de secagem.

A redução da flecha média na secagem combinada pode ter corrido pelas dimensões das tábuas serem menores, em função do arqueamento ser caracterizado pela curvatura ao longo do comprimento da tábua em sua extremidade, Martins (1988). Também pode ser explicada pelo fato de as peças já serem decorrentes da pré-secagem onde as flechas de arqueamento diminuíram, contribuindo positivamente com a redução do defeito quando seca em câmara convencional.

Lima (2005) complementa que o arqueamento pode ser minimizado durante a secagem, tendo-se procedimentos adequados desde o momento de desdobro das toras, no qual, toras que apresentam assimetria de medula, deve-se tomar cuidados com o posicionamento correto das toras no carro porta toras. Dentre os tipos de empenamentos, segundo Stangerlin et al. (2009), a manifestação do arqueamento nas peças ao final do processo de secagem é um dos defeitos que apresentam maiores dificuldades em relação ao seu controle, porque, durante a secagem, as tábuas ficam dispostas de modo que a restrição mecânica aplicada não atua lateralmente; com isso, existe maior dificuldade para evitar ou reduzir o surgimento de tal defeito.

4.8.4 Empenamento do tipo encurvamento na secagem convencional e combinada

Na tabela 19 são apresentados os valores médios de encurvamento para secagem convencional e combinada, após o desdobro, após secagem, para madeira de *Eucalyptus spp*.

TABELA 19-FLECHA MÉDIA DO ENCURVAMENTO PARA SECAGEM CONVENCIONAL E COMBINADA NA SECAGEM DA MADEIRA DE *Eucalyptus spp*

Avaliação	Convencional (mm/m)	Combinada (mm/m)
Após desdobro	1,03	1,51
Após secagem	1,34	1,33

Conforme análise da Tabela 19, pode-se observar que logo após o desdobro tanto na secagem convencional como a secagem combinada as tábuas já apresentavam encurvamento. Na secagem combinada o índice de peças encurvadas também foi maior. Os valores observados são similares aos observados por Rocha (2000) que encontrou para *E. grandis* logo após desdobro encurvamento médio de 2,63 mm/m e uma redução após a secagem para 1,65 mm/m. Rosso (2006) também constatou uma redução média na flecha de encurvamento de 1,25 mm/m após a secagem combinada, para o *C. citriodora*, e de 1,39 mm/m para o *E. saligna*, comparando os valores antes e após a secagem.

Nota-se que após a secagem houve uma redução da flecha média do encurvamento na secagem combinada e um aumento no encurvamento médio para secagem convencional. Esse decréscimo na secagem combinada pode ser atribuído ao fato de que, no momento de realizar o empilhamento das tábuas, teve-se o cuidado de posicionar as peças com encurvamento na posição inferior da pilha (primeiras camadas) e com a face côncava voltada para baixo, fazendo que esse índice fosse reduzido. A utilização de cargas adicionais sobre as pilhas, assim como, a colocação das tábuas que apresentam encurvamento nas primeiras camadas de madeiras, favorecem a minimização deste defeito ao fim do processo de secagem (BEKELE, 1995; CINIGLIO, 1998, KLITZKE, 2007; SUSIN, 2012).

Quanto ao aumento do encurvamento na secagem convencional, este pode ser justificado pelo fato de que a madeira apresenta maior teor de umidade inicial (estado verde), diferentemente da secagem combinada que passou por uma pré secagem, onde a água da madeira foi removida gradualmente. Outro fato que pode ter ocorrido é uma maior proporção de peças tangencias. Brandão (1989) relatou que o encurvamento ocorre em função das diferentes retrações que ocorrem na madeira em razão da secagem mais acelerada em uma face frente à outra. A presença de lenhos anormais, assim como, tábuas orientadas tangencialmente favorecem o encurvamento da madeira. Simpson (1991) e Denig et al. (2000) ainda relataram que o encurvamento não é um dos defeitos mais problemáticos na madeira, visto que o mesmo pode ser eliminado realizando o correto empilhamento das madeiras nas pilhas para a secagem. Sendo que o encurvamento é influenciado mais pelo empilhamento em si do que somente o processo de secagem (KLITZKE, 2007).

Para a classificação de qualidade das peças no encurvamento, foi adotado o mesmo procedimento descrito para o arqueamento. O percentual de peças adequadas e defeituosas são apresentados na Tabela 20.

TABELA 160-CLASSIFICAÇÃO DAS TÁBUAS QUANTO AO ENCURVAMENTO, EM PERCENTUAL PARA SECAGEM DA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp

Secagem	Avaliação	% de tábuas	
		Adequadas	Defeituosas
Convencional	Após desdobro	98,34%	1,66%
	Após secagem	91,67%	8,33%
Combinada	Após desdobro	96,67%	3,33%
	Após secagem	98,34%	1,66%

Analisando a Tabela 20, nota-se que para a secagem convencional a porcentagem de tábuas defeituosas maiores que 5 mm/m após a secagem foi de 8,33% e que mesmo com esse aumento, 91,67% das tábuas foram adequadas para posteriores usos. Na secagem combinada somente 1,66 % das tábuas foram classificadas como defeituosas, após a secagem, sendo 98,34% adequadas. Pode-se dizer que a secagem combinada almejou melhores resultados na qualidade da madeira após a secagem para o empenamento referido. Stangerlin et al. (2009) obtiveram resultados semelhantes a este estudo quanto à incidência de peças com encurvamento após a secagem, para as madeiras de *C. citriodora*, *E. saligna* e *E. tereticornis*, tanto na secagem ao ar quanto em estufa solar. Rosso (2006) praticamente não verificou peças com encurvamento acima do admitido para as madeiras de *E. grandis*, *C. citriodora* e *E. saligna*, em secagem combinada em duas estações do ano (verão e inverno).

Valores superiores foram encontrados por Santos (2002), na secagem de *E. grandis* utilizando secagem combinada. O autor encontrou, desde a madeira úmida, 93% das peças afetadas aumentado para 98,6% ao final da secagem. Utilizando métodos de secagem com e sem aspersão, Ciniglio (1998), por outro lado, encontrou maiores porcentagem de peças com encurvamento para *E. grandis*, 71,2 e 73,1% na condição verde, 71,2 e 71,2% no PSF e 66,7 e 76% na condição seca, respectivamente.

4.8.5 Empenamento do tipo encanoamento na secagem convencional e combinada

A flecha média do encanoamento, para a secagem convencional e combinada nas avaliações após desdobro e após secagem é apresentada na tabela 21, para madeira de *Eucalyptus* spp.

TABELA 171-FLECHA MÉDIA DO ENCANOAMENTO NA SECAGEM CONVENCIONAL E COMBINADA DA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp

Avaliação	Convencional (mm)	Combinada (mm)
Após desdobro	0,28	0,48
Após secagem	1,11	0,48

Nota-se que em ambos os métodos, as tábuas já apresentavam após o desdobro um baixo índice de encaamento, e que na secagem convencional o índice de encaamento aumentou após a secagem, e se manteve constante na secagem combinada após o processo de secagem (0,48 mm). Susin (2012) encontrou valores similares a esse estudo, com valores médios de 1,11mm para madeira de *E. robusta*, e para madeira de *C. citriodora* e *E. saligna* encontrou uma flecha de 0,75 mm.

Esses valores na secagem combinada são decorrentes de as tábuas já estarem com um baixo teor de umidade, decorrente da pré-secagem, onde os índices de encaamento foram baixos, e que as contrações das tábuas, não foram expressivas, tornando esse defeito muito pouco presente, além desses fatores um bom empilhamento também realizado na câmara de secagem favoreceu esses baixos índices. Segundo Ponce (1995), o encaamento é um defeito decorrente da grande diferença entre a contração radial e contração tangencial, o que pode ser contornado durante o empilhamento adequado durante a secagem.

É necessário destacar que o valor máximo admitido pela NBR 14806 (2002) para este defeito é de 4 mm. Em ambos os métodos todas as tábuas ficaram abaixo, assim afirma-se que 100% das tábuas foram classificadas como adequadas, não apresentando peças defeituosas. Rosso (2006) e Stangerlin et al. (2009) também não verificaram peças com encaamento superior a 4 mm para *C. citriodora* e *E. saligna*, resultados são similares a este estudo. Severo (1998) ao contrário, avaliando três programas de secagem, com intensidades variadas, para *E. grandis*, e verificou que 15% das peças apresentaram encaamento acima de 4 mm para o programa mais suave, constatando 30 e 42,5% de peças defeituosas para os outros dois programas avaliados.

Batista (2009) obteve um percentual de peças que apresentou encaamento igual a 67,90%, 60,49% e 74,07% para madeiras de *E. saligna*, *E. grandis* e *E. dunnii*, respectivamente. O mesmo autor considerou que essas madeiras apresentaram grande tendência a manifestar esse tipo de defeito de secagem, diferente ao encontrado neste estudo onde 100% das peças foram adequadas.

O acréscimo encontrado para o índice de encaçamento na secagem convencional pode ser justificado (Figura 23) pela presença de tábuas próximas da medula e por apresentarem face tangencial e radial na mesma tábua. Vários autores mencionam o encaçamento como um defeito constante e intenso em tábuas de *Eucalyptus*, principalmente as desdobradas tangencialmente. PANDEY et al. (1984) apud DEL MENEZZI (1999), ao serrar eucalipto corte tangencial, observaram que tábuas contendo a medula apresentaram durante a secagem fendas superficiais acompanhadas de um moderado a severo encaçamento.

De acordo com Ponce (1995), o defeito de encaçamento é uma problemática na secagem de madeiras de eucalipto, principalmente quando realizadas em condições de alta temperatura. A utilização de baixas temperaturas como neste estudo, propicia uma redução na susceptibilidade da madeira de eucalipto apresentar esse defeito.



FIGURA 23-ENCAÇAMENTO EM TÁBUAS NA SECAGEM CONVENCIONAL
NA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp

FONTE: a autora (2016).

4.8.6 Colapso

A Tabela 22 apresenta a porcentagem do colapso, o nível de colapso e a deformação média (dc) das tábuas para os métodos de secagem convencional e combinada.

TABELA 18-PORCENTAGEM DE PEÇAS DEFEITUOSAS E NÍVEL DO COLAPSO PARA A MADEIRA DE *Eucalyptus* spp NA SECAGEM CONVENCIONAL E COMBINADA

Secagem	Peças com colapso (%)	Nível de colapso (%)			d _c médio (mm)
		Leve	Moderado	Severo	
Convencional	11,66	0,00	5	6,66	2,27
Combinada	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Nota: d_c = deformação média das tábuas que apresentaram colapso (mm).

Conforme a Tabela 22, a ocorrência do colapso foi presente para secagem convencional, apresentando uma alta porcentagem de peças com colapso (11,6%), onde 5% delas apresentaram-se com nível moderado e 6,66% um nível severo. Na secagem combinada não foi verificada a presença de colapso. A deformação média das tábuas também foi baixa. Ciniglio (1998) avaliando a secagem convencional de *E. grandis*, encontrou 8,3% das tábuas com colapso. Batista (2009) verificou que 28,40%, 35,80% e 55,56% das peças de *E. saligna*, *E. grandis* e *E. dunnii* apresentaram colapso após a secagem, resultados superiores aos encontrados neste estudo. Tal comportamento é explicado em virtude de que colapso ocorre durante a retirada da água capilar, estando diretamente relacionado com a permeabilidade da madeira, a qual é influenciada pela densidade, diâmetro dos capilares e obstruções dos capilares, tais como tiloses e pontoações aspiradas, dentre outros fatores (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

Apesar da baixa temperatura empregada até a remoção completa da água capilar, aliada à elevada umidade relativa, na secagem convencional, as tábuas apresentaram suscetibilidade à manifestação de colapso, o que é normal para madeiras como eucalipto. Considerando o potencial de secagem utilizado de 1,90 e a temperatura inicial de 40°C, a adoção de temperatura e potencial de secagem mais baixos para essa situação, seguiram recomendações de (PRATT, 1974; NORTHWAY, 1996; CINIGLIO, 1998; KEEY et al., 2000 e ANDRADE 2000). Reduzir ainda mais a temperatura e o potencial de secagem elevariam consideravelmente o tempo desta etapa, podendo torná-la inviável. Em função disso a baixa porcentagem de colapso foi satisfatória em ambos os métodos, ressaltando a qualidade da secagem final da madeira serrada.

A ausência do colapso na secagem combinada, é pelo fato de a madeira ter perdido água capilar na secagem ao ar livre, onde o processo de remoção dessa água é lento diferentemente da secagem convencional, que mesmo utilizando baixas temperaturas no programa elaborado o defeito ocorreu, mas em percentuais baixos (Figura 24). Rosso (2006), observou resultados semelhantes a este estudo, não encontrando colapso na secagem combinada de *E. grandis*, *E.*

saligna e *C. citryodora* a. Assim como Stangerlin (2009), que também não obteve em seus resultados a presença colapso para três espécies de eucalipto na secagem ao ar livre e solar.



FIGURA 24-COLAPSO SEVERO NA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp EM SECAGEM CONVENCIONAL
FONTE: a autora (2016).

De modo geral quando se trata da secagem artificial, deve-se considerar a inclusão de uma etapa de tratamento de vaporização na tentativa de recuperar o colapso, caso não tenha ocorrido o rompimento da parede celular, (Blumhm e Kauman, 1965) recomendam que essa etapa seja realizada quando a madeira de eucalipto se encontrar no intervalo entre 15% e 20%, preferencialmente, ao teor de umidade de 17%. Os mesmos autores ainda recomendam uma a secagem ao ar livre, até a madeira atingir teor de umidade em torno de 30%, finalizando em estufa. Esse procedimento é mais economicamente viável, especialmente pelo fato da madeira permanecer por um tempo inferior dentro da câmara de secagem convencional, não ocasionando perdas de material.

4.8.7 Qualidade final após a secagem convencional e combinada

Na Tabela 23 encontram-se os valores médios do teor de umidade final e o gradiente médio de umidade para secagem convencional e combinada.

TABELA 193- TEOR DE UMIDADE FINAL E GRADIENTE DE UMIDADE PARA SECAGEM CONVENCIONAL E COMBINADA DA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp

Secagem	Teor de umidade Final (%)	1 (superfície)	2 (centro)	Gradiente de umidade (%)
Convencional	10,57 a (1,79)(16,94)	9,64 aB (1,14)(11,84)	12,90 aA (4,26)(33,04)	2,90 a (3,00)(103,5)
Combinada	10,55 a (1,23)(11,65)	9,93 Ab (0,80)(8,06)	11,76 aA (1,87)(15,94)	2,11 b (0,91)(43,05)

NOTA: umidades 1 equivalem à umidade final da superfície das tábuas e 2 a umidade em relação ao centro das tábuas. Médias seguidas pela mesma letra minúscula (vertical) e maiúscula (horizontal) não diferem estatisticamente entre si (Tukey, $p \geq 0,05$). Valores entre parêntesis corresponde ao coeficiente de variação (cv%)

Observa-se que os valores médios de teor de umidade final na secagem convencional e a combinada foi de 10,57% e 10,55% e que não difeririam estatisticamente entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Avaliando o teor de umidade final entre elas, percebe-se que ambas secaram com maior teor de umidade final, diferente do que o estabelecido no programa de secagem, que foi de 9%. A justificativa pelo aumento das umidades finais para ambos os métodos de secagem avaliados pode ter sido a forma em que foi conduzida a etapa de condicionamento das madeiras, utilizando-se umidade de equilíbrio superior à umidade desejada para a finalização da secagem, assim como, o tempo de condicionamento adotado (oito horas). Batista (2009) obteve teores de umidade médios semelhantes, encontrando valores de 10,08%, 9,96% e 11,45%, para as madeiras de *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*, na secagem em câmara convencional.

Ainda conforme a tabela 23, para a umidade da superfície (1) e umidade no centro (2) das tábuas, essas não diferiram estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade entre os tratamentos (convencional e combinada), nem como o gradiente de umidade. Tanto na secagem convencional como na combinada as diferenças de umidade superfície e centro diferiram estatisticamente entre ao nível de 5%. Percebe-se como esperado que as superfícies das tábuas apresentaram gradiente menor na superfície (1) do que no centro (2). Tal resultado é porque a face superior das tábuas sofre maior influência da convecção forçada, secando mais rápido.

Ainda pela análise da Tabela 23, o gradiente de umidade na secagem combinada for menor em relação ao gradiente da secagem convencional, sendo estatisticamente diferentes entre si ao nível de 5% de probabilidade. Loiola (2015) avaliando a secagem da madeira de Teca (*Tectona grandis*) seca pelos programas com potencial de secagem 3,4, tiveram gradientes de umidade de 2,07 e 2,34; 1,57 e 1,44; 2,03 e 2,48%, valores similares ao encontrados neste estudo. O gradiente de umidade de 2,90% apresentado pela secagem convencional foi inferior

aos 4% obtidos por Ciniglio (1998) para a madeira de *E.grandis*. Os gradientes em ambos os métodos foram baixos, podendo ser justificados pela secagem uniforme e homogênea da madeira. De acordo com Mellado (1993), mesmo tendo gradientes de umidades pequenos esses levam a incidência de tensões de secagem nas tábuas.

O gradiente de umidade formado nas madeiras está diretamente relacionado com a presença de tensões de secagem (Tabela 24), no qual quanto maior o gradiente, maior a incidência tensões de secagem nas madeiras de Eucalipto.

TABELA 24-TENSÕES DE SECAGEM PARA SECAGEM CONVENCIONAL E COMBINADA DA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp

Secagem	Tensões de secagem (%)		
	Suave	Forte	Ausente
Convencional	0	100	0
Combinada	60	20	20

Observa-se (Tabela 24) que as tensões de secagem convencional foram 100 % fortes, e presentes em todas as tábuas. Já na secagem combinada essas tensões diminuíram apresentando 60% de tensões suaves e 20% fortes. O baixo índice de tesões na secagem combinada tem estreita relação com o gradiente de umidade referido anteriormente, menores gradientes de umidade proporcionaram menores índices de tensões na madeira. Outro fator que pode ser evidenciado é a qualidade da secagem ao ar livre que contribuiu positivamente para a maior qualidade na secagem combinada fazendo com que a ocorrência das tensões fosse mais suave. Batista (2009) encontrou tensões de secagem inferiores a este estudo para madeira de *E. saligna*, *E. grandis*, com valores de 88,89; 81,41%, na secagem convencional. Santos (2002) obteve valores superiores a este estudo também encontrando 75% das peças tensionadas, para madeira de *E. grandis*, em secagem combinada.

O gradiente de umidade e as tensões de secagem se correlacionaram diretamente com os defeitos de secagem, no qual quanto maior o gradiente de umidade, mais tensionada está a madeira, conseqüentemente, maiores os esses defeitos, relação inversa encontrada neste estudo, onde a secagem combinada apresentou baixos índices de defeito, com baixo gradiente e tensões, principalmente na secagem combinada.

Na secagem convencional, a elevada porcentagem de madeiras tensionadas, pode ser justificado principalmente pelo tempo de condicionamento (8 horas) ter sido provavelmente insuficiente. Recomenda-se que aumente esse tempo para que ocorra relaxamento das tensões com o aumento da umidade relativa, reduzindo a velocidade de secagem e o potencial de secagem (MELLADO, 1993). Alexion (1989), recomenda o condicionamento com temperatura

e umidade relativa elevadas ao final da secagem, como forma de recuperar o colapso e também aliviar as tensões de secagem. Loiola (2015) avaliando a secagem da madeira de Teca (*Tectona grandis*) encontrou tensões de secagem suaves, com valores médios de 42,31;30,77;37,04 % para um potencial de secagem de 3,4, valores inferiores a este estudo tanto em secagem convencional como combinada. Rosso (2006), por outro lado, avaliando a secagem combinada para *E. grandis* quando seco no verão encontrou 25% das amostras com tensões suaves, uma vez que todas as demais tiveram 100% das amostras com tensões fortes.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos para a secagem da madeira de *Eucalyptus* spp no presente estudo permitem as seguintes conclusões:

- A secagem ao ar livre apresentou, baixo índice de rachaduras de topo, com alta incidência de rachaduras de superfície, redução no arqueamento e encurvamento, e aumento do índice de encanoamento após a secagem.
- Na secagem em câmara convencional, a madeira de pré secagem (secagem combinada) apresentou uma redução de 50% do tempo de secagem quando comparada com a secagem da madeira verde;
- O programa desenvolvido e aplicado para madeira de *Eucalyptus* spp verde e pré-seco são considerados suaves.
- O programa de secagem aplicado para madeira verde apresentou alto índice de tensão de secagem e presença de colapso.
- A secagem combinada apresentou melhores resultados na qualidade da madeira, em relação à secagem convencional, obtendo menor índice de defeitos, não ocorrendo colapso, menores contrações, menores gradientes de umidade e menos tensões de secagem.

Em função dos resultados e das conclusões obtidas recomenda-se que:

- Sejam realizados mais estudos referentes a combinação de métodos de secagem, principalmente em outras épocas do ano na região Sul do Brasil.
- Análise da viabilidade econômica dos métodos de secagem e da combinação entre eles.

REFERÊNCIAS

- ALFONSO, V.A. **Caracterização anatômica do lenho e da casca das principais espécies de Eucalyptus L'Hérit Cultivadas no Brasil**. 188 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Botânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.
- ANDRADE, A. **Indicação de programas de secagem convencional de madeiras**. 72f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2000.
- ANDRADE, A; JANKOWSKY, I.P.; DUCATTI, M.A. Grupamento de madeiras para secagem convencional. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, n. 59, p. 89-99, jun. 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14806**. Madeira serrada de eucalipto - Requisitos. Rio de Janeiro. 2002. 11p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**. Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro. 1997. 107p.
- BAKER, W. J. **How wood dries**. Madison: Forest Products Laboratory, 1956. 9p.
- BARBOSA, C. G.; LIMA, J. T.; ROSADO, S. C. S.; TRUGILHO, P. F. Elaboração de programa de secagem para madeiras de clones de híbridos de Eucalyptus spp. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 1, p. 40-48, 2005.
- BATISTA, D. C. **Qualidade da secagem convencional conjunta da madeira de nove clones do gênero Eucalyptus**. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009.
- BAUER, L. A. F., **Materiais de construção**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora AS, 2ª edição. 2003. 705p.
- BEKELE, T. **Degradation of boards of Eucalyptus globulus Labill**. And Eucalyptus camaldulensis Dehnh. during air drying. *Holz Roh Werkst*, v. 53 n. 6, p. 407-412, 1995.
- BENNETT, C. O.; MYERS, J. E. **Fenômenos de transporte: Quantidade de movimento, calor e massa**. Trad. de E.W. Leser. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1978. 812p.
- BLUHM, E.; KAUMAN, W.G. **El colapso en la madera y su reacondicionamiento**. Informe Técnico, Santiago, Chile, n.22, p.1-23, 1965.
- BRANDÃO, A. T. O. **Determinação de metodologia para a indicação de programas de secagem de madeiras**. 100f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.
- CAMPBELL, G. S.& HARTLEY, J. Drying and dried. In: HILLIS, W. E.; BRONW, A. G. (Eds). **Eucalyptus for wood production**. Australia: CSIRO, Chapter 16. 1984.

CAMPBELL, G.S.& HARTLEY, J. Drying and dried wood In: HILLIS, W.E.; BROWN, A.G. ***Eucalyptus* for wood production**. Melbourne: Academic Press,. Cap 16, p. 328-336. 1988

CARMO, A. P. T. **Avaliação de algumas propriedades da madeira de seis espécies de eucalipto**. 74f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1996.

CAVALCANTE, A. de A. **Ocorrência do colapso na secagem da madeira de *Eucalyptus***. 1991.

CHRISTENSEN, F.J. **High temperature drying of hardwoods increases kiln throughput**. For. Products Newsletters, n. 2, Out.,. New Series. 1985.

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

COMISSÃO PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. COPANT 461. Determinación del peso específico aparente. 1972. 8p.

CONCANNON, A. ***Eucalyptus*-An added value species in New Zealand**. Australian Forest Industries J. , Sydney ,n.4 ,p .60-6 3p ,1982 .

DEL MENEZZI, C. H. S. & NAHUZ, M. A. R. Técnicas de desdobro utilizadas para madeira de eucalipto – uma revisão bibliográfica. **Árvore**, v.22, n. 3.Viçosa-MG, 1998 p. 415-428.

DEL MENEZZI, C. H. S. **Utilização de um método combinado de desdobro e secagem para a produção de madeira serrada de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *E. Cloeziana* F. Muell** . 87p. Dissertação de mestrado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – USP. Piracicaba, 1999.

DENIG, J.; WENGERT, E. M.; SIMPSON, W. T.. **Drying hardwood lumber**. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–118. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 138 p. 2000.

DUARTE, M. M.; TREVISAN, R.; SUSIN, F.; ZEN, L.R. VALERIUS, J. Drying curve and defects of *Eucalyptus* sp. wooden submitted to air drying. **Spanish Journal of Rural Development**, Vol. VI (3-4 p.161-170, 2015.

DUCATTI, M. A. **Diagnóstico da secagem convencional de madeiras no Estado de São Paulo. Piracicaba**. 84 f. Tese (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2000.

FERNANDES, P. S.; GALVÃO, A. P. M. Gradiente de umidade em peças de jatobá (*Hymenaea stilbocarpa* Hayme). **Silvicultura em São Paulo**, São Paulo, 11/12: 87-92, 1978.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook—Wood as an engineering material**. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 508 p. 2010

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Air drying of lumber**. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-117. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 62 p. 1999.

FRANZONI, J. A. Utilização da madeira de eucalipto na indústria de móveis e padrões de qualidade da madeira para móveis de exportação. In: SEMINÁRIO MADEIRA DE EUCALIPTO: TENDÊNCIAS E USOS, Curitiba, 2001. **Anais...** Curitiba: FUPEF, 2001. p. 50-52.

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

GOMIDE, J.L. **Secagem da Madeira**. Viçosa: UFV, 76p. 1974.

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

HART, C.A. **The Drying of Wood**. Raleigh, North Carolina Agric. Extension Service. 24p. 1966.

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

HILDEBRAND, R. **Kiln drying of sawn timber**. Berlin: Maschinenbau GmbH, 1970.

ILIC, J.; HILLIS, W. E. Prediction of collapse in dried eucalypt wood. **Holzforschung**, v. 40, p.109-112, 1986.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ (2015). **Anuário estatístico da IBÁ 2015: ano base 2014**. Brasília: IBÁ, 2015. 100 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. **Banco de dados de madeiras brasileiras**. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br>>. Acesso em: 15 nov. 2015.

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, 109-118p, 1995.

JANKOWSKY, I. P. **Fundamentos do controle de qualidade**. Revista Indústria Moveleira, São Paulo, n.25, p.40-4. 1991.

JANKOWSKY, I. P. **Metodologia simplificada para a indicação de programas de secagem.** 2009. 112f. Tese (Livre docência em Ciência e Tecnologia da Madeira), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2009.

JANKOWSKY, I. P. O controle do processo de secagem. In: SIMPÓSIO FLORESTAL DO RIO GRANDE DO SUL-TECNOLOGIA DA MADEIRA, 2., 1992, Santa Maria. **Anais...** Esteio: UFSM/AGEFLOR/CEPEF/FATEC, 1992. p. 2-19.

JANKOWSKY, I. P.; DUCATTI, M. A.; ANDRADE, A. **Avaliação da secagem da madeira de *Eucalyptus grandis*.** Convenio FIPAI/FINEP. Relatório final, Piracicaba, 1998. 15p.

JANKOWSKY, I. P.; SANTOS, G. R. V. Secagem da madeira serrada de eucalipto. Circular Técnica do IPEF. Piracicaba, n. 199, dez. 2003.

JANKOWSKY, I. P. **Potencialidade do creosoto de *Eucalyptus spp* como preservativo para madeiras.** 159p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1986.

JANKOWSKY, I. P.; SANTOS, G. R. V.; BALTIERI, G. Projeto de pesquisa cooperativa: avaliação comparativa da secagem da madeira serrada de *Eucalyptus grandis*. In: WORKSHOP SOBRE SECAGEM DA MADEIRA SERRADA, 3. Piracicaba, 2000. **Anais...** Piracicaba: ESALQ/LCF/IPEF, 2000.

JUNAC, Junta del acuerdo de Cartagena. **Manual del grupo Andino para el secado de maderas** 1º edição Lima,450p. 1989.

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

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

KLITZKE, R. J. Secagem da madeira. In: José Tarcísio da Silva Oliveira, Nilton César Fiedler, Marcelo Nogueira. (Org.). **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro.** Visconde do Rio Branco: Suprema Gráfica e Editora Ltda, 2007, v. 1, p. 271-366.

KLITZKE, R. J. **Uso do inversor de frequência na secagem de madeiras.** 2002. 239f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

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

KOCK, P. **Process for straightening and drying Southern pine 2 by 4,s in 24 hours.** For. Prod. J.21 (5):17-24, 1971.

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

LAMPRECHT, H. **Silvicultura nos trópicos: ecossistemas florestais e respectivas espécies arbóreas - possibilidades e métodos de aproveitamento sustentado**. Tradução: Guilherme de Almeida Sedas e Gilberto Calcagnotto. Rossdorf: TZ – Verl-Ges. (GTZ). 343 p., 1990

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

LOIOLA, P. L. Secagem da madeira de teca (*Tectona grandis* L. f) sob diferentes condições. 2015. 221f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)- Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

LUÍS, R. C. G. **Processo de vaporização na homogeneização da cor da madeira de *Eucalyptus saligna* Smith e seu efeito nas propriedades tecnológicas**. 2014. 107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2014.

MARCHIORI, J. N. C.; SOBRAL, M. **Dendrologia das Angiospermas Myrtales**. Editora UFSM. Santa Maria, 1997.

MARTINS, V. A.; GOUVEIA, F. N.; MARTINEZ, S. Secagem convencional de madeira de Eucalipto Parte I: *Eucalyptus cloeziana* F. Muell, *E. grandis* Hill ex Maiden e *E. pilularis* Sm. **Brasil Florestal**, n. 70, p. 42-47, 2001.

MARTINS, V. A.; GOUVEIA, F. N.; MARTINEZ, S. Secagem convencional de madeira de Eucalipto. In: Congresso internacional sobre ecossistemas florestais, 5., Curitiba, 1999. **Anais...** Curitiba: Biosfera, 1998.

McMILLEN, J.M. **Drying stresses in red oak**. Forest products journal, Madison, 5 (2): 71- 6, 1955.

McMILLEN, J.M. **Stresses in wood during drying**. Madison, Forest Products laboratory, 52p. 1963.

MELLADO E. C. E. R. **Modelo de transferencia de calor e massa na secagem de madeira serrada de *Pinus***. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007. 169p.

MELLADO, E. C. E. R.. **Contribuição ao desenvolvimento tecnológico para a utilização de madeira serrada de *Eucalyptus grandis* (Hill Ex Maiden) na geração de produtos com maior valor agregado**. Dissertação (Mestrado em ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1993. 133f.

MELLADO, E. C. E. R.; TOMASELLI, I. Secagem de madeira serrada de *Eucalyptus viminalis*. **Ciência Florestal**, v. 3, n.1, Santa Maria: CEPEF, p.147-159, 1993.

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

MENDES, A. S.; MARTINS, V. A.; MARQUES, M. H. B. **Programas de secagem para madeiras brasileiras**. Brasília: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 1998. 114p.

NAHUZ, M. A. Informações técnicas. São Paulo, SP: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, 1998. New York: McGraw-Hill, 1949. 652p.

NEUMAN, R. Kiln drying young *Eucalyptus globulus* boards from green. In: WOOD DRYING SIMPOSIUM, 1989, Seattle. **Proceedings....** IUFRO, p. 107-115. 1989.

NORTHWAY, R.L. Drying strategies for plantation-grown eucalypts In: INTERNATIONAL IUFRO WOOD DRYING CONFERENCE, 5., Quebec, 1996. **Proceedings...** Quebec: IUFRO, p. 289-296. 1996.

OLIVEIRA, J. T. S., CARVALHO, A. M. L. Secagem e Preservação da Madeira de Eucalipto. **Revista da Madeira**, n. 55, p. 58-61, 2001.

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

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMEISTER, J. C.; SIMÕES, J. W.; FILHO, T. M. Caracterização da madeira de sete espécies de eucaliptos para a construção civil: avaliações dendrométricas. **Scientia Forestalis**. Piracicaba – SP, n. 56, p. 113-124, 1999.

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

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

PEREIRA, J. C. D.; STURION, J. A.; HIGA, A. R.; HIGA, R. C. V.; SHIMIZU, J. Y. Características de madeiras de algumas espécies de eucaliptos plantadas no Brasil. **Documentos da Embrapa Florestas**, Colombo, nº 38. 2000.

PERELYGIN, L. M. **Science of wood**. Moscow: Higher School Publishing House, 1965. 200p. PIMENTEL GOMES, F. 2000. **Curso de estatística experimental**. 14. ed. Piracicaba: Nobel, 477 p.

PONCE, R. H.; Madeira serrada de eucalipto: desafio e perspectivas. In: Seminário internacional de utilização da madeira de eucalipto para serraria, 1995, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IPEF, p. 50-58. 1995.

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

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

RASMUSSEN, E.F. **Dry Kiln operator's manual**. Madison: USDA (Agriculture Handbook n.188). 197p, 1961.

REEB, J. E. **Drying wood, Cooperative Extension Service**. University of Kentucky . College of agriculture. F 55, 8p. 1997.

REMADE.... EUCALIPTO, pesquisa amplia usos. Revista da Madeira, agosto, 2003. 138p. (Edição especial).

ROCHA, M. P. ***Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus dunnii* Maiden como Fontes de Matéria Prima para Serraria**. 186f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

ROSSO, S. **Qualidade da madeira de três espécies de eucalipto resultantes da combinação dos métodos de secagem ao ar livre e convencional**. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

SALAMON, M.; MCLNTYRE, S. Manipulation of Air Velocity Permits Drying Time Savings. **Canadian Forest Industries**, v, 89, n .9, p. 49-57, 1969.

SANTINI E. J. **Secagem da madeira serrada em estufa solar e sua comparação com os métodos convencionais**. 185f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1981.

SANTINI, E. J. Métodos de secagem de madeira. In: I Seminário sobre secagem de madeira, 1, 1992, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM/CEPEF/FATEC, 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. 2002.

SANTINI, E. J.; TOMASELLI. I. Uso da queda de temperature na passagem de ar pela pilha como instrumento de controle do processo de secagem de madeiras. **Árvore**.Viçosa. v21. n°2 p. 269-277, 1997.

SANTOS, G. R. V. **Otimização da secagem da madeira de *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden)**. 70f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia da Madeira) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2002.

SANTOS, G. R. V.; JANKOWSKY, I. P.; ANDRADE, A. Curva característica de secagem para madeira de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 63, p. 214-220, 2003.

SEVERO, E.T.D. **Estudo sobre o efeito da vaporização nas propriedades e comportamento de secagem da madeira de *Eucalyptus dunnii* Maid.** 200 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1998.

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

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

SIAU, J. F. **Transport processes in wood.** Berlin: Springer-Verlag, 1984. 245p.

SIAU, J. F. **Wood: influence of moisture on physical properties.** Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University / Department of Wood Science and Forest Products, 1995.

SILVA, J. C. Eucalipto: a madeira do futuro. **Revista da Madeira**, Edição especial, 114p. 2001.

SILVA, J. R. M., MENDES, L. M., WENZEL, M. K. Secagem ao ar livre da madeira de *Eucalyptus grandis* para a produção de móveis. **Cerne** v. 3, n. 1, p. 170-186, 1997.

SILVA, M. R. da **Determinação da permeabilidade em madeiras brasileiras de florestas plantadas.** 135 f. Dissertação (Mestrado Ciência de Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos/ Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SIMPSON, W. T. **Dry kiln operator's manual.** Madison: U.S. Department of Agriculture, 1991. 274p.

SKAAR, C. **Wood-water relations.** Berlin: Springer-Verlag, 263p. 1988.

SKAAR, C. **Capillary water movement in wood.** Madison, Forest Products Society, 4p.1964.

SKOLMEN, R. G.; **Robusta Eucalyptus Wood: Its Properties and Uses. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station.** Berkeley, California Forest Service - U.S. Department of Agriculture. p.12. 1963.

SOARES R. V, BATISTA A. C; TETTO A. F. **Metereologia e climatologia florestal.** 2015. 215 p. Curitiba, 2015.

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

STCP-ENGENHARIA DE PROJETOS Ltda. **Secagem de madeiras serradas.** Curitiba: 1990. 68p.

STEEL, R. G. D. & TORRIEL, J. H. Principles and procedures of statistics. New York. McGrae – Hill, 481p. 1960.

STOHR, H. P. The seasoning of South African grown *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus saligna*. **South African Forestry Journal**, n 102, p. 61-66, 1977.

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

SUZIN, F.; SANTINI, E.J.; STANGERLIN, D. M.; MOARIS, W.W.C.; MELO, R.R. Taxa de Secagem e Qualidade da Madeira Serrada de *Hovenia dulcis* Submetida a Dois Métodos de Secagem. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v.21(2) p.243-250, 2014.

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

TOMASELLI, I. **Effect of high temperature drying on properties of *Pinus radiata***. 1977. 264f. Tese (Doutorado em Wood Science), University of Melbourne, Melbourne. 1977.

TOMASELLI, I. Secagem a alta temperatura um processo aplicável as condições brasileiras. In: SEMINÁRIO DE UTILIZAÇÃO DE MADEIRAS TROPICAIS DE POVOAMENTOS NATURAIS E ARTIFICIAIS NA INDUSTRIA MADEREIRA MODERNA, 1978, Curitiba. **Seminário ...** Curitiba: FUPEF, 1978. p. 62-70.

TOMASELLI, I. **Secagem de madeira**. Curitiba: FUPEF, 1981. 29p.

TRUGILHO, P. F.; VITAL, B. R. Correlação entre algumas características físicas, químicas e anatômicas e a variação dimensional da madeira de eucalipto. **Árvore**, Viçosa, v. 20, n. 4, p. 515-533, 1996.

VERMAAS, H. F. Drying eucalypts for quality: Material characteristics, pre-drying treatments, drying, methods, schedules and optimization of drying quality. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, 1995, São Paulo. **Anais...** Piracicaba: IPEF, IPT, p.119-132. 1995.

VISCARRA S. **Guía para el secado de la madera em hornos**. Bolivia: USAID. Documento Técnico. 69p. 1998.

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

WENGERT, E. M.; DENIG, J. Lumber drying today and tomorrow. **Forest Products Journal**. Madson, v. 45, n. 5, p. 22 – 30, 1995.

WILSON, P. G.; O'BRIEN, M. M.; GADEK, P. A.; QUINN. C. J. Myrtaceae revisited a reassessment of infrafamilial groups. **American Journal of Botany**, v. 88, n. 11, p. 2013-2025, mai. 2001.

Watson, L., and Dallwitz, M.J. 1992 onwards. **The families of flowering plants: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval**. Version: 16th February 2016.