

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

**AVALIAÇÃO DO USO DE ESTUFA SOLAR PARA  
SECAGEM DE MADEIRA SERRADA DE EUCALIPTO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Diego Martins Stangerlin**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2009**

# **AVALIAÇÃO DO USO DE ESTUFA SOLAR PARA SECAGEM DE MADEIRA SERRADA DE EUCALIPTO**

**por**

**Diego Martins Stangerlin**

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

**Orientador: Prof. Dr. Elio José Santini**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2009**

S785a	<p>Stangerlin, Diego Martins, 1985-</p> <p>Avaliação do uso de estufa solar para secagem de madeira serrada de eucalipto / por Diego Martins Stangerlin ; orientador Elio José Santini. - Santa Maria, 2009. 113 f. ; il.</p> <p>Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2009.</p> <p>1. Engenharia florestal 2. Madeira 3. Secagem solar 4. Secagem da madeira 5. Qualidade da madeira 6. Madeiras refratárias I. Santini, Elio José, orient. II. Título</p> <p>CDU: 630*83</p>
-------	--

Ficha catalográfica elaborada por  
Luiz Marchiotti Fernandes – CRB 10/1160  
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM

“É permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte - O autor”

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Ciências Rurais  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**AVALIAÇÃO DO USO DE ESTUFA SOLAR PARA SECAGEM DE  
MADEIRA SERRADA DE EUCALIPTO**

elaborada por  
**Diego Martins Stangerlin**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Florestal**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

**Elio José Santini, Dr.**  
(Presidente/Orientador)

**Éverton Hillig, Dr.**  
(UNICENTRO)

**Leonardo da Silva Oliveira, Dr.**  
(UFPel)

**Darci Alberto Gatto, Dr.**  
(UFPel)

Santa Maria, 06 de março de 2009.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, em primeiro lugar, à Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, pela oportunidade de realização do mestrado.

Ao professor Elio José Santini, pela oportunidade, estímulo, confiança e disponibilidade para me orientar no decorrer desse trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao acadêmico Felipe Susin, pelo imenso apoio em todas as etapas do trabalho.

Aos funcionários Tarso Michelotti e Néelson de Castro pelo auxílio durante a execução deste trabalho.

Aos professores Darci Alberto Gatto, Leonardo da Silva Oliveira e Éverton Hillig pela disponibilidade em participarem da banca examinadora.

Aos colegas do Laboratório de Produtos Florestais e PPGEF, pelo auxílio, amizade e convivência: Rafael Melo, Marcos Müller, Thiago Cunha, Dane Araldi, Leandro Calegari, Cláudio Thomas, Arthur Soligo, Rafael Beltrame, Magnos Vivian, Karina Modes e Rômulo Trevisan.

À minha namorada Elisangela Pariz pelo amor, estímulo e apoio constante.

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal  
Universidade Federal de Santa Maria

### **AVALIAÇÃO DO USO DE ESTUFA SOLAR PARA SECAGEM DE MADEIRA SERRADA DE EUCALIPTO**

AUTOR: DIEGO MARTINS STANGERLIN

ORIENTADOR: ELIO JOSÉ SANTINI

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 06 de março de 2009.

O objetivo desse estudo foi avaliar o uso da estufa solar para secagem das madeiras de *Eucalyptus tereticornis*, *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora*, bem como comparar a metodologia com a secagem ao ar livre. Para tanto, foi desenvolvido um secador solar composto basicamente de estruturas de madeira, cobertura com dupla camada de plástico PVC, sistema coletor interno de luz solar e sistema de circulação do ar aquecido. A avaliação da eficiência do secador solar foi comparada à secagem ao ar livre nos seguintes aspectos: tempo e taxa de secagem, variação das condições ambientais e qualidade da madeira resultante da secagem. As três espécies de eucalipto utilizadas nesse experimento foram obtidas em povoamentos homogêneos, sendo o desdobro realizado por meio de cortes tangenciais. Cada espécie foi submetida, no mesmo período, aos dois métodos de secagem, utilizando-se uma carga com 60 tábuas em cada método. Os resultados obtidos indicaram que a estufa solar foi mais eficiente quanto ao tempo e à taxa de secagem. Os tempos de secagem em estufa solar foram em torno de 2 a 5 vezes menores que a secagem ao ar livre. Apesar dos ensaios terem sido realizados durante o inverno, com baixa insolação e radiação solar, a secagem em estufa solar apresentou taxas de secagem satisfatórias, semelhantes às observadas em secadores solares mais sofisticados espalhados pelo mundo. Mesmo quando as condições não eram propícias à secagem ao ar livre, a estufa solar apresentou maiores temperaturas e menores índices de umidade relativa do ar e de equilíbrio. A madeira seca, tanto na estufa solar quanto ao ar livre, apresentou boa qualidade, não sendo verificada a incidência de defeitos como encanoamento e colapso. Além disso, o adequado processo de empilhamento e secagem proporcionou minimização dos defeitos do tipo encurvamento. Apesar da maior ocorrência de peças arqueadas na secagem em estufa solar, a diferença entre as flechas de arqueamento, nos dois métodos de secagem, foi mínima. A incidência de rachaduras de topo resultantes da secagem em estufa solar foi inferior em relação ao ar livre apenas para a madeira de *Eucalyptus tereticornis*. Já a incidência de rachaduras superficiais resultantes da secagem em estufa solar foi inferior em comparação ao processo ao ar livre para as madeiras de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*.

Palavras-chave: secagem solar, secagem da madeira, qualidade da madeira, madeiras refratárias.

## ABSTRACT

Master's Thesis  
Master's Degree Program in Forest Engineering  
Federal University of Santa Maria

### EVALUATION OF THE USE OF SOLAR KILN FOR THE DRYING OF SAWED WOOD OF EUCALYPTUS

AUTHOR: DIEGO MARTINS STANGERLIN

ADVISOR: ELIO JOSÉ SANTINI

Date and place of defence: Santa Maria, March 06<sup>th</sup>, 2009.

This study aimed at evaluating the use of solar kiln for the drying of woods of *Eucalyptus tereticornis*, *Eucalyptus saligna* and *Corymbia citriodora*, as well as comparing the methodology to the air drying. In order to do so, it was built a solar kiln composed basically of wood structures, roofing with a double layer of PVC plastic, sunlight internal collector system and hot air circulation system. The efficiency of the solar kiln was compared to the air drying in the following aspects: time and drying tax, variation of the environmental conditions and wood quality resulting from the drying. The three eucalyptus species used in this experiment were obtained from homogeneous stands, and the cutting of logs into planks was tangential. In the same period of drying, each species was submitted to the two drying methods, being used a load with 60 boards in each method. Results indicated that the solar kiln had been more efficient as for time and drying tax. The time of drying in solar kiln was around 2 to 5 times faster than the air drying. Although the experiments were carried out in the winter, in low insolation and solar radiation, the drying in solar kiln presented satisfactory drying taxes, similar to those ones observed in more sophisticated solar kiln all over the world. Even when the conditions were not favorable to the air drying, the solar kiln presented higher temperatures and smaller indexes of moisture content and of equilibrium. The dried wood, in solar kiln and air drying, presented good quality, and no incidences like cup or collapse were verified. Furthermore, the correct piling up and drying process provided minimization of defects like bow. Despite the major occurrences of pieces with crook in solar kiln drying, the differences among the crook arrows, in the two drying methods, were insignificant. The incidence of end checking occurred from the drying in solar kiln was smaller in relation to the air drying only for woods of *Eucalyptus tereticornis*. On the other hand, the incidence of surface checks followed from the drying in solar kiln was inferior in comparison to the air drying process for the wood of *Corymbia citriodora* and *Eucalyptus saligna*.

Keywords: solar drying, drying wood, wood quality, refractory wood.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Materiais de cobertura e suas características (adaptado de Viehbeck, 1999).....	29
Tabela 2 – Equações ajustadas para a perda de umidade das três espécies em função do tempo de secagem em estufa solar e ao ar livre (t).....	54
Tabela 3 – Médias das taxas de secagem em estufa solar e ao ar livre para as três espécies estudadas.....	56
Tabela 4 – Taxa e tempo de secagem em estufa solar verificados por diversos autores. ....	57
Tabela 5 – Efeito do teor de umidade da madeira na correlação entre a diferença de temperatura máxima interna e externa a estufa solar, insolação e radiação solar. ....	62
Tabela 6 – Valores médios de insolação e radiação solar máxima, verificados acima e abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF) durante a secagem das três espécies estudadas.....	67
Tabela 7 – Contrações radial e tangencial e fator de anisotropia das três espécies estudadas expostas a secagem em estufa solar e ao ar livre.....	72
Tabela 8 – Índice de rachadura de topo médio e percentual de peças defeituosas nas três espécies estudadas. ....	73
Tabela 9 – Percentual de peças com defeito de rachaduras de superfície em cada uma das espécies estudadas. ....	76
Tabela 10 – Arqueamento médio e percentual de peças defeituosas nas três espécies estudadas.....	77
Tabela 11 – Encurvamento médio e percentual de peças defeituosas nas três espécies estudadas.....	80
Tabela 12 – Classificação das tensões de secagem (%) nas três espécies estudadas.....	82
Tabela 13 – Análise de variância para o índice de rachaduras de topo (%) na madeira de <i>Eucalyptus tereticornis</i> em função do método de secagem.....	101
Tabela 14 – Análise de variância para o índice de rachaduras de topo (%) na madeira de <i>Corymbia citriodora</i> em função do método de secagem.....	101
Tabela 15 – Análise de variância para o índice de rachaduras de topo (%)na madeira de <i>Eucalyptus saligna</i> em função do método de secagem. ....	101
Tabela 16 – Análise de variância para o índice de rachaduras de topo (%) na secagem em estufa solar em função da espécie.....	102
Tabela 17 – Teste de médias para o índice de rachaduras de topo (%) na secagem em estufa solar em função da espécie. ....	102
Tabela 18 – Análise de variância para o índice de rachaduras de topo (%) na secagem ao ar livre em função da espécie.....	102
Tabela 19 – Teste de médias para o índice de rachaduras de topo (%) na secagem ao ar livre em função da espécie.....	102
Tabela 20 – Análise de variância para a flecha de arqueamento (mm/m) na madeira de <i>Eucalyptus tereticornis</i> em função do método de secagem.	



.....	105
Tabela 21 – Análise de variância para a flecha de arqueamento (mm/m) na madeira de <i>Corymbia citriodora</i> em função do método de secagem.....	105
Tabela 22 – Análise de variância para a flecha de arqueamento (mm/m) na madeira de <i>Eucalyptus saligna</i> em função do método de secagem. ....	105
Tabela 23 – Análise de variância para a flecha de arqueamento (mm/m) na secagem em estufa solar em função da espécie. ....	106
Tabela 24 – Teste de médias para a flecha de arqueamento (mm/m) na secagem em estufa solar em função da espécie. ....	106
Tabela 25 – Análise de variância para a flecha de arqueamento (mm/m) na secagem ao ar livre em função da espécie.....	106
Tabela 26 – Teste de médias para a flecha de arqueamento (mm/m) na secagem ao ar livre em função da espécie.....	106
Tabela 27 – Dimensões médias e desvio padrão das tábuas das três espécies estudadas expostas a secagem em estufa solar e ao ar livre.....	109
Tabela 28 – Análise de variância para a flecha de encurvamento (mm/m) na madeira de <i>Eucalyptus tereticornis</i> em função do método de secagem.....	110
Tabela 29 – Análise de variância para a flecha de encurvamento (mm/m) na madeira de <i>Corymbia citriodora</i> em função do método de secagem.....	110
Tabela 30 – Análise de variância para a flecha de encurvamento (mm/m) na madeira de <i>Eucalyptus saligna</i> em função do método de secagem. ....	110
Tabela 31 – Análise de variância para a flecha de encurvamento (mm/m) na secagem em estufa solar em função da espécie.....	111
Tabela 32 – Teste de médias para a flecha de encurvamento (mm/m) na secagem em estufa solar em função da espécie. ....	111
Tabela 33 – Análise de variância para a flecha de encurvamento (mm/m) na secagem ao ar livre em função da espécie.....	111
Tabela 34 – Teste de médias para a flecha de encurvamento (mm/m) na secagem ao ar livre em função da espécie. ....	111

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplos de secadores solares com coletores externos (adaptado de BAUER, 2003).....	28
Figura 2 – Exemplos de secadores solares com coletores internos (adaptado de BAUER, 2003).....	31
Figura 3 – Secador solar utilizado no estudo. ....	35
Figura 4 – Parede Sul e parte interna da estufa solar. ....	36
Figura 5 – Parede Norte e as janelas para renovação do ar da estufa solar.....	37
Figura 6 – Parede Oeste e a parede vazada de tijolo. ....	39
Figura 7 – Carga de madeira em secagem ao ar livre. ....	41
Figura 8 – Confecção da amostra de controle (A) e seções para determinação do teor de umidade inicial (B). ....	42
Figura 9 – Demarcação dos pontos de medição das contrações tangenciais e radiais. ....	44
Figura 10 – Procedimento adotado para medição das rachaduras de topo em tábuas.....	45
Figura 11 – Procedimento adotado para medição do arqueamento de tábuas.....	47
Figura 12 – Procedimento adotado para medição do encurvamento de tábuas.....	47
Figura 13 – Procedimento adotado para medição do encanoamento de tábuas. ....	48
Figura 14 – Teste do garfo para detectar o nível das tensões de secagem (A= Retirada da amostra; B= Marcação da parte central da amostra para retirada do garfo; C= Avaliação das tensões de secagem; C1= Amostra livre de tensões; C2= Amostra com tensões suaves; C3= Amostra com tensões fortes). ....	49
Figura 15 – Curvas de secagem em estufa solar e ao ar livre para as três espécies estudadas.52	
Figura 16 – Taxas de secagem em estufa solar e ao ar livre para as três espécies estudadas. .55	
Figura 17 – Amplitude de variação dos dados de teor de umidade final após a secagem em estufa solar de <i>Eucalyptus tereticornis</i> (ET), <i>Corymbia citriodora</i> (CC) e <i>Eucalyptus saligna</i> (ES).....	59
Figura 18 – Relação entre as horas de insolação diária (Ins) e a temperatura interna máxima (Tmi) durante o período de secagem. ....	60
Figura 19 – Relação entre a radiação solar máxima (Rad) e a temperatura interna máxima (Tmi) durante o período de secagem. ....	61
Figura 20 – Relação entre o teor de umidade da madeira (TU) e a temperatura interna máxima (Tmi) durante o período de secagem. ....	62
Figura 21 – Variação das médias diárias de temperatura interna (Ti) e externa (Te) ao secador solar em duas faixas de secagem das três espécies estudadas: acima e abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF). ....	63
Figura 22 – Variação das médias diárias de umidade relativa interna (URi) e externa (URe) ao secador solar em duas faixas de secagem das três espécies estudadas: acima e abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF). ....	64

Figura 23 – Variação das médias diárias de umidade de equilíbrio interna (UEi) e externa (UEe) ao secador solar em duas faixas de secagem das três espécies estudadas: acima e abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF). .....	64
Figura 24 – Efeito da diferença de temperatura (DT) na umidade relativa do ar (UR) e umidade de equilíbrio (UEq) durante a secagem as três espécies estudadas.....	66
Figura 25 – Médias de temperatura observadas durante a secagem ao ar livre das três espécies estudadas.....	69
Figura 26 – Médias de umidade relativa observadas durante a secagem ao ar livre das três espécies estudadas. ....	69
Figura 27 – Médias de umidade de equilíbrio observadas durante a secagem ao ar livre das três espécies estudadas.....	70
Figura 28 – Médias de precipitação observadas durante a secagem ao ar livre das três espécies estudadas.....	70
Figura 29 – Médias de velocidade do vento observadas durante a secagem ao ar livre das três espécies estudadas. ....	71
Figura 30 – Vista superior da estufa solar, com circulação de ar indicada pelo sentido das setas, e seus detalhes construtivos (A= ventilador; B= área de empilhamento; C= parede vazada de tijolo; D= defletor; E= suporte para fixação do ventilador; F= chapa compensada; G= janelas para renovação do ar; H= porta de carga e descarga). ....	96
Figura 31 – Vista lateral da estufa solar e seus detalhes construtivos (A= suporte para fixação do ventilador; B= divisória de PVC; C= parede vazada de tijolo; D= fundação; E= camada dupla de PVC; F= chapa coletora; G= ventilador; H= chapa compensada; I= janelas para renovação do ar; J= porta de carga e descarga).....	97
Figura 32 – Variação da temperatura máxima interna (Tmi) e externa (Tme), e insolação (Ins) diária durante o período de secagem da madeira de <i>Eucalyptus tereticornis</i> .....	98
Figura 33 – Variação da temperatura máxima interna (Tmi) e externa (Tme), e insolação (Ins) diária durante o período de secagem da madeira de <i>Corymbia citriodora</i> .....	98
Figura 34 – Variação da temperatura máxima interna (Tmi) e externa (Tme), e insolação (Ins) diária durante o período de secagem da madeira de <i>Eucalyptus saligna</i> . ....	99
Figura 35 – Variação da temperatura máxima interna (Tmi) e externa (Tme), e radiação solar (Rad) diária durante o período de secagem da madeira de <i>Eucalyptus tereticornis</i> .....	99
Figura 36 – Variação da temperatura máxima interna (Tmi) e externa (Tme), e radiação solar (Rad) diária durante o período de secagem da madeira de <i>Corymbia citriodora</i> .....	100
Figura 37 – Variação da temperatura máxima interna (Tmi) e externa (Tme), e radiação solar (Rad) diária durante o período de secagem da madeira de <i>Eucalyptus saligna</i> . ....	100
Figura 38 – Amplitude de variação dos índices de rachaduras de topo após o desdobro e após a secagem em estufa solar e ao ar livre de <i>Eucalyptus tereticornis</i> . ....	103
Figura 39 – Amplitude de variação dos índices de rachaduras de topo após o desdobro e após a secagem em estufa solar e ao ar livre de <i>Corymbia citriodora</i> . ....	103
Figura 40 – Amplitude de variação dos índices de rachaduras de topo após o desdobro e após a secagem em estufa solar e ao ar livre de <i>Eucalyptus saligna</i> . ....	104

Figura 41 – Amplitude de variação dos dados de arqueamento após o desdobro e após a secagem em estufa solar e ao ar livre de <i>Eucalyptus tereticornis</i> . .....	107
Figura 42 – Amplitude de variação dos dados de arqueamento após o desdobro e após a secagem em estufa solar e ao ar livre de <i>Corymbia citriodora</i> . .....	107
Figura 43 – Amplitude de variação dos dados de arqueamento após o desdobro e após a secagem em estufa solar e ao ar livre de <i>Eucalyptus saligna</i> . .....	108
Figura 44 – Amplitude de variação dos dados de encurvamento após o desdobro e após a secagem em estufa solar e ao ar livre de <i>Eucalyptus tereticornis</i> . .....	112
Figura 45 – Amplitude de variação dos dados de encurvamento após o desdobro e após a secagem em estufa solar e ao ar livre de <i>Corymbia citriodora</i> . .....	112
Figura 46 – Amplitude de variação dos dados de encurvamento após o desdobro e após a secagem em estufa solar e ao ar livre de <i>Eucalyptus saligna</i> . .....	113

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	17
<b>2.1 Importância da secagem</b> .....	17
<b>2.2 Aspectos físicos da secagem</b> .....	17
2.2.1 Água na madeira .....	17
2.2.2 Fatores que influenciam na secagem .....	19
<b>2.3 Métodos usuais para secagem de madeiras refratárias</b> .....	22
2.3.1 Secagem ao ar livre .....	23
2.3.2 Secagem em estufa convencional .....	24
2.3.3 Secagem a vácuo .....	25
2.3.4 Secagem em pré-secador .....	25
2.3.5 Secagem em desumidificador .....	26
<b>2.4 Secagem em estufa solar</b> .....	26
2.4.1 Secador com coletor solar externo .....	27
2.4.2 Secador com coletor solar interno .....	28
<b>2.5 Defeitos de secagem</b> .....	31
2.5.1 Rachaduras .....	32
2.5.2 Empenamentos .....	32
2.5.3 Colapso .....	33
2.5.4 Endurecimento superficial .....	33
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	34
<b>3.1 Coleta e preparo do material</b> .....	34
<b>3.2 Secagem em estufa solar</b> .....	34
<b>3.3 Secagem ao ar livre</b> .....	40
<b>3.4 Taxa de secagem</b> .....	41
<b>3.5 Monitoramento do teor de umidade</b> .....	41
<b>3.6 Determinação das contrações radiais e tangenciais</b> .....	43
<b>3.7 Determinação da massa específica</b> .....	44
<b>3.8 Avaliação dos defeitos</b> .....	44
3.8.1 Rachaduras .....	45
3.8.2 Empenamentos .....	46
3.8.3 Tensões de secagem .....	48

3.8.4 Colapso .....	49
<b>3.9 Análise estatística .....</b>	<b>50</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>51</b>
<b>4.1 Curva e taxa de secagem .....</b>	<b>51</b>
<b>4.2 Variáveis ambientais na estufa solar .....</b>	<b>60</b>
<b>4.3 Variáveis ambientais ao ar livre .....</b>	<b>68</b>
<b>4.4 Contração da madeira .....</b>	<b>72</b>
<b>4.5 Qualidade da madeira resultante da secagem .....</b>	<b>73</b>
4.5.1 Rachaduras de topo .....	73
4.5.2 Rachaduras de superfície .....	75
4.5.3 Arqueamento .....	77
4.5.4 Encanoamento .....	79
4.5.5 Encurvamento .....	80
4.5.6 Colapso .....	81
4.5.7 Tensões de secagem .....	82
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>84</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>86</b>
<b>7 APÊNDICES .....</b>	<b>96</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O estabelecimento de um método de secagem influencia diversos fatores, tais como período de secagem, qualidade do material seco, bem como na obtenção de teores de umidade aceitáveis para determinados usos.

Dentre os métodos convencionais de secagem, amplamente empregados, verificam-se vantagens e desvantagens particulares que os caracterizam. A secagem ao ar livre, por exemplo, apesar de não necessitar de alto investimento inicial, tem o inconveniente de se realizar em um longo período de tempo, apresentar altos juros sobre o capital e o teor de umidade final, dificilmente, alcança índices abaixo da umidade de equilíbrio do ambiente em que se realiza o processo. Por sua vez, a secagem em estufa convencional é um processo que apresenta controle total das variáveis ambientais, possibilitando uma redução do tempo de secagem e uma otimização do controle da qualidade da madeira. Entretanto, esse processo é caracterizado por utilizar temperaturas elevadas (45-90°C), as quais não são apropriadas para madeiras de difícil secagem, devido a maior incidência de defeitos. Além disso, apresenta altos custos de investimento e manutenção, o que ocasiona certa restrição de seu emprego para secagem de madeiras em pequena e média escala.

Visando o desenvolvimento de um método intermediário entre a secagem ao ar livre e estufa convencional, entre o fim da década de 50 e início da década de 60, surgiram os primeiros estudos do emprego de estufas solares para secagem de madeira serrada (Troxell e Mueller, 1968). O princípio da secagem em estufa solar é de que o método seja de baixo custo operacional e apresente controle das condições de secagem.

O aspecto construtivo da estufa solar é composto, basicamente, por estrutura de madeira e cobertura transparente ou translúcida, de modo a favorecer a incidência dos raios solares no interior da câmara. O seu funcionamento se dá por meio de um sistema de coleta da energia solar para o aquecimento do ar e um sistema de distribuição do ar aquecido.

Atualmente, diversas pesquisas estão sendo realizadas em todo mundo, inclusive no Brasil, especificamente na Região Norte, com objetivo de aperfeiçoar esta metodologia no que diz respeito aos processos construtivos e de funcionamento.

O Brasil, por ser um país tropical e, conseqüentemente favorecido do ponto de vista de radiação solar, apresenta valores de insolação em torno de 2500 h/ano e uma potência média radiante de 1000 W/m<sup>2</sup> (Mendes, 1985), o que favorece o uso de secadores solares para retirada da umidade da madeira.

No entanto, são poucos os estudos que apresentam uma avaliação ampla da eficiência do método de secagem em estufa solar, como a qualidade do material obtido após a secagem, influência de diversas variáveis na taxa de secagem, bem como a diferenciação com métodos tradicionais, como a secagem ao ar livre.

A utilização de secadores solares em nível comercial ainda é rara. Isto se deve, em parte, a falta de experiência tecnológica quanto ao emprego de meios de captação e armazenamento da energia solar, bem como a sua posterior circulação dentro da câmara. A otimização no funcionamento desses meios é que torna o emprego da estufa solar bastante eficiente para secagem de madeiras, sendo inclusive apropriado para regiões que apresentam condições climáticas desfavoráveis para secagem ao ar livre.

Dessa forma, o objetivo desse estudo foi avaliar o uso da estufa solar, para secagem das madeiras de *Eucalyptus tereticornis* Sm., *Eucalyptus saligna* Sm. e *Corymbia citriodora* Hill & Johnson, bem como comparar a metodologia com a secagem ao ar livre.

Os objetivos específicos foram:

- Confeccionar as curvas de secagem para cada espécie e, por meio dessas, apresentar a variação do teor de umidade final entre os métodos;
- Calcular as taxas de secagem das três espécies e analisar o comportamento das mesmas ao longo da secagem nas duas metodologias;
- Avaliar as condições ambientais dentro e fora do secador solar, considerando os valores máximos e médios, bem como a eficiência da estufa solar na conservação do calor produzido para secagem da madeira;
- Avaliar a influência dos métodos de secagem nas contrações radial e tangencial da madeira;
- Avaliar a qualidade da madeira, no que tange aos defeitos resultantes de cada metodologia de secagem.



## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Importância da secagem**

A adequada secagem da madeira serrada, antes da sua transformação em bens e produtos, é reconhecidamente a fase mais importante de todo o processamento que visa agregar valor ao produto final (JANKOWSKY, 1995).

A presença de água influencia diversas propriedades da madeira. De acordo com o seu percentual pode causar limitações quanto ao uso da madeira em determinadas finalidades (WALKER et al. 1993; DESCH e DINWOODIE, 1996).

Segundo Ponce e Watai (1985), as principais razões para a submissão da madeira a um processo de secagem são: melhoria da resistência mecânica da madeira, resistência ao ataque de organismos xilófagos, redução dos custos de transportes, melhoria na trabalhabilidade, aumento da estabilidade dimensional e melhoria nas propriedades isolamento.

Além desses fatores, a importância da secagem pode ser quantificada pelo seu consumo energético, em que se gastam cerca de 70% da energia requerida para industrialização da madeira (MENDES, 1985). Dessa maneira, a retirada do conteúdo de umidade da madeira com minimização das perdas relativas aos defeitos de secagem favorece uma recuperação dos custos envolvidos nessa fase.

### **2.2 Aspectos físicos da secagem**

#### **2.2.1 Água na madeira**

A madeira, em “estado verde”, encontra-se saturada de água. Essa saturação varia de acordo com a espécie, entre toras e até mesmo dentro da própria tábua. A quantidade de água dentro da madeira, em “estado verde”, pode ser responsável pelo aumento do peso em 2 a 3 vezes (STUMPP, 1992).

A quantidade de água na madeira é conhecida como teor de umidade, e pode ser obtida pela Equação 1 (SIAU, 1984).

$$TU = \frac{Mu - Ms}{Ms} * 100 \quad (1)$$

em que: TU= teor de umidade (%); Mu= Massa úmida (g); Ms= Massa seca (g).

A água, que pode ser retirada pela secagem, ocorre na madeira de duas formas distintas (KOLLMANN e CÔTÉ, 1968), classificadas em:

- Água livre ou de capilaridade: corresponde a água localizada nos lumes celulares e espaços intercelulares, retida no interior da madeira por meio de forças capilares, encontra-se acima do ponto de saturação das fibras (PSF) (SKAAR, 1988).

- Água higroscópica ou de impregnação: corresponde a água localizada nos espaços sub-microscópicos da parede celular e retida por forças elétricas polares (KEEY et al. 2000). Entre 0% e 6% de umidade, encontra-se adsorvida nas cadeias de celulose e hemicelulose, por forças de valência primária monocelular (pontes de hidrogênio e Van der Wall) (WISE e JAHN, 1952; STAMM, 1964; HILDEBRAND, 1970; TOMASELLI, 1979). Na faixa de 6% até o PSF, encontra-se impregnando os espaços sub-microscópicos, adsorvida em camadas polimoleculares, ligadas por forças elétricas polares (TOMASELLI, 1979).

A água livre exerce influência sobre as propriedades térmicas e elétricas. Por sua vez, a água higroscópica influencia, principalmente, as propriedades mecânicas e algumas propriedades físicas (massa específica e coeficientes de retração e inchamento) (SIMPSON, 1991; DESCH e DINWOODIE, 1996; HAQUE, 2002).

De acordo com Skaar (1972), o PSF se refere ao teor de umidade da madeira (25-35%) em que, teoricamente, apenas as paredes celulares estão saturadas de água (higroscópica), porém com seus lumes e espaços intercelulares ausentes de água (livre).

O PSF tem grande importância prática na secagem da madeira, já que em teores abaixo desse ponto manifestam-se as indesejáveis variações dimensionais, além dos defeitos decorrentes das contrações, como, rachaduras, encanoamentos e torcimentos (RASMUSSEN, 1961).

A madeira, por ser um material higroscópico, apresenta o fenômeno de sorção, isto é, pode ganhar (absorção) ou perder (dessorção) umidade. Quando exposta a determinadas condições de temperatura e umidade relativa, a madeira perde umidade (água) até entrar em equilíbrio com o ambiente. Esse teor de umidade que a madeira adquire quando em equilíbrio com o ambiente é denominado de umidade de equilíbrio (KOLLMANN e CÔTÉ, 1968).

No processo de secagem, fenômeno de dessorção, a primeira água a ser removida é a água livre presente nos lumes das células. Somente após a sua remoção é que se dá início a retirada da água de impregnação. As forças capilares que retêm a água livre são muito menores que as forças elétricas que mantêm a água de impregnação na parede celular (SKAAR, 1972). A retirada da água livre - do estado saturado até o PSF - quando conduzida corretamente, provoca apenas uma diminuição na massa da madeira (KOLLMANN, 1959).

O movimento de retirada da água livre do interior da madeira até a superfície segue as leis de capilaridade de Poiseuille (SIAU, 1971). 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 lumes das células é progressivamente removida, 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 PSF. O movimento da 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).

O movimento de retirada da água de impregnação, abaixo do PSF, se dá através de mecanismos de difusão (SIAU, 1984). A água de impregnação desloca-se na parede celular por meio de gradientes de umidade, nos lumes das células por gradientes de pressão parcial de vapor e, novamente, na parede celular mais seca, através de gradientes de umidade, até alcança a superfície da madeira. (HART e DARWIN, 1971; CECH e PFAFF, 1977). Assim, como na retirada da água livre, a movimentação da água higroscópica também gera redução da massa da madeira. Além disso, produz a aproximação das micelas e fibrilas da parede celular, que se manifesta na contração da madeira (DURLO, 1992).

### 2.2.2 Fatores que influenciam na secagem

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

### 2.2.2.1 Fatores inerentes à madeira

#### a) Estrutura anatômica

A movimentação da água dentro da madeira é influenciada pelas suas diferentes direções anatômicas. O movimento da água na direção longitudinal é superior em relação às direções radial e transversal. No limite higroscópico essa superioridade pode ser na escala de 5 a 8 vezes, contudo, abaixo do PSF atinge valores entre 10 a 15 vezes maior (RASMUSSEN, 1961; KOLLMANN e CÔTÉ, 1968). Por sua vez, o fluxo de umidade na direção radial é entre 20 a 50% superior em relação à direção tangencial (KOLLMANN e CÔTÉ, 1968).

#### b) Teor de umidade

A relação entre o tempo de secagem e a diferença do teor de umidade inicial e o teor de umidade final requerido é proporcional, ou seja, quanto maior a diferença de teor de umidade no início e fim do processo maior será o tempo de secagem em que a madeira será submetida (HART, 1966). O mesmo autor ainda constatou que, para a secagem de duas peças com teores de umidade inicial diferentes, o tempo de secagem é distinto até o PSF. A partir deste ponto às peças necessitam do mesmo tempo adicional para completarem a secagem até o teor de umidade final requerido.

#### c) Massa específica

O tempo de secagem é proporcional à massa específica da madeira. Dessa forma, madeiras de baixa massa específica, e com isso, apresentando maior quantidade de espaços nas cavidades celulares, secam mais rápido em comparação com madeiras de alta massa específica que tem menor quantidade de espaços (RASMUSSEN, 1961). De acordo com Hart (1966), o tempo de secagem da umidade superficial é diretamente proporcional a massa específica, e na difusão da umidade do interior da madeira até sua superfície, é diretamente proporcional ao quadrado da massa específica.

A maior massa específica da madeira também apresenta uma maior quantidade de água inicial, aumentando assim o tempo de secagem (DENIG et al., 2000).

#### d) Espessura

Segundo Mendes (1985), a secagem é um processo que ocorre direcionado de fora para dentro, conseqüentemente, o tempo de secagem será maior para um material espesso em relação a um material de menor espessura. Segundo Hart (1966) que considera o fluxo de massa, o tempo para secagem é diretamente proporcional à espessura. Já para a difusão da umidade do interior da madeira para a superfície, o tempo é diretamente proporcional ao quadrado da espessura.

#### 2.2.2.2 Fatores inerentes ao ambiente

##### a) Temperatura

Em função do aumento da temperatura de secagem, maior será a temperatura dentro da madeira. Conseqüentemente, mais rápido será o movimento de água em seu interior, e a secagem se processará de forma mais rápida e uniforme (DENIG et al. 2000).

Cech e Pfaff (1977) afirmam que a evaporação da água presente na madeira é facilitada com o aumento da temperatura do ar, uma vez que ocorre o aumento da energia cinética das moléculas de água.

O aumento da temperatura do ar dentro de um secador proporciona a redução da umidade relativa do ar, o que provoca uma maior capacidade de absorção de umidade por parte do ar aquecido (MENDES, 1985).

##### b) Umidade relativa

A umidade relativa é denominada pela razão entre a quantidade de vapor d'água presente no ar e a quantidade máxima de vapor d'água que o ar pode absorver, a uma mesma temperatura (HILDEBRAND, 1970; DENIG et al. 2000).

A relação entre umidade da madeira, temperatura e umidade relativa do ar tem grande importância no processo de secagem da madeira. Por meio dessa relação pode-se realizar o controle da secagem (HILDEBRAND, 1970; SIMPSON, 1991). O aumento da temperatura do ar associado à redução da umidade relativa do ar ocasiona uma redução no teor de umidade da madeira (SIMPSON, 1991).

### c) Circulação do ar

Segundo Santini (1981), o fluxo de ar incidente sobre a pilha de madeira apresenta duas funções: transferência do calor produzido pelo sistema de aquecimento para a superfície da madeira e transporte da massa de vapor d'água desta superfície para a atmosfera.

De acordo com Hildebrand (1970), o aumento da velocidade de circulação do ar influencia na redução do tempo de secagem. No entanto, essa influência é reduzida à medida que o teor de umidade da madeira decresce abaixo do PSF (CECH e PFAFF, 1977). Abaixo do PSF a relação gráfica entre as duas variáveis é próxima a uma linha horizontal (DENIG et al. 2000). Além da redução do tempo de secagem, a circulação do ar proporciona uma secagem mais uniforme da pilha (DENIG et al. 2000). Entretanto, velocidades muito elevadas no início do processo de secagem provocam uma rápida secagem na superfície da madeira, interferindo prejudicialmente, na forma de defeitos, a remoção de sua umidade.

### d) Potencial de secagem

Santini (1981) diz que o potencial de secagem se refere à relação entre o teor de umidade da madeira e a umidade de equilíbrio do ambiente, ou seja, influenciada pelas condições de temperatura e umidade relativa do ar utilizadas dentro do secador.

Quanto maior o potencial de secagem adotado, menor é o tempo de secagem da carga de madeira (HILDEBRAND, 1970).

## **2.3 Métodos usuais para secagem de madeiras refratárias**

No Brasil se tem conhecimento de aproximadamente 80 espécies de uso comercial no setor florestal, as quais apresentam diferentes comportamentos e qualidades durante a secagem. O conhecimento dos diferentes métodos de secagem é fundamental para a escolha correta do método, baseado na necessidade, nas condições de investimento e relacionados com o uso final, levando em consideração os custos envolvidos pelo processo (KLITZKE, 2005).

De modo geral, os métodos de secagem podem ser classificados, quanto ao seu emprego, de duas formas: para madeiras de fácil secagem e para madeiras refratárias à secagem, como no caso do eucalipto.

Entre os métodos recomendados para madeiras de difícil secagem podem-se citar a secagem ao ar livre, secagem convencional, secagem a vácuo e os métodos de baixa temperatura, em que podem ser utilizados pré-secadores, desumidificadores ou secadores solares.

### 2.3.1 Secagem ao ar livre

O principal objetivo da secagem ao ar livre é retirar o máximo possível de água da madeira, ficando em segundo plano a necessidade de se obter baixos teores de umidade (SANTINI, 1992).

A secagem ao ar livre consiste em gradear a madeira serrada em pátios, deixando-a exposta aos fatores ambientais 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 secagem ocorre depende, principalmente, da temperatura, umidade relativa do ar e velocidade dos ventos.

Devido aos 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 largura da pilha, espessura dos sarrafos, a ocupação horizontal das pilhas e o arranjo físico do pátio de secagem (GOMIDE, 1974; JANKOWSKY, 1992).

A principal vantagem da secagem ao ar livre é o baixo investimento inicial. Em contrapartida, o processo de secagem ao ar livre apresenta algumas restrições, evidenciando-se a necessidade de grandes estoques, uma vez que afeta o capital de giro da empresa, e o longo tempo de secagem. Uma outra limitação importante da secagem ao ar livre diz respeito à umidade final do material. Caso seja necessário a obtenção de madeira com umidade inferior a umidade de equilíbrio local, o processo se mostra inviável (ABIMCI, 2004).

De acordo com Silva et al. (1997), na secagem natural de tábuas, na maioria das espécies, ocorre perda da metade do teor de sua umidade entre 15 e 30 dias. O restante é eliminado num tempo de 3 a 5 vezes maior, permanecendo as tábuas sob as mesmas condições de exposição. Isso é consequência do estado da umidade da madeira, visto que a água livre, que corresponde ao estado acima do ponto de saturação das fibras, é evaporada facilmente. O mesmo, entretanto, não se dá com a água higroscópica que se apresenta em combinação coloidal com a própria substância madeira sendo, portanto mais fortemente retida que a água livre (GOMIDE, 1974).

Quando da adoção da secagem ao ar livre, deve-se considerar, em princípio, a direção dos ventos predominantes, a localização do pátio, evitando-se barreiras aos ventos e outros acidentes geográficos que possam criar condições desfavoráveis, como lagos, rios ou áreas mal drenadas (JANKOWSKY, 1992). De acordo com Stumpp (1992), as pilhas devem ser dispostas de forma que o vento principal as atinja de lado e não de topo. Dessa forma, o ar consegue passar no meio da pilha e transportar as partículas do vapor d'água da madeira para o ambiente. O uso de cobertura protege a madeira da ação dos raios do sol e das precipitações, evitando rachaduras de topo e outros defeitos (SANTINI, 1992). As fundações das pilhas proporcionam apoio e boa ventilação ao material em secagem, e devem estar a aproximadamente 50 cm acima do nível do solo (ROSSO, 2006).

### 2.3.2 Secagem em estufa convencional

Segundo Bramhall e Wellwood (1976) e Martins (1988), a secagem convencional caracteriza-se por utilizar câmaras que dispõem de um sistema de aquecimento, um sistema de umidificação do ar, um conjunto de “dampers” que permitem a troca de ar entre o interior do secador e o meio externo, e um sistema de ventilação que promove a circulação do ar entre as peças de madeira em secagem.

Na secagem convencional as temperaturas utilizadas oscilam entre 45 a 90°C (SIMPSON, 1991). Devido a sua faixa de temperatura, é o processo de maior aplicação na indústria madeireira do Brasil. Praticamente 95% das empresas que empregam a secagem artificial de madeiras utilizam esse processo (ABIMCI, 2004).

Entretanto, para a secagem de espécies refratárias como o eucalipto, o uso de temperaturas elevadas, principalmente nos estágios iniciais, é prejudicial à qualidade da madeira (SEVERO, 2000).

A secagem convencional apresenta algumas vantagens em relação à secagem ao ar livre e métodos de baixa temperatura: é um método que apresenta controle total sobre as variáveis temperatura, umidade e velocidade do ar; alta taxa de secagem; possibilidade de tratamento final e peças com baixo teor de umidade. No entanto, o elevado custo de produção devido à amortização do investimento inicial em secadores e a demanda de energia, acaba encarecendo o processo para utilização em pequenos e médios empreendimentos. (SANTINI, 1981; SANTOS, 2002).



### 2.3.3 Secagem a vácuo

Segundo Simpson (1991), a secagem a vácuo apresenta como principal vantagem a redução da temperatura de ebulição da água sob vácuo parcial, favorecendo a movimentação da água capilar e, conseqüentemente, sua evaporação.

A redução da pressão no interior do secador permite taxas de secagem razoáveis a baixas temperaturas, o que pode ser vantajoso na secagem de madeiras espessas ou suscetíveis a defeitos como rachaduras superficiais, colapso e rachaduras internas durante a secagem em métodos de alta temperatura (SMITH et al., 1994).

Lempelius (1990) afirma que apesar das vantagens desse método, o elevado consumo de energia e os custos de investimento inicial, devido à secagem a vácuo apresentar uma tecnologia complexa, inviabiliza o seu uso, sendo esse método apenas difundido na Europa (VERMAAS, 1995). Além disso, a baixa capacidade de secagem das câmaras, limitadas entre 15-25 m<sup>3</sup>, gera elevados custos de investimento por m<sup>3</sup> de madeira seca em comparação a outros métodos (KANAGAWA, 1993).

### 2.3.4 Secagem em pré-secador

Segundo Vermaas (2000), os pré-secadores se constituem em estufas de baixo custo que provêem um controle mínimo da circulação do ar, temperatura e umidade relativa, suficientes para reduzir significativamente o tempo e os defeitos de secagem, por meio da diminuição do teor de umidade inicial e subsequente secagem em estufa. São utilizados para secagem de elevados volumes de madeira, com capacidade de até 1200 m<sup>3</sup>, e operam em uma faixa de temperatura de 27-40°C.

As condições internas, de acordo com Jankowsky (1995); Jankowsky (1996), são mantidas constantes, sendo que a umidade relativa do ar varia de 50% a 80% e a velocidade de circulação do ar é reduzida, mantendo-se, geralmente, entre 0,4 m s<sup>-1</sup> e 0,8 m s<sup>-1</sup>.

O uso de pré-secadores é bastante difundido nos Estados Unidos e Austrália, sendo utilizados, principalmente, para secagem de madeiras refratárias, como o eucalipto (BRENNAN et al., 1968; WENGERT, 1985; VERMAAS, 1998). No entanto, esse método de secagem não alcança teores de umidade abaixo do PSF, o que inviabiliza a utilização da madeira para diversos fins (DENIG et al., 2000).

### 2.3.5 Secagem em desumidificador

A secagem por desumidificação é realizada, em geral, entre 30 e 40°C e constitui-se de uma câmara, um sistema de aquecimento, um sistema de circulação de ar e um desumidificador (CECH e PFAFF, 1977).

O desumidificador é o equipamento mais importante utilizado no método, pois tem a função de retirar a umidade do ar circulante na câmara. Para que isso aconteça, o ar saturado passa num sistema de serpentinas refrigeradas por gás freon, onde é resfriado. Este resfriamento provoca a condensação da umidade do ar nas serpentinas e a água precipita numa bandeja instalada na base do equipamento, de onde é drenada para o exterior. O ar seco é, a seguir, aquecido e impulsionado pelos ventiladores para o interior da câmara. Ao atravessar as pilhas de madeira, o ar é reumidificado e retorna ao sistema de desumidificação, onde sofre reciclagem para manter as condições da câmara (SANTINI, 1992).

De acordo com Simpson (1991), o uso de desumidificadores é considerado ideal para secagem de madeiras refratárias, como o eucalipto, uma vez que a câmara utiliza baixas temperaturas e altas umidades relativas do ar. Além disso, a construção do secador é simples, necessitando de baixos investimentos. Entretanto, a dependência da energia elétrica para o seu funcionamento torna o custo da secagem bastante elevado.

## 2.4 Secagem em estufa solar

A utilização de estufa solar para secagem de madeiras é um processo intermediário entre a secagem ao ar livre, em que as variáveis influentes não são controladas, e a secagem em estufa convencional em que os fatores influentes são controlados e o processo é dotado de aquecimento artificial (VITAL e COLLOM, 1974). Além disso, a secagem em estufa solar é recomendada por diversos autores (SANTINI, 1981; HAQUE, 2002; BAUER, 2003) como alternativa de substituição dos métodos que apresentam elevados custos de investimento, manutenção e consumo energético. A estufa solar emprega a mesma fonte de energia da secagem ao ar livre – energia solar – acrescentando-lhe maior eficiência (SILVA, 2000). Em geral, na secagem em estufa solar se tem o controle apenas da temperatura (inferior a 50°C) e da velocidade do ar (1 a 2 m s<sup>-1</sup>), sendo a umidade relativa do ar, em torno de 40 a 85%, dificilmente controlada (TOMASELLI e KLITZKE, 2000).

Segundo Maldonado e Peck (1962); Troxell e Mueller (1968) os primeiros estudos a respeito do emprego de secadores solares para redução do conteúdo de umidade da madeira

surgiram entre o final da década de 50 e início da década de 60. Até aqui, mais de 30 modelos diferentes de secadores solares foram desenvolvidos e investigados sob circunstâncias ambientais diversas pelo mundo inteiro (CHMIELEWSKI et al., 1982; WENGERT e OLIVEIRA, 2008). Entretanto, a maioria deles foram instalados para finalidades experimentais e somente alguns são aplicados em escala industrial (SATTAR, 1993).

Para operação da estufa solar necessita-se, basicamente, de um sistema de coleta da energia para o aquecimento do ar e um de distribuição do ar aquecido (BANKS, 1969). O sistema de coleta é composto pelo material absorvente (coletor) e a cobertura transparente (VIEHBECK, 1999). A circulação do ar aquecido é realizada por ventiladores, os quais são dispostos, em geral, na parte superior, sendo o fluxo de ar dirigido na vertical (TROXELL e MUELLER, 1968; GUENEAU, 1970; READ et al., 1974; CUPPETT e CRAFT, 1975; BOIS, 1977; CHEN e ROSEN, 1979; CHEN et al., 1982), ou ainda, podem ser colocados na parte inferior, sendo o fluxo de ar dirigido no sentido horizontal (GOUGH, 1977; LUMLEY e CHOONG, 1979; SANTINI, 1981).

Na literatura é encontrada uma grande variedade de nomenclaturas para os secadores solares, entre os quais se podem citar: “dryers with separate collector“, “greenhouse type dryers”, “semi-greenhouse type dryers”, “high temperature dryers with additional solar heating”, “solar drying tunnels”. No entanto, os secadores solares podem dividir-se em dois tipos básicos: modelos com coletores solares incluídos na estrutura e modelos em que o coletor se encontra no lado externo à câmara de secagem (OLIVEIRA et al., 1982).

#### 2.4.1 Secador com coletor solar externo

Nesse tipo de câmara o coletor solar fica separado da estrutura da estufa, a conexão entre as partes se dá por meio de dutos, os quais transferem o ar aquecido até o interior da câmara, retornando depois ao coletor, por meio de circulação forçada. A renovação do ar pode ser realizada manualmente ou automaticamente. (READ et al., 1974; CHEN e ROSEN, 1979; STEINMANN et al., 1980a; CHEN et al., 1982; ROBBINS, 1983; SATTAR, 1993). Na Figura 1 verificam-se exemplos de secadores solares com coletores externos.

O tamanho do coletor solar externo pode variar independente do tamanho da câmara de secagem. Isso facilita a adaptação da área do coletor à capacidade de madeira desejada, à temperatura e à taxa de secagem (TSCHERNITZ e SIMPSON, 1979).

A estrutura do secador é bem isolada, podendo ser construída de concreto, alvenaria (LUMLEY e CHOONG, 1979; MORAES-DUZAT et al., 2000), alumínio (READ et al.,

1974; McCORMICK, 1980) ou chapa compensada (TSCHERNITZ e SIMPSON, 1979). Por meio de fontes de armazenamento de calor, como por exemplo, tanque de água aquecida, a secagem é contínua durante o período noturno (SHARMA, 1975).

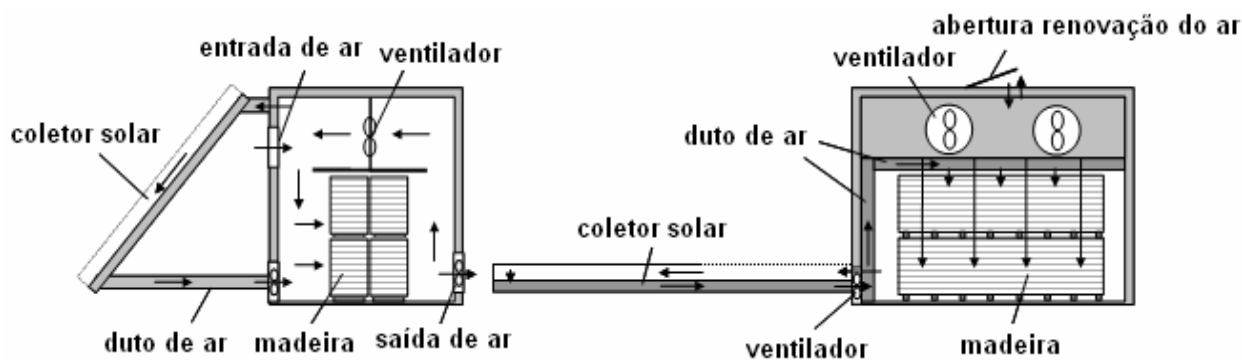


Figura 1 — Exemplos de secadores solares com coletores externos (adaptado de BAUER, 2003).

A utilização de coletor solar externo ao secador, por vezes, pode inviabilizar a utilização da secagem solar, devido à sofisticação dos equipamentos, o que gera aumento nos custos envolvidos. Visto que a secagem solar tem por finalidade ser um método simples, barato e eficiente (SANTINI, 1981). Além disso, esses modelos de secadores apresentam, em grande parte, controle automatizado de ventiladores, temperatura, umidade relativa e “dampers” (TSCHERNITZ e SIMPSON, 1985).

Em sua maioria, os secadores solares com coletores externos foram instalados em países do Hemisfério Norte, com condições de clima moderado, sendo pouco frequente seu uso em países tropicais. A principal finalidade desse modelo é secar madeiras refratárias. Entretanto, seu nível de aplicação está, em geral, restrito a fins experimentais. Alguns modelos, no entanto, apresentam capacidade de secagem de até 20 m<sup>3</sup>, sendo estes patenteados e comercializados (TSCHERNITZ e SIMPSON, 1985; SATTAR, 1993; BAUER, 2003).

#### 2.4.2 Secador com coletor solar interno

Os secadores dotados de coletores internos são denominados na literatura, em geral, de câmaras do tipo “greenhouse” (HAQUE, 2002). Esse modelo de secador é o mais comumente

utilizado, e tem como características principais o baixo custo e a facilidade de construção. Além disso, apresenta capacidade interna entre 0,5 a 200 m<sup>3</sup> (PECK, 1962; CHUDNOFF et al., 1966; PLUMPTRE, 1967).

O secador do tipo “greenhouse” consiste de uma estrutura, em geral de madeira ou chapa compensada tratada, com cobertura e paredes revestidas de material transparente ou translúcido, de forma a permitir a incidência da energia solar irradiada (BOND, 2006). Devido à importância da cobertura e paredes na incidência da energia solar irradiada, e consequente desempenho do secador, diversos materiais de revestimento vem sendo estudados, entre os quais pode-se citar: vidro (CHUDNOFF et al., 1966; BOIS, 1977; GOUGH, 1977; KUMAR, 1981), fibra de vidro reforçada com poliéster (Troxell e Mueller, 1968; Gueneau, 1970) e diferentes tipos de plásticos como policarbonato, polietileno, poliéster, polivinil fluoreto e polivinil cloreto (PECK, 1962; PLUMPTRE, 1967; SUDAM/IPT, 1981; SANTINI, 1981). Esses materiais podem ser utilizados em duas e até três camadas, ou então, em combinação entre eles, de forma a minimizar as perdas de calor e otimizar o desempenho do secador (Wengert, 1971; Sharma et al., 1974; Gough, 1981).

Segundo Viehbeck (1999) a escolha do material de cobertura deve ser feita levando em consideração, principalmente, os custos, durabilidade e eficiência. Silva (2000) afirma que a fibra de vidro é o material que reúne o maior número de características desejáveis para a cobertura. Na Tabela 1 é apresentada uma relação dessas propriedades com alguns tipos de materiais de cobertura.

Tabela 1 – Materiais de cobertura e suas características (adaptado de Viehbeck, 1999).

<b>Material</b>	<b>Permeabilidade</b>	<b>Estabilidade do calor</b>	<b>Durabilidade</b>	<b>Custo</b>
Vidro branco	0,905	alta	alta	alto
Vidro “float”	0,85	alta	alta	alto
Vidro “perspex”	0,89-0,9	média	alta	relativ. alto
Policarbonato	0,88-0,91	alta	baixa	alto
Polietileno	0,91-0,93	baixa	baixa	médio
Polivinil cloreto	0,85-0,87	baixa	baixa	médio

Com finalidade de maximizar o aumento da temperatura interna do secador, materiais como alumínio, aço e cobre são os ideais para serem utilizados como coletor solar interno, devido as suas boas qualidades de absorção da radiação de ondas curtas e evitar a reflexão

(VIEHBECK, 1999). Entretanto, Santini (1981) verificou bons resultados utilizando chapa de madeira como coletor. Esses materiais podem apresentar diversas formas: ondulados, planos ou com ranhuras (WENGERT, 1971)

Adicionalmente, para otimizar a capacidade de absorção, os coletores internos devem ser pintados com tinta preta, em razão de que pinturas enegrecidas apresentam melhores qualidades para absorver a energia de ondas curtas e transformá-las em calor da radiação solar (MALDONADO e PECK, 1962; PECK, 1962; CHUDNOFF et al., 1966).

Com relação à inclinação do teto, Viehbeck (1999) afirma que o ângulo deve ser igual à latitude do local em que está instalado o secador, de forma que a recepção da radiação solar seja ortogonal, propiciando um eficiente aproveitamento dos raios solares. Wengert e Oliveira (2008) confirmam essa citação. Segundo os autores, como em geral os coletores não são móveis ou ajustáveis, para o melhor desempenho ao longo de um ano, o ângulo deve ser igual à latitude. Quando o secador solar for utilizado somente em meses de inverno, o ângulo de inclinação deve ser acrescido em 10° em relação à latitude, enquanto que ao ser utilizado em meses de verão o ângulo deve ser reduzido em 10°.

As superfícies internas do secador que não estão expostas à incidência de luz solar, como o assoalho e a parede contendo a porta de entrada e saída de madeira, são pintadas de preto, possibilitando uma maior absorção da energia solar transmitida (PECK, 1962; CASIN et al., 1969; BOIS, 1977; GOUGH, 1977). Essas superfícies devem receber um bom isolamento para evitar as perdas de calor (WENGERT, 1971). Em geral, recomenda-se a utilização de lã de rocha, lã de vidro ou isopor (SANTINI, 1981).

Para o armazenamento do calor produzido, destinado a possibilitar o funcionamento eficiente da câmara em períodos desfavoráveis, foram estudadas algumas alternativas, como uso de basalto (READ et al. 1974), pilhas de rochas (YANG, 1980) e pedras enegrecidas (BAUER, 2003). Além desses, Viehbeck (1999) cita a possibilidade de utilização de lenha para produção de calor em períodos que a luz solar é deficiente.

De acordo com Noves e Seco (1990), as condições de secagem dentro das câmaras do tipo “greenhouse” são influenciadas, significativamente, pelas condições ambientais. Essa dependência pode ser reduzida por meio do uso de sistemas auxiliares de aquecimento e de umidificação automatizados (CHUDNOFF et al., 1966; BENITEZ et al., 1997). Entretanto, a maioria dos secadores solares “greenhouse” não apresenta controle automatizado (STEINMANN et al., 1980a; STEINMANN e VERMAAS, 1990).

É importante ressaltar que esses aprimoramentos elevam os custos de investimento e manutenção do secador, tornando-o por vezes antieconômico (BAUER, 2003).

A orientação ideal dos secadores solares é no sentido norte-sul, de modo que os raios solares sejam incididos mais diretamente, propiciando um melhor aproveitamento dos mesmos (VITAL e COLLOM, 1974; GOUGH, 1977). Na Figura 2, observam-se exemplos de secadores solares com coletores internos.

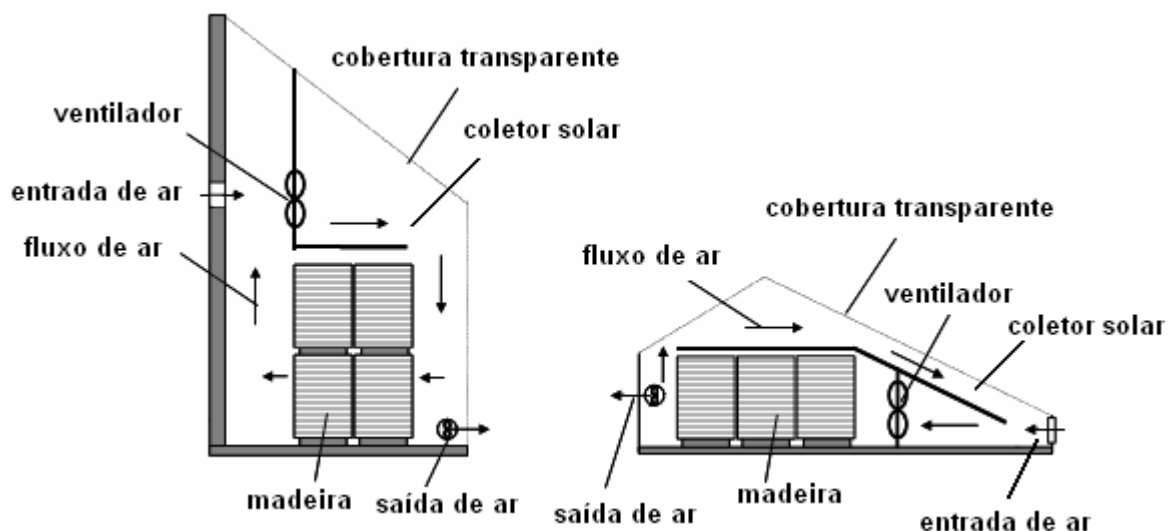


Figura 2 — Exemplos de secadores solares com coletores internos (adaptado de BAUER, 2003).

## 2.5 Defeitos de secagem

De acordo com Santini (1992), a remoção da água da madeira é, invariavelmente, acompanhada pelo desenvolvimento de tensões resultantes da diferença de umidade entre regiões contíguas e da anisotropia de contração. Esse fenômeno se manifesta sob quaisquer condições de secagem. Dessa maneira, para obtenção de um maior valor agregado da madeira serrada, é de grande importância a adoção de procedimentos adequados de secagem, como baixas temperaturas iniciais, para minimização da incidência de defeitos.

Além disso, o conhecimento do comportamento da madeira, quando exposta as condições de secagem, também traz benefícios para o controle dos defeitos (MARQUES, 2008).

Martins (1988) afirma que os defeitos resultantes da secagem, além de causarem desvalorização do preço da madeira serrada, geram desinteresse quanto à utilização de

determinadas espécies refratárias. Esse fato contribui em parte para exploração seleta e de um pequeno número de espécies.

Vermaas (1995) cita que os principais defeitos da secagem da madeira de eucalipto são as rachaduras e o colapso. Além desses, é importante o controle de outros defeitos, como empenamentos e o endurecimento superficial.

### 2.5.1 Rachaduras

De acordo com Santini (1992) as rachaduras são separações dos elementos constituintes da madeira no sentido longitudinal da grã.

As rachaduras aparecem como consequência da diferença de contração nas direções radial e tangencial da madeira e de diferenças de umidade entre regiões contíguas de uma peça, durante o processo de secagem. Essas diferenças levam ao aparecimento de tensões que, tornando-se superiores à resistência dos tecidos lenhosos, provocam a ruptura da madeira (JANKOWSKY, 1990).

Durante o processo de secagem podem ocorrer três tipos de rachaduras: superficiais, de topo e internas.

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

### 2.5.2 Empenamentos

Conforme Galvão e Jankowsky (1985), os empenamentos são caracterizados por serem distorções que ocorrem na madeira em relação aos planos originais de sua superfície. De maneira geral, originam-se das diferenças inerentes às contrações radial, tangencial e axial. Irregularidades na grã, presença de lenho de reação e lenho juvenil, também influem no aparecimento de peças empenadas ao final da secagem (SANTINI, 1992).

Pratt (1974) classifica o defeito de empenamento em cinco tipos: encanoamento, encurvamento, arqueamento, torcimento e forma de diamante. No entanto, quando avaliada a qualidade da secagem em tábuas são considerados apenas os quatro primeiros defeitos citados, uma vez que o empeno do tipo forma de diamante ocorre em peças de seção quadrada.



### 2.5.3 Colapso

O colapso caracteriza-se por ser uma forma de contração anormal e irregular, que se manifesta durante a retirada da água capilar, resultando na deformação interna das células (KOLLMANN e CÔTÉ, 1968; SANTINI, 1992).

De acordo com Jankowsky (1995), a principal causa do colapso é a tensão capilar, que se manifesta nas fases iniciais de secagem, quando a umidade da madeira está acima do PSF. Além desse, outros fatores influenciam na presença de peças colapsadas, como: pequeno diâmetro dos capilares e das pontoações, elevadas temperaturas no início da secagem, elevada massa específica da madeira e alta tensão superficial do líquido que é removido da madeira.

### 2.5.4 Endurecimento superficial

De acordo com Mcmillen (1955), o endurecimento superficial é uma condição de tensão que se manifesta na madeira seca, em que as fibras da superfície estão submetidas a esforços de compressão e as internas sob esforços de tração. Basicamente, o endurecimento superficial é causado por secagem muito rápida e desuniforme (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985).

A condição de endurecimento superficial da madeira permanece mesmo depois da mesma atingir um teor de umidade uniforme. Essa condição, durante a secagem, pode originar rachaduras internas (ANDRADE, 2000).

## 3 MATERIAL E MÉTODOS

### 3.1 Coleta e preparo do material

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Produtos Florestais (LPF), pertencente ao Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Para realização do estudo foram utilizadas madeiras de *Eucalyptus tereticornis*, *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora*, obtidas em povoamentos homogêneos na Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária - Centro de Pesquisa em Recursos Florestais (FEPAGRO FLORESTAS), localizado no Distrito de Boca do Monte no município de Santa Maria, RS.

Foram selecionadas, de modo aleatório, árvores adultas de bom fuste, com grã reta e diâmetro a altura do peito (DAP) de aproximadamente 35 cm. De cada espécie foram utilizadas doze árvores, das quais foram retiradas as duas primeiras toras, com 2,8 m de comprimento. Desse modo, foram utilizadas 24 toras de cada uma das espécies.

A madeira foi desdobrada na FEPAGRO FLORESTAS utilizando um engenho de serra, sendo adotado o sistema de cortes tangenciais para a retirada das tábuas. As tábuas apresentaram dimensões de 2,5 cm x 15 cm x 280 cm (espessura, largura e comprimento).

As madeiras de *Eucalyptus tereticornis*, *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora* foram submetidas aos processos de secagem em estufa solar e ao ar livre durante período de inverno, respectivamente, nos dias 18 de maio, 12 de julho e 04 de setembro de 2008.

Para cada método de secagem foi utilizada uma carga de madeira por espécie. Cada carga foi formada por 60 tábuas, totalizando 120 tábuas por espécie em estudo.

### 3.2 Secagem em estufa solar

Para realização da secagem em estufa solar desenvolveu-se um secador solar, modelo “greenhouse”, o qual foi instalado em um local bem drenado e livre de obstáculos no pátio do LPF-UFSM, com capacidade para 1 m<sup>3</sup> de madeira serrada. As dimensões do secador foram: 3,7 m de comprimento, 2 m de largura, 3,2 m de altura maior (parede Sul) e 1 m de altura menor (parede Norte). Essa diferença de altura entre as paredes se deve ao ângulo de inclinação da estufa de 30°, sendo este adotado em função da latitude, pois o município de Santa Maria, RS está localizado a latitude Sul 29°41’25”. Conforme Viehbeck (1999) a

inclinação da estufa num ângulo igual a latitude do local possibilita o uso do secador solar durante todo o ano, de modo que seja possível a incidência dos raios solares perpendicularmente ao teto transparente (Figura 3).



Figura 3 – Secador solar utilizado no estudo.

Esse secador solar foi construído basicamente com estruturas de madeira apoiadas em moirões de eucalipto tratados, servindo de fundação, com elevação de 30 cm do solo. Essa elevação teve como objetivo facilitar a capina da vegetação rasteira, bem como favorecer a circulação de ar, de modo a evitar a presença de umidade na parte externa do assoalho. Para confecção do assoalho foram utilizadas tábuas de pinus com 2,5 cm de espessura. A camada primária foi coberta com chapas de isopor de 20 mm e, por fim, foi colocada uma terceira camada, composta por chapas de compensado de 10 mm. Este procedimento construtivo foi empregado visando à obtenção de um meio de isolamento térmico satisfatório, evitando o mínimo possível às perdas de calor.

A parede Sul, como não era exposta à incidência de luz solar, foi fabricada de modo semelhante ao assoalho, sendo utilizadas tábuas de pinus de 2,5 cm de espessura e chapas de isopor de 40 mm, nas duas primeiras camadas, e cobertura de superfície composta por chapas

de fibra dura (HDF) de 2,5 mm. Nessa parede foram colocadas duas portas, com dimensões de 115 x 90 cm (altura x largura), para carga e descarga do material em experimento (Figura 4).

As partes construídas de material sólido, parede Sul e assoalho, tiveram suas superfícies internas pintadas com tinta óleo preta, de modo a atuarem como absorvedores de energia solar.



Figura 4 – Parede Sul e parte interna da estufa solar.

No restante da estufa solar, paredes Norte, Leste, Oeste e o teto, utilizou-se dupla camada de plástico polivinil cloreto (PVC) espaçado por separadores de seção transversal de 2 cm<sup>2</sup>, com objetivo de otimizar o isolamento térmico da câmara. Apesar de estudos, como o desenvolvido por Viehbeck (1999) mostrarem boas características da utilização do vidro quanto à eficiência e durabilidade, neste experimento optou-se pelo uso do PVC, que é mais barato, devido à incidência frequente de chuvas de granizo na região. Exceto o teto, o

revestimento das paredes foi efetuado por meio de pequenos módulos, de maneira a facilitar a retirada e substituição em eventuais danos causados à dupla camada de PVC, conforme utilizado pelos autores e Troxell (1963), Vital (1976) e Santini (1981).

Na parede Norte foram instaladas duas janelas, com dimensões de 25 cm x 25 cm, as quais tem, por finalidade, permitir a renovação do ar no interior da estufa, uma delas para saída e outra para entrada de ar. Estas janelas foram dispostas nas laterais, centralizadas a altura da parede Norte, de modo que a fixação do ventilador na parte interna da estufa ficasse entre a entrada e saída de ar (Figura 5). Durante o processo de secagem, as janelas eram abertas, cerca de 2 cm, às 9 horas e fechadas às 17 horas, de modo a otimizar a secagem durante o período noturno. Em dias chuvosos ou de baixa insolação, as janelas eram mantidas fechadas.



Figura 5 – Parede Norte e as janelas para renovação do ar da estufa solar.

Para a circulação do ar utilizou-se um ventilador com 30 cm de diâmetro, movido por um motor elétrico trifásico de 0,5 HP, fixado sobre o assoalho da estufa. A cada quatro dias, ocorria a inversão do fluxo de ar (direita-esquerda), sendo a sua velocidade média, monitorada

em diversos pontos da estufa, por meio de anemômetro digital do tipo fio quente. O controle do funcionamento do ventilador foi realizado por meio de termostato digital. Quando a temperatura interna era superior a 22°C o ventilador era acionado. Segundo Wengert (1980), o ideal no inverno, período de realização desse experimento, é não realizar o acionamento dos ventiladores em temperaturas inferiores a 18°C. Desse modo, evitou-se o desperdício em gastos de energia elétrica quando as condições internas da câmara não eram propícias à secagem.

A disposição das pilhas dentro da estufa foi da seguinte forma: uma pilha, constituída de cinco colunas com 12 tábuas cada, inclusas as tábuas que deram origem as amostras de controle do processo. Além dessas, foram colocadas de quatro a cinco camadas de tábuas, servindo como peso para restrição mecânica da pilha; para a separação das tábuas foram utilizados cinco sarrafos de madeira seca de eucalipto por fileira de tábuas, espaçados entre eles a uma distância de 52 cm, livre de defeitos e com dimensões de 2,5 cm x 2,5 cm x 100 cm (espessura, largura e comprimento).

Ao redor da área de empilhamento foram edificadas duas paredes vazadas de tijolos, com a finalidade de direcionamento do fluxo de ar e armazenamento de calor, propiciando o aproveitamento do calor produzido durante o dia para a secagem nos períodos noturnos e de baixa insolação (Figura 6). Sobre as paredes de tijolos foi apoiada uma chapa compensada de 10 mm, pintada com tinta óleo preta, servindo de absorvedor de luz solar, juntamente com as superfícies internas (assoalho e parede Sul). Além disso, a chapa compensada teve como função secundária o direcionamento do fluxo de ar na área de empilhamento. Para auxiliar o direcionamento do fluxo de ar, ainda foram instalados, acima da chapa compensada, uma divisória de plástico PVC, que cobriu toda a extensão em comprimento da estufa e utilizados quatro defletores curvados de HDF com 2,5 mm de espessura nos quatro cantos da estufa. Esses defletores também foram pintados de preto, como as demais estruturas internas.

Alguns pontos críticos de perda de calor, como assoalho, parede Sul e a cobertura plástica de PVC tiveram grande atenção durante a construção, seguindo recomendações propostas por Wengert (1971), de modo a otimizar a eficiência do secador.

O Apêndice 1 apresenta em maiores detalhes os aspectos construtivos da parte interna da estufa solar.

Para controle das variáveis ambientais internas como temperatura (°C) e umidade relativa (%) foi utilizado um psicrômetro. Essas variáveis foram obtidas, periodicamente, de hora em hora, a partir do início da secagem às 8 horas até o término às 22 horas. A faixa horária de controle foi estipulada em razão da pequena variação das condições ambientais

dentro do secador nas horas seguintes ao término do monitoramento. A umidade de equilíbrio (%) foi monitorada na mesma faixa horária, e obtida por meio da Equação 2 (SIMPSON, 1971).

$$UE = \left( \frac{K_1 K_2 h}{1 + K_1 K_2 h} + \frac{K_2 h}{1 - K_2 h} \right) * \frac{1800}{W} \quad (2)$$

$$K_1 = 4,737 + 0,04773(T) - 0,00050123(T)^2$$

$$K_2 = 0,70594 + 0,001698(T) - 0,000005553(T)^2$$

$$W = 223,374 + 0,69309(T) + 0,0185(T)^2$$

$$h = \frac{UR}{100}$$

em que: UE= umidade de equilíbrio (%); UR= umidade relativa (%); T= temperatura (°C)

Com relação as variáveis externas, insolação (h) e radiação solar (kJm<sup>2</sup>), essas foram obtidas na Estação Climatológica do Departamento de Fitotecnia da UFSM.



Figura 6 – Parede Oeste e a parede vazada de tijolo.

### 3.3 Secagem ao ar livre

A secagem ao ar livre foi realizada no pátio do LPF-UFSM, próximo ao local em que foi instalada a estufa solar, de modo a evitar variações climáticas nas duas metodologias de secagem. O local escolhido é alto e plano, com boa drenagem e sem obstáculos à ventilação.

As tábuas foram empilhadas sobre estruturas de madeira apoiadas a uma fundação de moirões de eucalipto tratados, os quais foram elevados a 50 cm do solo. As tábuas foram distribuídas em quatro colunas de 15 tábuas cada, inclusas as tábuas que deram origem as amostras de controle do processo. Acrescidas de quatro a cinco fileiras de tábuas com função de restrição mecânica. Para separação das tábuas foram utilizados separadores de madeira seca e livre de defeitos com seção transversal de 2,5 cm x 2,5 cm e com comprimento aproximado à largura da pilha. Assim como na secagem em estufa solar, os separadores foram dispostos a uma distância de 52 cm uns dos outros, de forma a minimizar a incidência de defeitos durante a secagem. No total, foram utilizados cinco separadores por fileira de tábuas (Figura 7).

A orientação das pilhas foi realizada no sentido norte-sul, de acordo com a direção predominante dos ventos.

Para cobertura das pilhas utilizaram-se duas telhas de fibrocimento com 6 mm de espessura, de modo a minimizar a incidência de raios solares e precipitações. Além disso, foram utilizadas três placas de concreto, com carga de 45 kg m<sup>-2</sup> cada, para causar restrição mecânica as pilhas durante a secagem.

Periodicamente, foi realizada a capina na vegetação rasteira incidente na pilha de secagem, de modo a facilitar a circulação do ar, evitando, assim, a incidência de agentes xilófagos nas tábuas inferiores à pilha.

Para o monitoramento das condições ambientais, durante a secagem ao ar livre, foram obtidas na Estação Climatológica do Departamento de Fitotecnia da UFSM as seguintes variáveis climáticas: velocidade do vento (m s<sup>-1</sup>); temperaturas de máxima e mínima (°C); umidade relativa do ar (%); umidade de equilíbrio (%) e precipitação (mm);





Figura 7 – Carga de madeira em secagem ao ar livre.

### 3.4 Taxa de secagem

A taxa de secagem foi determinada para os dois métodos de secagem em que foram submetidas às cargas de madeira, por meio da Equação 3 (SEVERO, 2000):

$$T_s = \frac{TU_i - TU_f}{T} \quad (3)$$

em que:  $T_s$ = taxa de secagem (%/dia);  $TU_i$ = teor de umidade inicial (%),  $TU_f$ = teor de umidade final (%),  $T$ = tempo de secagem decorrido (dias).

A partir desses dados foram elaboradas as curvas das taxas de secagem como meio comparativo entre a secagem em estufa solar e ao ar livre.

### 3.5 Monitoramento do teor de umidade

Para monitorar o teor de umidade da madeira durante a secagem foram utilizadas cinco amostras de controle para cada carga, com dimensões de 2,5 cm x 15 cm x 40 cm (espessura, largura e comprimento). Essas amostras foram confeccionadas a partir de tábuas utilizadas no empilhamento, sendo seccionadas transversalmente (Figura 8).

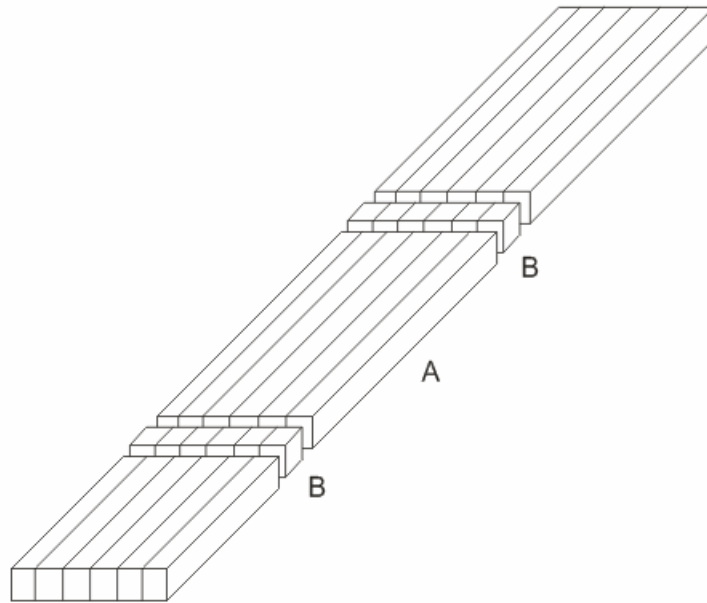


Figura 8 – Confecção da amostra de controle (A) e seções para determinação do teor de umidade inicial (B).

À medida que as amostras de controle foram retiradas das suas tábuas de origem, as amostras foram imediatamente pesadas em balança de precisão de 0,01 g para a obtenção da massa inicial. Após a confecção, marcação e pesagem os topos das amostras de controle foram lixados e aplicou-se tinta plástica (selante), visando minimizar a perda excessiva de água durante a secagem.

Antes do início do processo de secagem, determinou-se o teor de umidade inicial de cada amostra de controle (Equação 1, página 18), mediante a média aritmética das duas seções, de 2,5 x 2,5 cm, localizadas nas suas extremidades (Figura 8).

As amostras de controle foram dispostas em diferentes locais de fácil remoção e reposição, de modo a permitir uma medição real e representativa do teor de umidade das mesmas. Na secagem em estufa solar as amostras foram dispostas na parte de trás da pilha, localizada na parede Sul, de forma a facilitar a rápida retirada das amostras e, conseqüentemente, reduzindo o tempo de abertura da estufa. O teor de umidade de cada carga foi definido por meio da Equação 4:

$$TUa = \frac{Ma(TUi + 100)}{Mi} - 100 \quad (4)$$

em que: Tua= Teor de umidade atual (%); Ma= Massa atual da amostra (g); TUi= Teor de umidade inicial (%); Mi= Massa úmida da amostra (g).

O monitoramento do teor de umidade foi realizado por meio da pesagem das amostras de controle, diariamente, utilizando-se uma balança eletrônica de precisão de 0,01 g, até a obtenção do teor de umidade de equilíbrio da carga.

Todos esses procedimentos descritos acima foram efetuados nos dois métodos de secagem em estudo.

Com base nos dados de redução do conteúdo de umidade da madeira foram estabelecidas curvas para comparação do tempo de secagem na estufa solar e ao ar livre.

### 3.6 Determinação das contrações radiais e tangenciais

A avaliação da contração da madeira durante a secagem foi realizada medindo-se a cada três dias a largura e a espessura das amostras de controle. Para a obtenção de dados precisos durante a operação, foram demarcados com lápis de anilina os pontos de medições em todas as amostras. Dessa forma, as verificações foram efetuadas sempre nas mesmas posições (Figura 9).

A medição das dimensões (espessura e largura) foi realizada por meio de um paquímetro digital, com precisão de 0,01 mm. Devido aos valores praticamente insignificantes, a contração longitudinal foi desconsiderada.

Por meio das Equações 5 e 6 foram determinadas as contrações em espessura (radial) e em largura (tangencial):

$$\beta_r = \frac{Ev - Eat}{Ev} * 100 \quad (5)$$

em que:  $\beta_r$ = contração radial (%),  $Ev$ = dimensão em espessura verde (mm),  $Eat$ = dimensão em espessura atual (mm).

$$\beta_t = \frac{Lv - Lat}{Lv} * 100 \quad (6)$$

em que:  $\beta_t$ = contração tangencial (%),  $Lv$ = dimensão em largura verde (mm),  $Lat$ = dimensão em largura atual (mm).



Figura 9 – Demarcação dos pontos de medição das contrações tangenciais e radiais.

### 3.7 Determinação da massa específica

Ao final de cada processo de secagem foram escolhidas, aleatoriamente, dez tábuas, das quais foram retiradas amostras de seção transversal 2,5 x 2,5 cm. Posteriormente, as amostras foram colocadas em câmara climatizada (20°C de temperatura e 65% de umidade relativa) até atingirem o teor de umidade de equilíbrio a 12%.

Para a definição da massa específica aparente a 12% de umidade, as amostras foram pesadas em balança analítica de precisão 0,01g e suas dimensões definidas com o uso de um paquímetro digital de precisão 0,01 mm (Equação 7).

$$ME = \frac{M}{V} \quad (7)$$

em que: MEa= massa específica (g cm<sup>-3</sup>); M= massa a 12% de umidade (g); V= volume a 12% de umidade.

### 3.8 Avaliação dos defeitos

Os defeitos foram avaliados em duas fases distintas, logo após o desdobro e ao término do processo de secagem. Para tanto, avaliaram-se 55 tábuas de cada carga submetida à secagem.

Após a avaliação preliminar, compararam-se os valores obtidos com valores apresentados na Norma para Classificação de Folhosas do IBDF - Classificação pela Pior Face (BRASIL, 1983), foram considerados os defeitos acima dos admitidos para a 4ª classe.

Avaliaram-se os seguintes defeitos: rachaduras, empenamentos, colapso e as tensões de secagem.

### 3.8.1 Rachaduras

Foram avaliados dois tipos de rachaduras: de topo e de superfície.

#### a) Rachaduras de topo

As rachaduras de topo foram obtidas através do somatório dos seus comprimentos individuais, em cada lado, por meio da Equação 8:

$$IRT = \frac{(l_2 + l_3 + \dots + l_x)}{L_1} * 100 \quad (8)$$

em que: IRT= índice de rachaduras de topo (%);  $l_2 + l_3 + \dots + l_x$ = comprimento individual das rachaduras (mm);  $L_1$ = comprimento total da peça (mm).

As rachaduras foram medidas com auxílio de um paquímetro digital, com precisão de 0,01 mm. Para facilitar as avaliações após a secagem, as rachaduras foram demarcadas com lápis de anilina durante as avaliações após o desdobro.

Na Figura 10, pode-se verificar o procedimento adotado para quantificação do IRT.

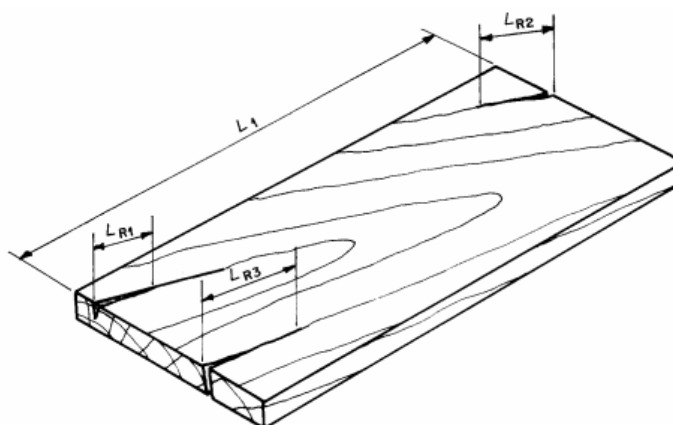


Figura 10 – Procedimento adotado para medição das rachaduras de topo em tábuas.

As peças com IRT acima ou igual a 20% foram consideradas defeituosas, sem restrição quanto ao número de peças.

#### b) Rachaduras de superfície

As rachaduras de superfície presentes nas tábuas foram avaliadas visualmente nas duas fases (após desdobro e após secagem), sendo quantificado o número de peças em que o defeito foi verificado e os resultados apresentados na forma de porcentagem do número de peças rachadas.

### 3.8.2 Empenamentos

Foram avaliados três tipos de empenamentos: arqueamento, encurvamento e encanoamento. O arqueamento e encurvamento foram determinados a partir da flecha central gerada entre a face curva da madeira e uma linha de nylon fixada nos topos da peça empenada.

#### a) Arqueamento

O defeito de arqueamento foi determinado a partir da Equação 9:

$$A = \frac{f}{L} \quad (9)$$

em que: A= arqueamento ( $\text{mm m}^{-1}$ ); f= flecha de arqueamento da peça (mm); L= comprimento da peça (m).

Na Figura 11, verifica-se o procedimento adotado para quantificação do arqueamento nas tábuas.

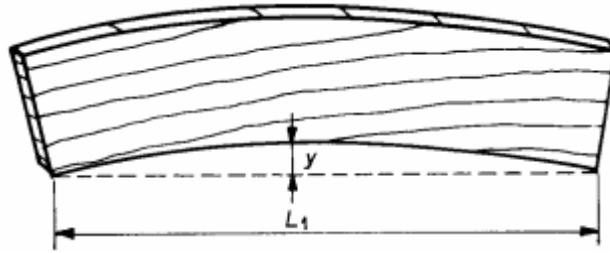


Figura 11 – Procedimento adotado para medição do arqueamento de tábuas.

As peças com arqueamento acima ou igual a  $5 \text{ mm m}^{-1}$  foram consideradas defeituosas, sem restrição quanto ao número de peças.

#### b) Encurvamento

O defeito de encurvamento foi determinado a partir da Equação 10:

$$Ev = \frac{f}{L} \quad (10)$$

em que:  $Ev$ = encurvamento ( $\text{mm m}^{-1}$ );  $f$ = flecha de encurvamento (mm);  $L$ = comprimento da peça (m).

Na Figura 12, verifica-se o procedimento adotado para quantificação do encurvamento nas tábuas.

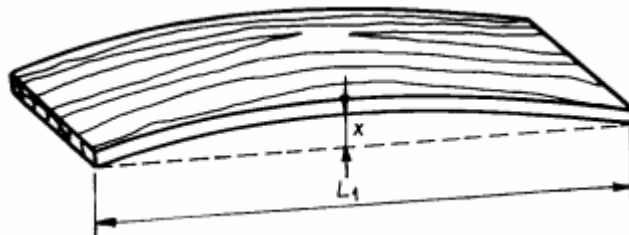


Figura 12 – Procedimento adotado para medição do encurvamento de tábuas.

Da mesma forma que o arqueamento, as peças com encurvamento acima ou igual a  $5 \text{ mm m}^{-1}$  foram consideradas defeituosas, sem restrição quanto ao número de peças.

### c) Encanoamento

A presença de encanoamento foi permitida desde que a redução na espessura da peça, obtida pela operação de aplainamento, fosse no máximo 4 mm inferior a espessura nominal (Equação 11).

$$Ea \geq (En - 4mm) \quad (11)$$

em que: Ea= espessura aplainada (mm); En= espessura nominal (mm).

Na Figura 13, pode-se verificar o procedimento adotado para avaliação do encanoamento.

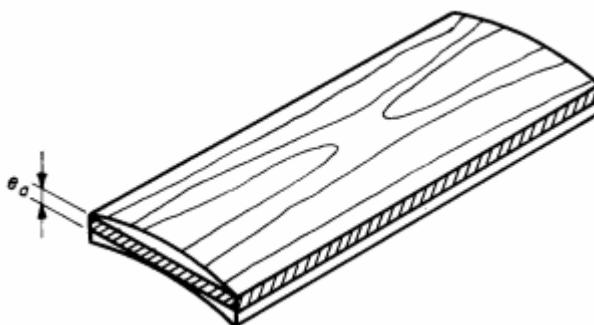


Figura 13 – Procedimento adotado para medição do encanoamento de tábuas.

### 3.8.3 Tensões de secagem

As análises das tensões residuais foram realizadas por meio do teste de garfo. Para confecção dos garfos, foram retiradas amostras de seção 2,5 x 2,5 cm de cada tábua, distantes 40 cm do topo e, posteriormente cortadas as partes centrais em serra-de-fita laboratorial. A avaliação das tensões foi realizada em dois estágios: a) avaliação prévia após a confecção do garfo; b) avaliação final após condicionamento dos garfos em câmara climatizada, por um período de 24 horas, para eliminação dos gradientes de umidade.

De acordo com os procedimentos descritos por Rasmussen (1961) e Pratt (1974), realizou-se a seguinte avaliação das tensões de secagem:



- dentes do garfo arqueados para fora a uma mesma distância ou ligeiramente superior à espessura, definiu-se que a tábua estava livre de endurecimento superficial.
- dentes do garfo que se projetaram para dentro, definiu-se que a tábua apresentava endurecimento superficial.

Na Figura 14, pode-se verificar a representação esquemática da retirada dos garfos das tábuas, bem como a análise das tensões residuais.

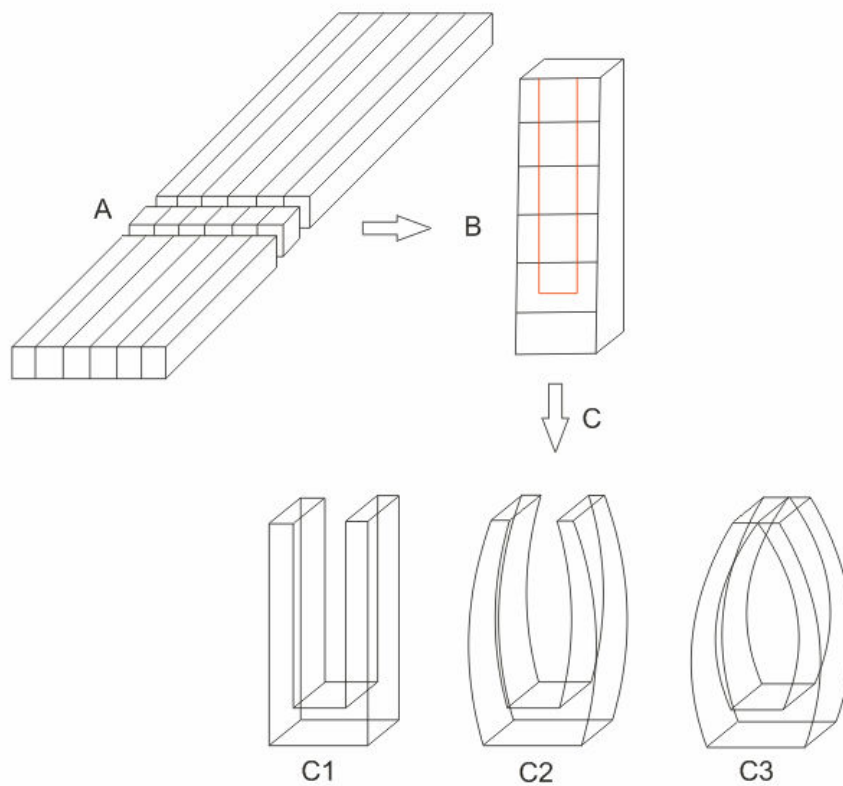


Figura 14 – Teste do garfo para detectar o nível das tensões de secagem (A= Retirada da amostra; B= Marcação da parte central da amostra para retirada do garfo; C= Avaliação das tensões de secagem; C1= Amostra livre de tensões; C2= Amostra com tensões suaves; C3= Amostra com tensões fortes).

#### 3.8.4 Colapso

A determinação da presença e intensidade do colapso foi realizada por meio da remoção de alguns milímetros da superfície da tábua com uma plaina desgrossadeira, levando-se em consideração os seguintes critérios:

- madeira livre de colapso: após a remoção de 1 a 1,5 mm da superfície das tábuas, não apresentaram ondulações na superfície;
- madeira com colapso leve: após a remoção de 2,5 mm da superfície das tábuas, não apresentaram ondulações na superfície;
- madeira com colapso médio: após a remoção de 3,5 mm da superfície das tábuas, não apresentaram ondulações na superfície;
- madeira com colapso forte: tábuas que apresentaram ondulações na superfície depois de removidos 3,5 mm.

### **3.9 Análise estatística**

A análise estatística correspondeu a análises de variância e análises de regressão. As medidas de adequação e seleção dos modelos de regressão foram realizadas mediante análises dos coeficientes de determinação ajustado ( $R^2_{aj.}$ ), de correlação ( $R$ ), teste F, erro padrão de estimativa ( $S_{yx}$ ) e análise visual dos gráficos de resíduos. Na análise de variância considerou-se um valor de  $p= 0,05$ , que corresponde ao nível de 95% de confiabilidade. Para tanto, foi utilizado o pacote estatístico Statgraphics Plus.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Curva e taxa de secagem

A madeira de *Eucalyptus tereticornis* submetida à secagem em estufa solar iniciou o processo com teor de umidade de 82,13% e, após 35 dias, foi finalizada com 15,24%. Já a secagem ao ar livre teve início com teor de umidade de 73,58% e, ao final de 104 dias, alcançou 20,30%.

O teor de umidade inicial da carga de madeira de *Corymbia citriodora* exposta à secagem em estufa solar foi de 62,05%, e finalizada após 35 dias com teor de umidade de 15,15%. Na secagem ao ar livre, iniciou-se o processo com teor de umidade de 60,02% e, ao final de 58 dias, o teor de umidade alcançou 20,71%.

Por sua vez, na secagem da madeira de *Eucalyptus saligna*, o início do processo em estufa solar ocorreu com um teor de umidade de 74,04%, e com 15,06% foi finalizada após 22 dias. Para a secagem ao ar livre o teor de umidade inicial da carga foi de 75,62%, sendo que após 33 dias finalizou-se com 20,75%.

A diferença entre os teores de umidade inicial se deve a grande variação existente no conteúdo de umidade da madeira de eucalipto em “estado verde”, podendo oscilar entre 60-100% (BAUER, 2003).

Os teores de umidade final das madeiras de *Eucalyptus tereticornis* e *Corymbia citriodora*, submetidas aos dois processos de secagem, foram estabelecidos em razão da sua redução mínima, uma vez que as condições ambientais mostraram-se desfavoráveis à secagem no período. Haque (2002) realizando secagem em estufa solar na Austrália, em período de inverno, também verificou dificuldade em obter uma redução significativa do teor de umidade, finalizando a secagem para algumas cargas em 19%.

De acordo com Santini (1984), na cidade de Santa Maria-RS, a madeira exposta à secagem ao ar livre, durante o período (inverno) em que foi realizado o estudo, dificilmente alcançaria menores teores de umidade, uma vez que a média do teor de umidade de equilíbrio é de 17,5%. No caso da secagem em estufa solar, Bond (2006) afirma que nos meses mais quente (verão) é possível secar madeira até um teor de umidade final de 8 a 10%.

A possibilidade de obtenção de um teor de umidade abaixo de 10%, na secagem em estufa solar, foi verificada para a madeira de *Eucalyptus saligna*. No entanto, de forma a possibilitar a comparação com as demais espécies, optou-se por finalizar a secagem em estufa

solar com teor de umidade da madeira em 15%. Situação semelhante foi verificada na secagem ao ar livre, em que as condições eram favoráveis à secagem, sendo a mesma finalizada com 20% de umidade da madeira.

A madeira seca com teor de umidade final de 15%, como no caso das secagens em estufa solar, apesar de elevado para algumas finalidades, pode ser empregada em construções externas, móveis e brinquedos externos, embarcações, implementos agrícolas e madeira serrada comercial. No entanto, a madeira seca com teor de umidade final de 20%, obtida com secagem ao ar livre, é imprópria para qualquer uso, devido ao seu elevado teor de umidade. Restando apenas a opção de comércio de madeira serrada bruta, no qual se recomenda teor de umidade entre 16 e 20% (JANKOWSKY, 1990).

Aleon (1979), ao secar madeiras de pinus e carvalho ao ar livre e em estufa solar, também constatou que o método de secagem em estufa solar propicia um teor de umidade mais apropriado para diversos usos, ao contrário da secagem ao ar livre.

Na Figura 15 pode-se verificar a representação gráfica da perda de umidade das madeiras de *Eucalyptus tereticornis*, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*, em função do tempo de exposição à secagem para as duas metodologias.

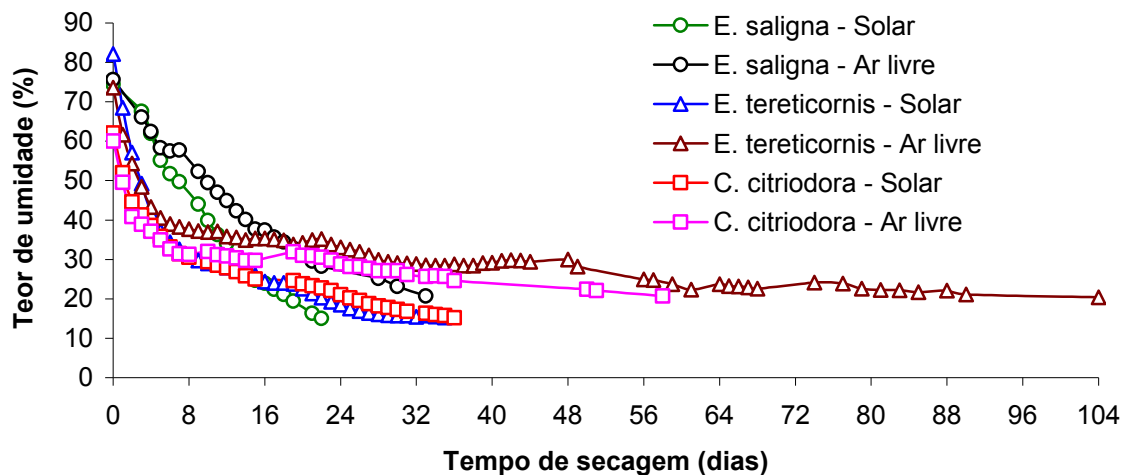


Figura 15 – Curvas de secagem em estufa solar e ao ar livre para as três espécies estudadas.

Para fins de comparação entre os tempos de secagem das duas metodologias, foi estabelecido um comparativo ao teor de umidade de 20%. Nessa situação, a secagem em estufa solar, para a madeira de *Eucalyptus tereticornis* foi 4,73 vezes mais rápida que a secagem ao ar livre. A mesma análise feita para a secagem de *Corymbia citriodora* mostra uma superioridade da secagem em estufa solar de 2,32 vezes, sendo menor a diferença entre as duas metodologias em comparação com a secagem da madeira de *Eucalyptus tereticornis*. E, por fim, a secagem de *Eucalyptus saligna* em estufa solar foi 1,83 vezes mais rápida que o processo ao ar livre, relação próxima a verificada para *Corymbia citriodora*.

De acordo com Read et al. (1974), Sharma et al. (1974), Bois (1977) e Gough (1977), o tempo de secagem em estufa solar é aproximadamente duas vezes mais rápido que o verificado na secagem ao ar livre, considerando madeiras com espessura de 25 mm. Desse modo, verifica-se que as espécies *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna* apresentaram relações próximas às citadas pelos autores. No entanto, outros pesquisadores, como Tschernitz e Simpson (1979), Chen et al. (1980) Kennedy (1984), Sattar (1987), estudando madeiras com a mesma espessura de 25 mm, encontraram valores de duas a quatro vezes mais rápido o tempo de secagem em estufa solar, intervalo esse que foi inferior ao verificado para a madeira de *Eucalyptus tereticornis*.

Apesar das nítidas vantagens no tempo de secagem em favor do processo em estufa solar, a comparação realizada ao teor de umidade de 20% não possibilita a obtenção de resultados ideais. Visto que a retirada do conteúdo de umidade a teores bem abaixo dos 20% estipulados nessa comparação é efetuada de modo mais rápido na estufa solar do que ao ar livre (HAQUE, 2002), sendo o secador solar 65% mais eficiente (SILVA, 2000).

Na Tabela 2 são apresentados os melhores modelos que descrevem o comportamento da secagem das madeiras de *Eucalyptus tereticornis*, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna* em estufa solar e ao ar livre. Tanto para secagem em estufa solar como para secagem ao ar livre, nas três espécies foram encontrados modelos significativos ao nível de 1% de probabilidade de erro. Além disso, os baixos valores do erro padrão de estimativa e os altos valores do coeficiente de determinação e de F calculado, demonstram um bom ajuste dos modelos aos dados observados.

Tabela 2 – Equações ajustadas para a perda de umidade das três espécies em função do tempo de secagem em estufa solar e ao ar livre (t).

<b>Equação</b>	<b>F</b>	<b>S<sub>yx</sub></b>	<b>R<sup>2</sup><sub>aj.</sub></b>	<b>P</b>
<i>Eucalyptus tereticornis</i> - Solar TU = 63,4038 - 14,0799[Ln (t)]	1336,03**	1,93865	97,5165	< 0,01
<i>Eucalyptus tereticornis</i> - Ar livre TU = 56,3363 - 7,70793[Ln (t)]	1281,19**	1,68009	95,3097	< 0,01
<i>Corymbia citriodora</i> - Solar TU = 46,8682 - 5,45942[√ (t)]	1247,18**	1,19486	97,7258	< 0,01
<i>Corymbia citriodora</i> - Ar livre TU = 41,2307 - 2,64782[√ (t)]	277,21**	1,42862	89,6174	< 0,01
<i>Eucalyptus saligna</i> - Solar Log (TU) = 4,44116 - 0,0784595(t)	4933,47**	0,0270868	99,6565	< 0,01
<i>Eucalyptus saligna</i> - Ar livre TU = 91,2399 - 19,399[Ln (t)]	539,01**	2,54382	96,4158	< 0,01

em que: TU= teor de umidade; F= valor de F calculado; S<sub>yx</sub>= erro padrão da estimativa; R<sup>2</sup><sub>aj.</sub>= coeficiente de determinação; P= nível de probabilidade de erro; \*\*= significativo ao nível de 1% de probabilidade de erro.

A percentagem de água evaporada por dia, denominada taxa de secagem, no processo ao ar livre é influenciada pelas condições ambientais (temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do ar e umidade de equilíbrio) (JANKOWSKY, 1990). Por sua vez, a secagem em estufa solar, além desses fatores, é influenciada, principalmente, pela insolação e radiação solar (Troxell e Muller, 1968).

É importante ressaltar que a estrutura anatômica da madeira também exerce influência na taxa de secagem. Em geral, a madeira de eucalipto apresenta predomínio de pontoações de pequeno diâmetro e com vasos usualmente obstruídos por tilos, esta característica anatômica qualifica a madeira de eucalipto como sendo impermeável (Stöhr, 1977; Vermaas, 2000).

A Figura 16 apresenta, graficamente, a relação entre a percentagem de água evaporada por dia e o teor de umidade das madeiras de *Eucalyptus tereticornis*, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*.

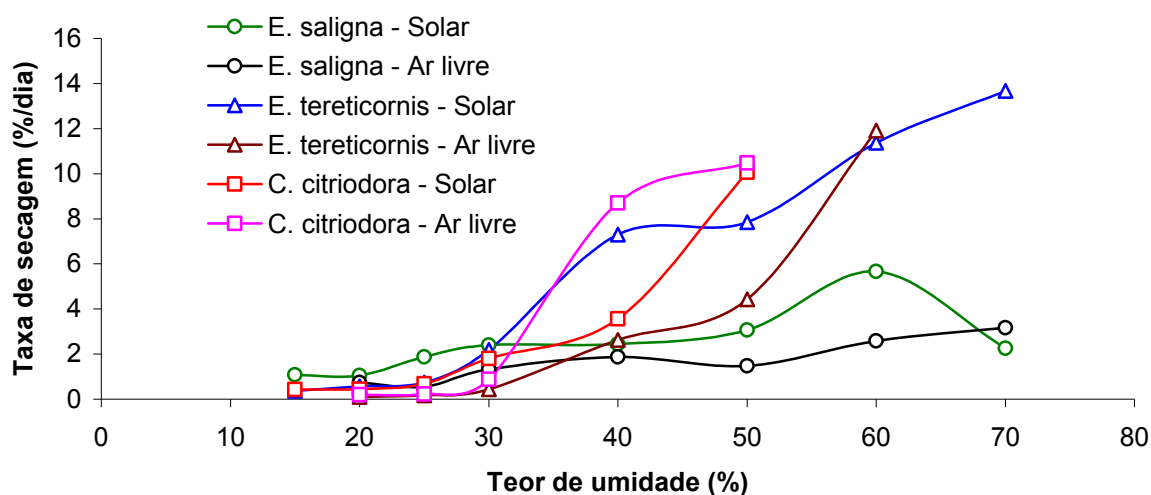


Figura 16 – Taxas de secagem em estufa solar e ao ar livre para as três espécies estudadas.

Durante a secagem das três espécies, em cada metodologia, verificaram-se claramente a ocorrência de variações na taxa de secagem, devido às condições ambientais. Foram observadas taxas de secagem positivas em condições propícias, e taxas mínimas ou nulas em condições não propícias.

Na secagem de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus tereticornis* pode-se constatar que no início do processo a taxa de secagem ao ar livre foi superior a registrada na estufa solar. Uma explicação para esta situação é de que nos primeiros dias de secagem na estufa solar o ambiente interno por vezes foi mais úmido que ao ar livre, tornando a secagem mais suave. Para a madeira de *Eucalyptus tereticornis*, passados os primeiros dois dias, houve a inversão das taxas de secagem, sendo a taxa de secagem em estufa solar superior ao ar livre, no entanto, para a madeira de *Corymbia citriodora* essa inversão só ocorreu após a faixa de 30% de umidade.

Quanto à secagem de *Eucalyptus saligna*, observa-se comportamento semelhante às duas espécies, verificando-se no início do processo taxa de secagem na estufa solar inferior ao ar livre, em razão de que nos primeiros três dias houve baixa incidência de luz e radiação solar. Após esse período, a taxa de secagem em estufa solar foi sempre superior à apresentada ao ar livre.

Outro fator influente na taxa de secagem foi o teor de umidade da madeira, sendo observados nos primeiros estágios (acima do PSF) as maiores taxas de secagem. E, ao longo do processo, com a redução do conteúdo de água na madeira (abaixo do PSF), ocorreu uma queda acentuada da taxa de secagem.

Na Tabela 3 é apresentada a taxa de secagem média em estufa solar e ao ar livre para cada espécie, bem como a taxa de secagem média acima e abaixo do PSF.

Tabela 3 – Médias das taxas de secagem em estufa solar e ao ar livre para as três espécies estudadas.

Espécie	Método	Taxa de secagem (%/dia)		
		Acima do PSF	Abaixo do PSF	Total
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	Ar livre	1,51	0,12	0,51
	Solar	5,82	0,53	1,91
<i>Corymbia citriodora</i>	Ar livre	2,12	0,21	0,68
	Solar	3,94	0,53	1,30
<i>Eucalyptus saligna</i>	Ar livre	2,19	0,63	1,66
	Solar	3,39	1,69	2,70

Pode-se observar, em números, a superioridade da taxa de secagem acima do PSF em comparação com a retirada de água abaixo do PSF. De acordo com Simpson (1991), as forças que retêm a água capilar são menores que as forças que retêm a água higroscópica, dessa forma a secagem acima do PSF é facilitada.

Com relação à taxa de secagem média ao final de cada processo, constata-se que os maiores valores foram verificados para a madeira *Eucalyptus saligna*, tanto na secagem em estufa solar (2,70%) quanto ao ar livre (1,66%).

Para a madeira de *Eucalyptus tereticornis*, a taxa de secagem média obtida na estufa solar foi de 1,91% por dia, enquanto que na secagem ao ar livre foi de 0,51% por dia. Por sua vez, a madeira de *Corymbia citriodora*, ao final de cada processo, apresentou taxas de secagem nos valores de 1,30 e 0,68% por dia, em estufa solar e ao ar livre, respectivamente. Em comparação com o *Eucalyptus tereticornis*, constata-se que a taxa de secagem na estufa solar foi mais baixa e na secagem ao ar livre a taxa foi superior para a carga de *Corymbia citriodora*.

Observa-se, ainda na Tabela 3, que as taxas de secagem nas duas metodologias foram diferentes, sendo verificada uma maior taxa de secagem no processo realizado em secador solar. Essa constatação não foi verificada por outros autores como Plumptre (1967) e Troxell e Mueller (1968), os quais afirmam que a taxa de secagem nas duas metodologias é praticamente a mesma até o PSF. No entanto, como abordado anteriormente, o comportamento da secagem em estufa solar varia de acordo com o local, tipo de madeira e tipo de secador utilizado.



Na Tabela 4, verifica-se o tempo e taxa de secagem observados em diversos estudos utilizando-se estufa solar como meio de redução do conteúdo de umidade da madeira de folhosas com aproximadamente 25 mm de espessura.

Tabela 4 – Taxa e tempo de secagem em estufa solar verificados por diversos autores.

<b>Pesquisador</b>	<b>Local</b>	<b>Estufa</b>	<b>TUi-TUf</b>	<b>Ts</b>	<b>Tx</b>
Lumley e Choong (1981)	Louisiana (USA) Lat. 30° N	Coletor externo	50-7%	20	2,15
Gough (1981)	Queensland (AUS) Lat. 27° S	Coletor interno	27-12%	62	0,24
Chen e Rosen (1979)	Illinois (USA) Lat. 38° N	Coletor externo	95-15%	8	10
Santini (1981)	Paraná (BRA) Lat. 25° S	Coletor interno	93-12%	23	3,52
Johnson (1961)	Wisconsin (USA) Lat. 43° N	Coletor interno	50-8%	95	0,44
			60-6%	52	1,04
			85-12%	47	1,55
Bois (1977)	Wisconsin (USA) Lat. 43° N	Coletor interno	60-6%	52	1,04
			50-8%	218	0,19
Read et al. (1974)	New South Wales (AUS) Lat. 35° S	Coletor externo	100-6%	20	4,7
Plumptre (1967)	Kampala (UGA) Lat. 0°	Coletor interno	112-12%	27	3,70
			50-15%	41	0,85
Peck (1962)	Wisconsin (USA) Lat. 43° N	Coletor interno	70-20%	24	2,08
			75-20%	34	1,62
			80-20%	105	0,57
Tschernitz e Simpson (1979)	Wisconsin (USA) Lat. 43° N	Coletor externo	84-9%	54	1,39
Chudnoff et al. (1966)	Rio Piedras (PRI) Lat. 17° N	Coletor interno	35-8%	25	1,08
SUDAM/IPT (1981)	Pará (BRA) Lat. 3° S	Coletor interno	80-17%	103	0,61
			90-11%	103	0,77
			47-10%	103	0,36
			28-9%	73	0,26
Steinmann et al. (1980b)	Stellenbosch (ZAF) Lat. 35° S	Coletor externo	93-12%	16	5,06
Moraes-Duzat et al. (2000)	Amazonas (BRA) Lat. 3° S	Coletor interno	65-8%	28	2,04
			77-10%	33	2,03
			84-13%	12	5,91
			70-9%	17	3,59
Rodríguez et al. (2003)	Yucatán (MEX) Lat. 21° N	Coletor interno	115-19%	35	2,74
Bauer (2003)	Minas Gerais (BRA) Lat. 19° S	Coletor interno	59-12%	27	1,74
Vital (1976)	Minas Gerais (BRA) Lat. 20° S	Coletor interno	56-16%	21	1,90
Haque (2002) <sup>1</sup>	Wauchope (AUS) Lat. 31° S	Coletor interno	55-16%	55	0,71

em que: Ts= tempo de secagem (dias); Tx= taxa de secagem (%/dia); TUi= teor de umidade inicial (%); TUf= teor de umidade final (%); <sup>1</sup>=experimento realizado com tábuas de 4 cm de espessura.

Realizando uma comparação dos resultados obtidos nesse estudo (Tabela 3) com os encontrados na literatura, observa-se que a secagem das espécies de eucalipto, de modo geral, foi satisfatória, considerando que os processos foram realizados no inverno e com perspectivas de ser um método com baixo investimento inicial. Além disso, a estufa solar não tem como objetivo ser um método de secagem acelerada, como a secagem em estufa convencional, a qual tem os inconvenientes de apresentar, em alguns casos, alta incidência de defeitos. Ao comparar o presente estudo com as pesquisas realizadas por Vital (1976) e Bauer (2003) na secagem de *Eucalyptus* em Minas Gerais, Brasil, durante períodos propícios à secagem em estufa solar, pode-se verificar que apenas a taxa de secagem de *Corymbia citriodora* (1,30%) foi inferior.

A massa específica também apresenta influência sobre a taxa de secagem, em que madeiras com menor massa específica secam mais rápido. De acordo com Brown et al. (1952), a pequena quantidade de parede celular, a qual dificulta a movimentação da água, e a grande quantidade de lumes, por onde a água tem uma rápida movimentação, favorece a taxa de secagem em madeiras de menor massa específica.

Verificaram-se para as madeiras de *Eucalyptus tereticornis* e *Corymbia citriodora* as maiores massas específicas, com valores de 0,90 e 0,89 g cm<sup>-3</sup>, respectivamente. Enquanto que a madeira de *Eucalyptus saligna* apresentou a menor massa específica, com valor médio de 0,69 g cm<sup>-3</sup>. Fazendo uma relação da massa específica com a taxa de secagem, constata-se que *Eucalyptus tereticornis* e *Corymbia citriodora*, por apresentarem maior massa específica, tiveram uma secagem mais lenta, tanto em estufa solar quanto ao ar livre, em comparação a madeira de *Eucalyptus saligna*.

Com relação à diferenciação entre os tempos e taxas de secagem em cada processo, pode-se verificar que com o aumento da massa específica da madeira, no caso do *Eucalyptus tereticornis*, houve uma maior diferença entre a secagem em estufa solar e ao ar livre. Dessa forma, a secagem em estufa solar de madeiras com menor massa específica, como no caso de *Eucalyptus saligna*, tornam o método menos vantajoso em comparação com a secagem ao ar livre. Segundo Smith (1981) a secagem em estufa solar de madeiras de baixa massa específica, quando comparada à secagem ao ar livre, é menos vantajosa, apresentando maiores custos do metro cúbico seco. Além disso, Silva (2000) cita que alguns pesquisadores verificaram que, nos meses mais quentes, praticamente os tempos de secagem em estufa solar e ao ar livre não apresentam grandes diferenças, como constatado na secagem de *Eucalyptus saligna*.

Um ponto importante na secagem da madeira é a uniformidade do teor de umidade final da carga. A secagem em estufa solar, por ser um método de baixa temperatura, e que possui controle, apenas, parcial de suas variáveis influentes, tende a apresentar certa desuniformidade no teor de umidade das tábuas ao final do processo (ARMSTRONG, 2008). Na Figura 17 é apresentada a variação do teor de umidade final nas cargas de *Eucalyptus tereticornis*, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna* submetidas à secagem em estufa solar.

A variação do teor umidade final nas cargas das três espécies foi baixa, apresentando valores de 1,81, 1,74 e 2,20%, respectivamente, para *Eucalyptus tereticornis*, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*. Esses valores estão próximos do limite proposto por Galvão e Jankowsky (1985) que admitem, em métodos de secagem controlada, uma variação de até 2% no teor de umidade final da carga.

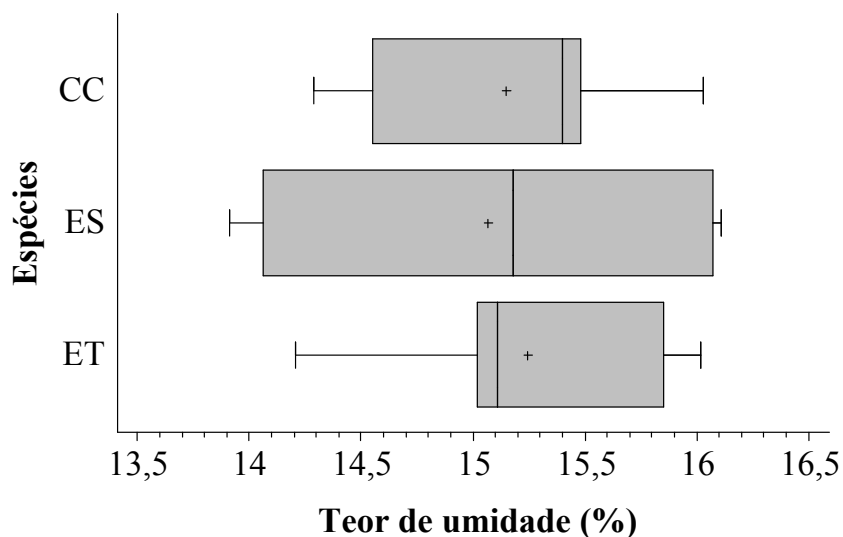


Figura 17 – Amplitude de variação dos dados de teor de umidade final após a secagem em estufa solar de *Eucalyptus tereticornis* (ET), *Corymbia citriodora* (CC) e *Eucalyptus saligna* (ES).

Uma explicação para a pequena diferença de teor de umidade dentro das cargas se deve a reversão no sentido do fluxo de ar, realizado a cada quatro dias. Autores como Troxell e Mueller (1968) e Gough (1977) utilizaram essa técnica com sucesso. Outro fator importante é a obtenção de uma circulação de ar constante (SANTINI e HASELEIN, 2002). Durante os testes de secagem foi encontrada uma velocidade média entre 1,2 e 1,35 m s<sup>-1</sup>. O uso da

parede vazada de tijolos, semelhante ao realizado nos estudos de Gough (1977) e Santini (1981), e defletores proporcionaram uma uniformização do fluxo de ar.

#### 4.2 Variáveis ambientais na estufa solar

O comportamento da secagem de madeira em estufa solar, no que diz respeito à taxa de secagem e condições ambientais interna, pode ser influenciado por diversos fatores externos e internos ao secador, entre os quais se podem citar: insolação, radiação solar, velocidade do ar e teor de umidade da madeira (Troxell e Mueller, 1968; Gough, 1977).

Na Figura 18 pode-se verificar a influência das horas de insolação diária na temperatura interna máxima da estufa solar, durante a secagem das madeiras de *Eucalyptus tereticornis*, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*.

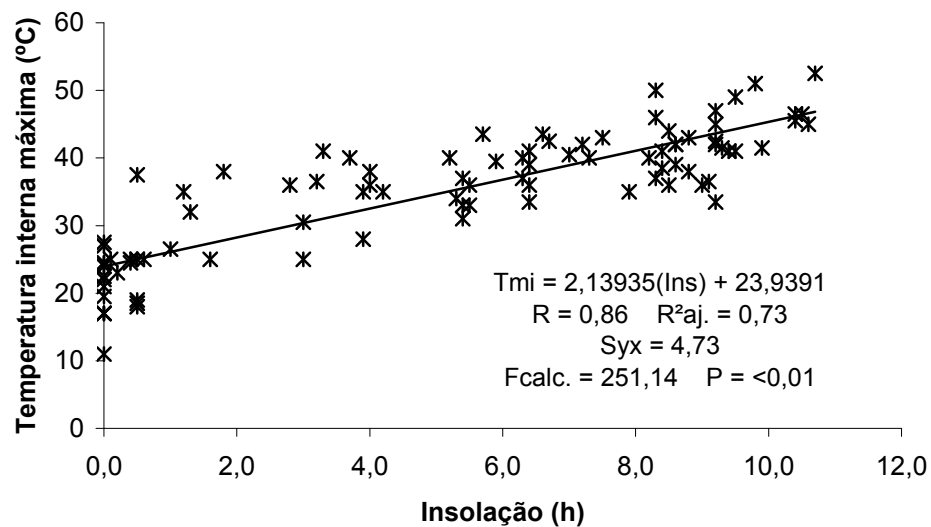


Figura 18 – Relação entre as horas de insolação diária (Ins) e a temperatura interna máxima (Tmi) durante o período de secagem.

O coeficiente de correlação (0,86) mostra que os dados apresentaram uma boa correlação, de modo que, com o aumento da insolação diária, houve um acréscimo na temperatura interna máxima da estufa. Confirmando o verificado por Santini (1981) e Cueto (1997).

A correlação entre a radiação solar máxima e a temperatura interna máxima da estufa solar na secagem das madeiras de *Eucalyptus tereticornis*, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna* pode ser observada na Figura 19.

Verifica-se que os dados apresentaram uma boa correlação, sendo o coeficiente de correlação igual a 0,90. À medida que houve aumento do nível de radiação solar, a temperatura interna da estufa solar aumentou. Comportamento semelhante ao observado por Reuss et al. (1997).

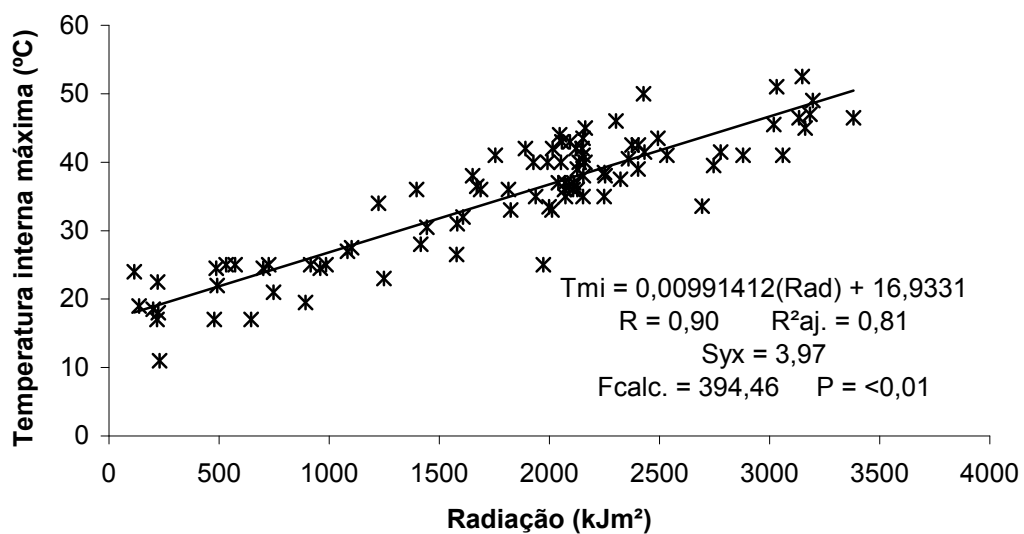


Figura 19 – Relação entre a radiação solar máxima (Rad) e a temperatura interna máxima (Tmi) durante o período de secagem.

A Figura 20 apresenta a influência do teor de umidade da madeira na temperatura interna máxima da estufa solar durante a secagem das madeiras de *Eucalyptus tereticornis*, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*. De forma a minimizar o efeito da insolação solar, foram considerados para correlação apenas os dias de secagem, que apresentavam insolação e radiação solar superiores a oito horas e 2200 kJm<sup>2</sup>.

Segundo Cech e Pfaff (1977), o calor é a fonte necessária para retirada da água presente na madeira. Desse modo, nos estágios iniciais de secagem, a madeira requer uma grande quantidade de calor para a retirada da maior quantidade de água (acima do PSF), causando limitação da elevação de temperatura no início do processo. Observa-se, na Figura 20, que a temperatura interna máxima aumentou com a redução do teor de umidade da

madeira, conforme verificado por alguns autores como Gough (1977), Bois (1977) e Santini (1981).

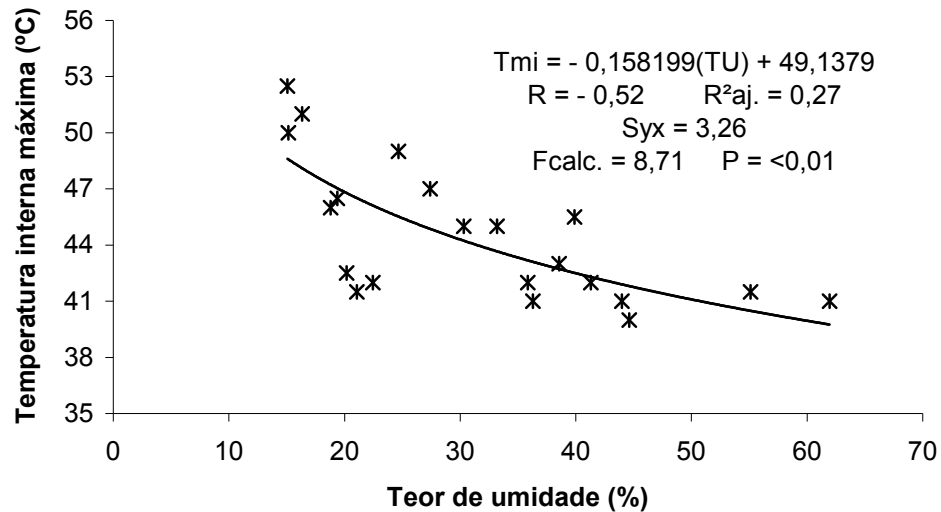


Figura 20 – Relação entre o teor de umidade da madeira (TU) e a temperatura interna máxima (Tmi) durante o período de secagem.

Na Tabela 5, por meio da análise de correlação parcial, avaliou-se o efeito do teor de umidade da madeira sobre a correlação estabelecida entre a diferença de temperatura máxima interna e externa ao secador solar, insolação e radiação solar na secagem das madeiras de *Eucalyptus tereticornis*, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*.

Tabela 5 – Efeito do teor de umidade da madeira na correlação entre a diferença de temperatura máxima interna e externa a estufa solar, insolação e radiação solar.

Equação	R <sup>2</sup> <sub>aj.</sub>	S <sub>yx</sub>	F	P	Correlação parcial TU	Teste de hipótese F
DT= 9,51677 + 1,35885(Ins)	53,81	4,36	96,52**	<0,01	-	-
DT= 2,41203 + 0,00758166(Rad)	75,56	3,17	254,57**	<0,01	-	-
DT= 2,58574 + 0,0857655(Ins) + 0,00724543(Rad)	75,33	3,18	126,18**	<0,01	-	-
DT= 6,66644 + 0,0744153(Ins) + 0,0074191(Rad) - 0,156312(TU)	84,64	2,51	151,61**	<0,01	- 0,57	49,50**

em que: DT= diferença de temperatura interna e externa ao secador solar; Ins= insolação; Rad= radiação solar; TU= teor de umidade da madeira; R<sup>2</sup><sub>aj.</sub>= coeficiente de determinação; S<sub>yx</sub>= erro padrão de estimativa; F= valor de F calculado; P= nível de probabilidade de erro; \*\*= significativo ao nível de 1% de probabilidade de erro.

Pode-se observar que o teor de umidade da madeira apresentou uma correlação razoável de -0,57, com a diferença de temperatura, ou seja, com a redução do teor de umidade ocorreu um aumento da diferença de temperatura. Além disso, o teste de hipótese F foi significativo ao nível de 1% de probabilidade.

O efeito do teor de umidade da madeira pode ser constatado pelo aumento do coeficiente de determinação e valor de F calculado e pela redução do erro padrão de estimativa, em comparação com os modelos em que foram considerados apenas a insolação e radiação solar. Dessa forma, verifica-se que o teor de umidade da madeira influencia de modo positivo na diferença de temperatura interna e externa a estufa solar.

No Apêndice 2, pode-se visualizar de forma mais clara a representação gráfica das relações entre as temperaturas máxima (interna e externa), horas de insolação e radiação solar máximas registradas ao decorrer do processo de secagem em estufa solar de cada espécie estudada.

Nas Figuras 21, 22 e 23 observam-se, graficamente, a influência do teor de umidade das madeiras de *Eucalyptus tereticornis*, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna* na temperatura, umidade relativa e umidade de equilíbrio durante a secagem em estufa solar, bem como a diferenciação entre as variações dentro e fora do secador.

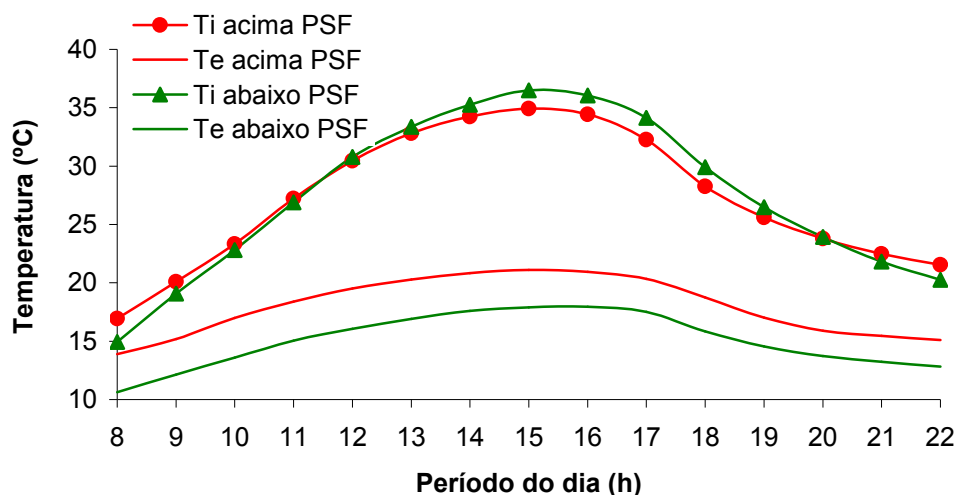


Figura 21 – Variação das médias diárias de temperatura interna (Ti) e externa (Te) ao secador solar em duas faixas de secagem das três espécies estudadas: acima e abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF).

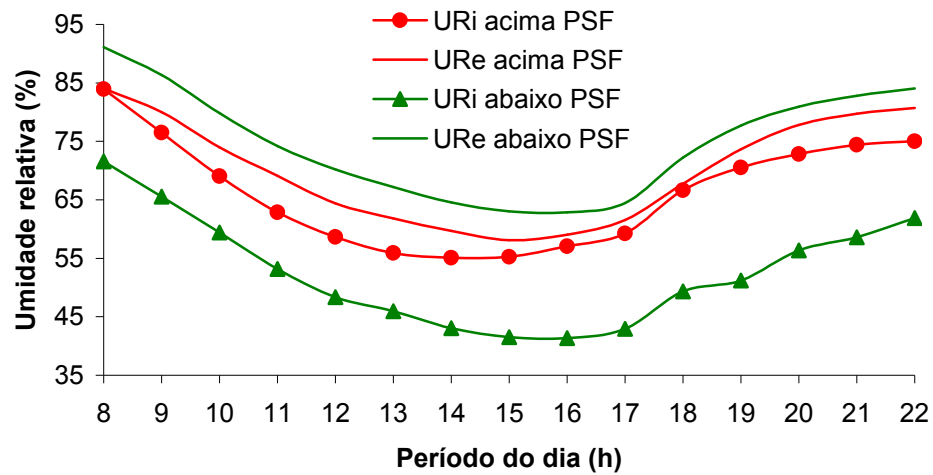


Figura 22 – Variação das médias diárias de umidade relativa interna (URi) e externa (URe) ao secador solar em duas faixas de secagem das três espécies estudadas: acima e abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF).

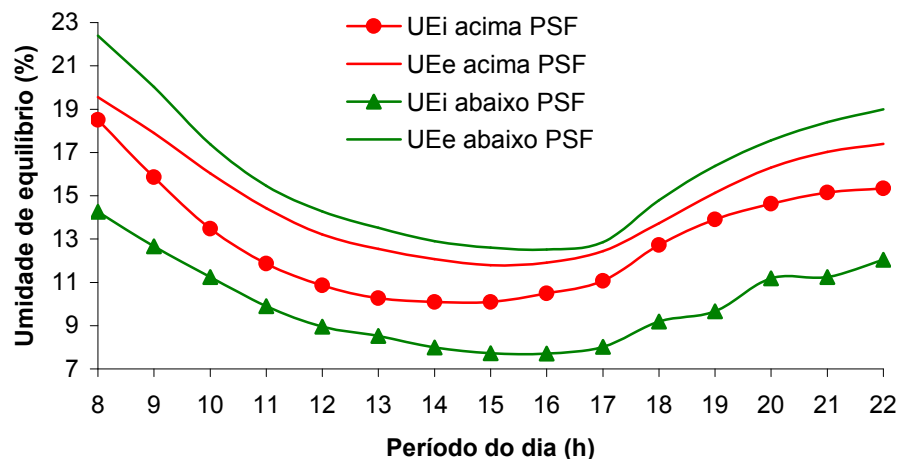


Figura 23 – Variação das médias diárias de umidade de equilíbrio interna (UEi) e externa (UEe) ao secador solar em duas faixas de secagem das três espécies estudadas: acima e abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF).

Verifica-se, nas três situações, que as condições de secagem na estufa solar foram mais severas do que ao ar livre, apresentando maiores médias de temperatura e menores médias de umidade relativa e de umidade de equilíbrio. O modelo construtivo da estufa solar, conforme recomendado por Wengert (1971), visando à eficiência na manutenção do calor gerado pela irradiação solar foi fator principal para essas condições. Segundo Silva (2000) por mais simples que seja a construção do secador solar, as condições internas são sempre



superiores às verificadas em ambiente externo e, até mesmo, durante a noite, se conservam mais elevadas.

Viehbeck (1999) cita que as maiores médias de temperatura dentro da estufa solar são verificadas no intervalo entre 12 e 15 horas, variando em função da latitude do local. Na Figura 21, pode-se observar que as maiores médias de temperatura dentro do secador foram verificadas no limite superior proposto pelo autor, às 15 horas. Com relação à umidade relativa e de equilíbrio, as menores médias foram, também, verificadas às 15 horas (Figuras 22 e 23). O horário da mínima registrada de umidade relativa e de equilíbrio está dentro da faixa entre 12 e 16 horas, verificado por Rodríguez et al. (2003).

Quando analisadas as variações ambientais dentro do secador, constata-se que, na faixa acima do PSF, as médias de temperatura, umidade relativa e umidade de equilíbrio, às 15 horas, foram de 34,94°C, 55,36% e 10,09%, respectivamente, enquanto que na faixa abaixo do PSF, no mesmo horário, as médias foram de 36,50°C, 41,54% e 7,72%. Embora tenha sido observada uma pequena diferença entre as médias das variáveis ambientais nas duas faixas de umidade, verifica-se que, com a redução da umidade da madeira, há um aumento da temperatura média interna do secador solar, ao passo que as médias de umidade relativa e de equilíbrio diminuem. Resultado semelhante foi verificado por Santini (1981) ao analisar a secagem de cargas mistas de madeiras e cargas de *Ocotea catharinensis*.

A eficiência do secador solar, com a redução da umidade da madeira, também pode ser verificada claramente pela diferença entre as médias de temperatura ( $\Delta T$ ), umidade relativa ( $\Delta UR$ ) e de equilíbrio ( $\Delta UEq$ ), dentro e fora da estufa, no horário das 15 horas. Na faixa acima do PSF, os valores de  $\Delta T$ ,  $\Delta UR$  e  $\Delta UEq$  foram de 13,84°C, 2,84% e 1,7%. Já na faixa abaixo do PSF, foram encontrados valores superiores (18,55°C, 21,35% e 4,89%).

Peck (1962) e Bois (1977), também verificaram tal comportamento em função da umidade da madeira, apresentando valores de  $\Delta T$  no início da secagem de 8,3 e 5,0°C, e no fim do processo de 16,6 e 11,1°C, respectivamente. Por sua vez, Gough (1977) e Cueto (1997) verificaram, em dias ensolarados, valores de  $\Delta T$  máximo entre 15 e 20°C e entre 18 e 24°C, valores semelhantes ao observado neste estudo na faixa acima do PSF. A máxima  $\Delta T$  registrada neste experimento ( $\Delta T = 27,8^\circ\text{C}$ ) foi no estágio final de secagem de *Eucalyptus saligna*, quando a temperatura interna do secador atingiu 52,5°C e a temperatura externa foi de 24,7°C (Apêndice 2). Moraes-Duzat et al. (2000) registraram, em pesquisa na Região Amazônica, valores médios de  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ , inferior ao verificado nessa pesquisa. Entretanto, ficou aquém do verificado por Yang (1980), o qual registrou  $\Delta T$  médio em torno de 29°C. É importante ressaltar que o estudo realizado por Yang (1980) foi durante o período de verão,

quando a insolação e radiação são maiores, favorecendo o aumento da  $\Delta T$ . Dessa forma, a redução da umidade da madeira favoreceu o aproveitamento da energia em forma de calor para o aquecimento da estufa, elevando as suas temperaturas internas em comparação com o exterior, conforme analisado anteriormente na Tabela 5 (página 62).

Com relação ao comportamento da  $\Delta UR$ , Cueto (1997) encontrou resultado contrário ao observado nesse estudo, em que verificou-se para algumas cargas de *Pinus* menores índices de umidade relativa fora da estufa, em comparação com os valores registrados na parte interna. O bom isolamento térmico confeccionado no interior da estufa, nesse experimento, mesmo utilizando materiais de baixa tecnologia, favoreceu esse resultado, elevada  $\Delta UR$  em favor da estufa solar. É consenso entre diversos autores (HAQUE, 2002), que a umidade relativa no interior da estufa é mais baixa que fora da mesma.

O efeito da diferença de temperatura interna e externa ao secador solar, durante a secagem de *Eucalyptus tereticornis*, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*, na relação com a umidade relativa do ar e umidade de equilíbrio é representada na Figura 24. Conforme discutido anteriormente, com o aumento da diferença das temperaturas interna e externa, o que corresponde a teores de umidade mais baixos da madeira, ocorreu um declínio da umidade relativa e da umidade de equilíbrio dentro da estufa. Verificou-se uma boa correlação entre os dados. Além disso, os coeficientes de determinação indicam que houve um ajuste satisfatório dos modelos.

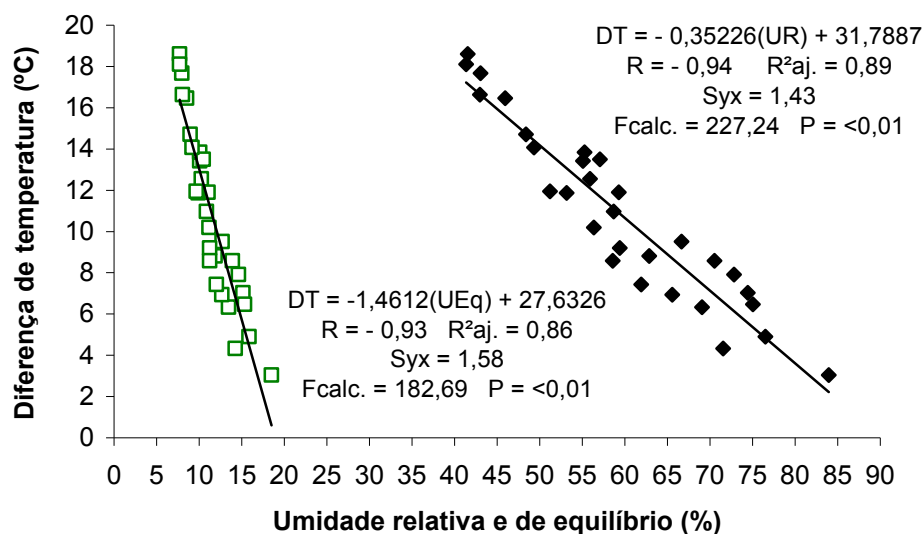


Figura 24 – Efeito da diferença de temperatura (DT) na umidade relativa do ar (UR) e umidade de equilíbrio (UEq) durante a secagem as três espécies estudadas.

Os índices de insolação e a radiação solar máxima diária apresentaram valores diferenciados para cada espécie e fase de secagem. Dessa forma, na Tabela 6, é apresentada uma caracterização dessas variáveis climáticas para as madeiras de *Eucalyptus tereticornis*, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*, submetidas à secagem em estufa solar.

Tabela 6 – Valores médios de insolação e radiação solar máxima, verificados acima e abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF) durante a secagem das três espécies estudadas.

<b>TU madeira</b>	<b>Radiação solar (kJm<sup>2</sup>)</b>	<b>Insolação solar (h)</b>
<i>Secagem de Eucalyptus tereticornis</i>		
Acima do PSF (9 dias)	1932,22 a	5,74 a
Abaixo do PSF (26 dias)	1502,22 a	4,39 a
<i>Secagem de Eucalyptus saligna</i>		
Acima do PSF (13 dias)	2035,69 a	5,21 a
Abaixo do PSF (9 dias)	2709,67 a	8,27 a
<i>Secagem de Corymbia citriodora</i>		
Acima do PSF (7 dias)	1888,86 a	7,40 a
Abaixo do PSF (28 dias)	1656,57 a	4,01 b

Médias seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si (LSD Fisher,  $p > 0,05$ ).

Durante a execução das secagens em estufa solar verificou-se que as maiores médias de radiação e insolação solar foram registradas na secagem de *Eucalyptus saligna*, com valores de 2311,41 kJm<sup>2</sup> e 6,46 horas, respectivamente. Esse fato pode ter explicação vinculada ao período de realização da secagem, a qual foi efetuada próxima ao final do inverno. De acordo com Viehbeck (1999), a intensidade de radiação é, em geral, mais alta quanto mais próximo aos meses de verão. Essa diferença é atribuída às mudanças de altitude solar de estação em estação. Apesar das médias de insolação e radiação abaixo do PSF serem superiores as observadas acima do PSF, não houve diferença significativa entre as mesmas. As maiores médias dessas variáveis, principalmente, no final do processo de secagem, quando ocorre à retirada da água higroscópica, contribuiu para um tempo de secagem mais curto para a espécie em comparação com as demais.

Para a secagem das madeiras de *Eucalyptus tereticornis* e *Corymbia citriodora* foram observadas médias de insolação (4,74 e 4,69 horas) e radiação solar (1612,91 e 1703,02 kJm<sup>2</sup>) bastante próximas. Por meio do teste de médias das variáveis insolação e radiação solar, verifica-se que não houve diferença significativa entre as duas faixas de umidade das madeiras, com exceção da insolação solar durante a secagem de *Corymbia citriodora*.

Entretanto, ao contrário do verificado na secagem de *Eucalyptus saligna*, foram observadas menores médias de insolação e radiação solar no final da secagem, contribuindo para o maior tempo de secagem das madeiras de *Eucalyptus tereticornis* e *Corymbia citriodora*.

Segundo Johnson (1961), para a secagem da madeira, com teor de umidade final abaixo de 8%, em estufa solar, é necessário cerca de 400 horas de insolação, aproximadamente 70 dias, durante o período de verão em Wisconsin (USA).

Nesse estudo, verificaram-se aproximadamente 166, 164 e 142 horas de insolação para secagem das madeiras de *Eucalyptus tereticornis*, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*, respectivamente.

### **4.3 Variáveis ambientais ao ar livre**

Segundo Jankowsky (1990), a carga de madeira quando exposta a secagem ao ar livre, de maneira adequada, considerando a sua disposição e espaçamento entre tábuas e entre pilhas, seca mais rapidamente em condições climáticas de alta temperatura, baixa umidade relativa e alta velocidade do ar. Além disso, os baixos índices de precipitação pluviométrica e a baixa umidade de equilíbrio da região em que a carga de madeira é submetida ao processo de secagem também favorecem na redução do tempo de secagem.

Nas Figuras 25, 26, 27, 28 e 29 verificam-se as oscilações de temperatura, umidade relativa do ar, umidade de equilíbrio, precipitação pluviométrica e velocidade do vento, monitoradas 24 horas por dia, durante a secagem ao ar livre das madeiras de *Eucalyptus tereticornis*, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*.

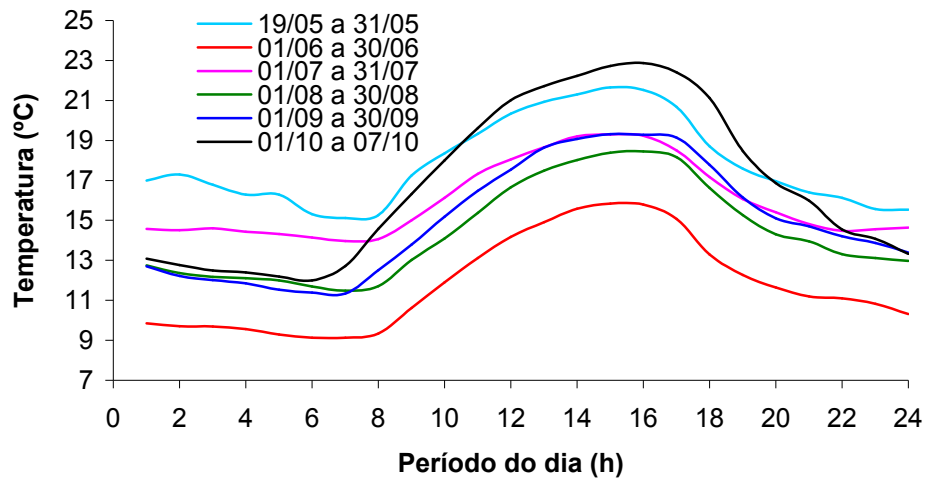


Figura 25 – Médias de temperatura observadas durante a secagem ao ar livre das três espécies estudadas.

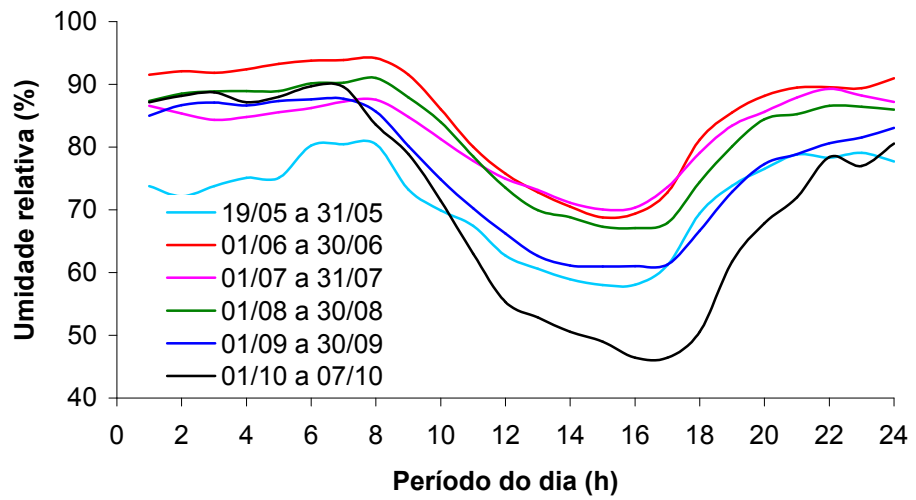


Figura 26 – Médias de umidade relativa observadas durante a secagem ao ar livre das três espécies estudadas.

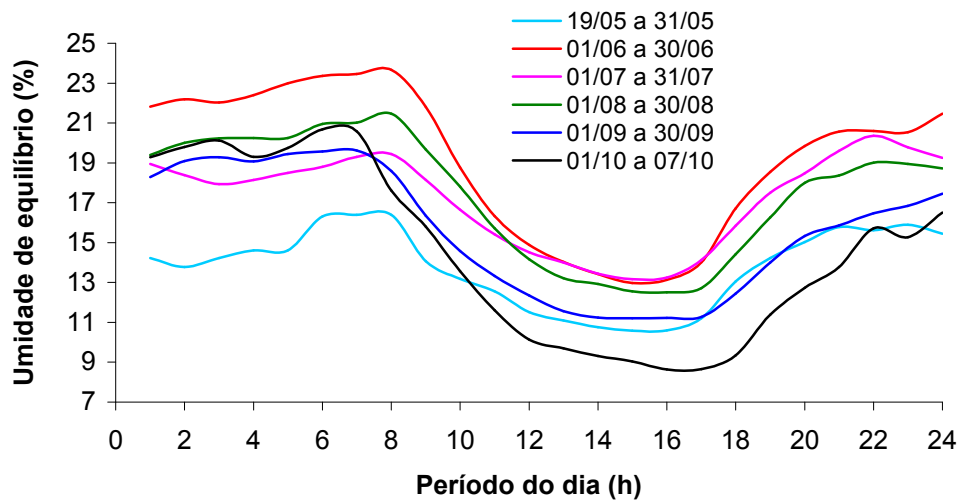


Figura 27 – Médias de umidade de equilíbrio observadas durante a secagem ao ar livre das três espécies estudadas.

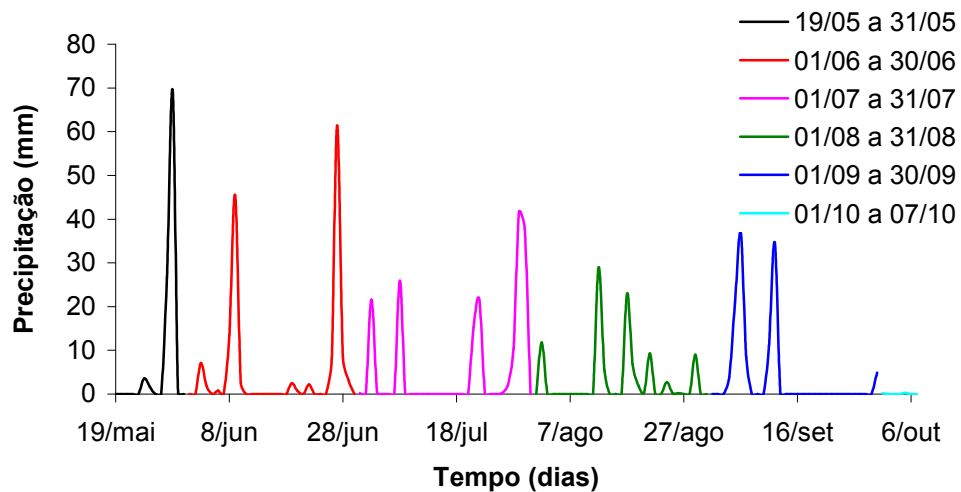


Figura 28 – Médias de precipitação pluviométrica observadas durante a secagem ao ar livre das três espécies estudadas.

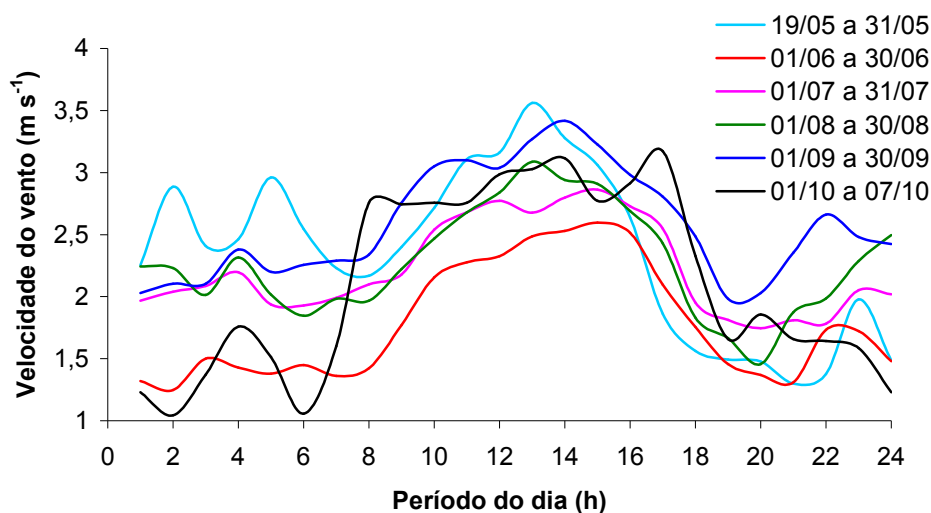


Figura 29 – Médias de velocidade do vento observadas durante a secagem ao ar livre das três espécies estudadas.

Para a madeira de *Eucalyptus tereticornis* observa-se que no primeiro mês (maio/2008) houve predomínio das maiores médias de temperatura e velocidade do ar e menores médias de umidade relativa do ar e umidade de equilíbrio, favorecendo a redução do teor de umidade inicial. Posteriormente, nos meses seguintes, durante a retirada da água higroscópica, se percebem condições menos favoráveis para a secagem ao ar livre, o que contribuiu para o longo tempo do processo.

Na secagem de *Corymbia citriodora* verifica-se que as condições climáticas, com elevada temperatura, baixa umidade relativa, baixa umidade de equilíbrio e alta velocidade do ar, no último mês (setembro/2008) favoreceram a retirada da água higroscópica, de difícil difusão. Nos primeiros meses observam-se condições suaves de secagem, com elevada umidade relativa e de equilíbrio, baixa velocidade do ar e elevada quantidade de precipitação, apesar da elevada temperatura.

Por sua vez, as condições climáticas durante a secagem de *Eucalyptus saligna* foram bastante propícias nos dois períodos (setembro e outubro/2008), apresentando elevada temperatura, baixa umidade relativa, baixa umidade de equilíbrio, alta velocidade do ar e baixo índice de precipitação pluviométrica.

#### 4.4 Contração da madeira

A Tabela 7 apresenta as contrações radiais e tangenciais ao final da secagem em estufa solar e ao ar livre, bem como o fator anisotrópico das madeiras de *Eucalyptus tereticornis*, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*.

Tabela 7 – Contrações radiais e tangenciais e fator de anisotropia das três espécies estudadas expostas a secagem em estufa solar e ao ar livre.

Espécie	Método	Contração (%)		Fator de anisotropia (%)
		espessura	largura	
<i>E. tereticornis</i>	Solar	4,93	5,65	1,15
	Ar livre	4,69	5,12	1,09
<i>C. citriodora</i>	Solar	3,65	4,16	1,14
	Ar livre	2,46	3,59	1,46
<i>E. saligna</i>	Solar	4,50	3,64	0,81
	Ar livre	3,36	2,41	0,72

Observa-se que em nenhuma das espécies estudadas foi registrada grande diferença entre as contrações radial e tangencial nas duas metodologias de secagem. O fator de anisotropia, relação entre contração tangencial e radial, é um parâmetro que permite a classificação da madeira em função da sua utilização. Valores elevados e/ou anormais são, em geral, fontes de explicação para a formação de defeitos resultantes da secagem. De acordo com Nock et al. (1975) valores abaixo de 1,50%, como os registrados neste estudo, são considerados excelentes, sendo as madeiras classificadas como de alta estabilidade dimensional. Siau (1971) cita que madeiras de alta massa específica, como no caso de eucaliptos, tendem a apresentar instabilidade dimensional, entretanto, os valores dos fatores de anisotropia para as três espécies deste estudo contrariam o exposto pelo autor.

Oliveira (1998), estudando madeira de sete espécies de eucalipto, com 16 anos de idade, encontrou valores de anisotropia variando de 1,4 até 2,1. Valores considerados elevados se comparados com os obtidos para as três espécies deste estudo.

De modo geral, as maiores contrações em espessura e largura observadas na secagem em estufa solar se devem ao fato de que a magnitude das contrações varia de acordo com a umidade da madeira (RASMUSSEN, 1961; RIETZ e PAGE, 1971). Observa-se, assim, quanto menor o teor de umidade, maiores são as contrações radial e tangencial, bem como a



diferença entre ambas. A única exceção foi para *Corymbia citriodora*, a qual apresentou maior fator de anisotropia para a carga exposta à secagem ao ar livre.

Conforme estudos realizados pelo IPT (1956), os coeficientes de contração de madeiras de eucalipto variam de 3,5 a 8,6% na direção radial e de 7,8 a 21,9% na direção tangencial. Comparando este estudo com a citação anterior, verifica-se que apenas para a contração radial os dados estiveram dentro da faixa de contração citada.

#### 4.5 Qualidade da madeira resultante da secagem

##### 4.5.1 Rachaduras de topo

De acordo com Skaar (1972), as rachaduras na madeira, em geral, são formadas pela presença de gradientes de umidade. No caso das rachaduras de topo, a madeira seca mais rapidamente nas extremidades em comparação com o meio da peça, esse gradiente de umidade dentro da tábua provoca o surgimento de esforços de tração, que ocasionam as rachaduras (SIMPSON, 1991).

A Tabela 8 apresenta o índice de rachaduras de topo médio e o percentual de peças defeituosas, após o desdobro e após a secagem para as madeiras de *Eucalyptus tereticornis*, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*.

Tabela 8 – Índice de rachaduras de topo médio e percentual de peças defeituosas nas três espécies estudadas.

Espécie	Método	Após desdobro		Após secagem		Diferença IRT médio <sup>1</sup>
		IRT médio	% defeito	IRT médio	% defeito	
<i>E. tereticornis</i>	Ar livre	7,18	7,27	11,94	18,18	4,76 <sup>A</sup>
	Solar	6,63	7,27	10,66	12,73	4,04 <sup>A</sup>
<i>E. saligna</i>	Ar livre	2,90	0,00	4,49	0,00	1,60 <sup>A</sup>
	Solar	4,11	0,00	5,88	1,82	1,77 <sup>A</sup>
<i>C. citriodora</i>	Ar livre	3,56	0,00	6,66	0,00	3,11 <sup>A</sup>
	Solar	4,99	1,82	8,37	5,46	3,38 <sup>A</sup>

em que: <sup>1</sup>= Índice de rachadura resultante do processo de secagem; Médias seguidas por letras iguais, dentro de cada espécie, não diferem significativamente entre si (LSD Fisher, p > 0,05); IRT= Índice de rachadura de topo (%).

Verifica-se que entre as espécies estudadas, a madeira de *Eucalyptus tereticornis* foi a que apresentou maiores percentagens de peças defeituosas resultantes da secagem, com

valores superiores para a secagem ao ar livre em comparação com a secagem em estufa solar, 10,91% e 5,46%, respectivamente.

A presença de uma maior percentagem de peças defeituosas na secagem ao ar livre em comparação com o processo em estufa solar, também foi registrada por Chudnoff et al. (1966), Chen e Rosen (1979), Tschernitz e Simpson (1979) e Steinmann et al. (1980b).

A possível explicação para as maiores percentagens de peças defeituosas na madeira serrada de *Eucalyptus tereticornis* está relacionada com a sua maior massa específica, quando comparada com as demais espécies estudadas. Segundo Malan (1995) quanto maior a massa específica da madeira, maiores são os níveis de tensão de crescimento. Lima et al. (2004) cita que a deformação residual longitudinal (DRL), decorrente das tensões de crescimento, apresenta importante relação com a magnitude da incidência de rachaduras. Com o aumento da DRL na árvore em pé, maior é a incidência de rachaduras na madeira serrada.

Ao analisar as madeiras de *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora*, observa-se que apenas ao final do processo de secagem em estufa solar verificaram-se à presença de peças defeituosas, com percentagens de 1,82 e 3,64%, respectivamente. Segundo alguns estudos, como o realizado por Lumley e Choong (1981), a presença de rachaduras de topo é um dos principais defeitos que ocorrem durante o processo de secagem em estufa solar.

Com relação ao acréscimo no IRT ao final da secagem não foram verificados valores elevados, ficando abaixo de 5%, resultado semelhante também foi constatado por Sthör (1977).

Para as espécies *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora* observou-se uma tendência de aumento do IRT resultante da secagem em estufa solar em comparação com o processo realizado ao ar livre. Por sua vez, a espécie *Eucalyptus tereticornis* apresentou tendência contrária. Entretanto, mediante as análises de variância (Tabela 8 e Apêndice 3), não se observaram diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade de erro quanto ao acréscimo do IRT em função dos métodos de secagem para cada uma das três espécies estudadas.

Vital (1976), ao analisar o comportamento das rachaduras de topo em *Eucalyptus* sp., verificou diferença significativa entre os métodos de secagem, apresentando rachaduras com maiores comprimentos na secagem em estufa solar. Cueto (1997) verificou em seus ensaios alta incidência de rachaduras de topo, sendo o defeito mais significativo na secagem em estufa solar. Entretanto, diversos autores como Chudnoff et al. (1966), Yang (1980), Santini (1981) e Sattar (1987) verificaram que a secagem ao ar livre proporciona maiores índices de rachaduras de topo.

De acordo com Rietz e Page (1971), a exposição das pilhas de madeira, na secagem ao ar livre, a ação direta de raios solares provoca a incidência de defeitos, como as rachaduras de topo. No entanto, nesse estudo, devido à utilização de coberturas nas pilhas ao ar livre e o elevado teor de umidade final das tábuas secas ao ar livre favoreceram a tendência da secagem em estufa solar apresentar maior IRT.

Com relação às médias dos IRT, entre as espécies estudadas, resultantes da secagem em estufa solar, verifica-se que para as madeiras de *Eucalyptus tereticornis* e *Corymbia citriodora* as médias não diferiram entre si, sendo maiores que as verificadas para *Eucalyptus saligna*. Já, às médias do IRT, entre as espécies, resultantes da secagem ao ar livre, diferiram entre si, sendo os maiores valores encontrados para a espécie *Eucalyptus tereticornis* (Apêndice 4).

Uma solução para reduzir o IRT nas tábuas expostas à secagem em estufa solar seria pintar os topos das peças, desse modo a retirada de água torna-se mais lenta, reduzindo o gradiente de umidade entre o topo e o centro das tábuas (SIMPSON, 1991).

No Apêndice 5, pode-se observar a amplitude de variação dos índices de rachaduras de topo nas três espécies estudadas.

#### 4.5.2 Rachaduras de superfície

Da mesma forma que nas rachaduras de topo, as rachaduras de superfície são resultantes da presença de gradientes de umidade, nesse caso entre a superfície (mais seca) e a parte central (mais úmida) da tábua. Ocorrendo quando as tensões excedem a resistência da madeira à tração perpendicular às fibras (DENIG et al., 2000).

Na Tabela 9 são apresentados os percentuais de peças com defeito de rachaduras de superfície após o desdobro e após a secagem para as madeiras de *Eucalyptus tereticornis*, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*.

Tabela 9 – Percentual de peças com defeito de rachaduras de superfície em cada uma das espécies estudadas.

Espécie	Método	Após desdobro	Após secagem
		% peças com defeito	% peças com defeito
<i>E. tereticornis</i>	Ar livre	40,00	58,18
	Solar	23,64	67,27
<i>E. saligna</i>	Ar livre	5,45	16,36
	Solar	12,73	23,64
<i>C. citriodora</i>	Ar livre	20,00	80,00
	Solar	30,91	58,18

A madeira de *Eucalyptus saligna* apresentou o menor índice de rachaduras de superfície dentre as espécies analisadas, sendo verificada a mesma percentagem de peças defeituosas (10,91%) resultantes da secagem em estufa solar e ao ar livre.

Plumtre (1979), Williams (1982), Williams (1983) e Sattar (1987) verificaram, em seus estudos, uma melhor qualidade da madeira seca em estufa solar em comparação com a secagem ao ar livre, quando avaliado os defeitos de rachaduras superficiais. Para a madeira de *Corymbia citriodora* verificou-se essa tendência, sendo registrada maior percentagem de peças defeituosas resultantes da secagem ao ar livre (60%) em comparação ao constatado na estufa solar (27,27%).

Por sua vez, a madeira de *Eucalyptus tereticornis* apresentou menor percentagem de peças defeituosas resultante do processo de secagem ao ar livre, em comparação ao verificado na estufa solar, com valores de 18,18% e 43,63%, respectivamente.

Apesar das temperaturas iniciais ficarem abaixo de 45°C, limite máximo proposto por Vermaas (1995) para minimizar e/ou evitar a incidência de rachaduras na madeira, verificou-se elevados percentuais de peças defeituosas. No entanto, a presença de rachaduras de superfície nas madeiras ensaiadas não causou grandes prejuízos na qualidade da madeira, devido às pequenas dimensões. Além disso, após o condicionamento das madeiras dentro do prédio do LPF verificou-se, visualmente, uma redução das peças rachadas superficialmente.

A propensão de algumas espécies de eucalipto, como no caso do *Eucalyptus tereticornis* e *Corymbia citriodora* a presença de rachaduras de superfície, aliado ao gradiente de umidade, conforme citado anteriormente, podem ter sido os fatores determinantes para incidência desse defeito em elevados percentuais de tábuas. Rosso (2006), estudando secagem combinada (ar livre + convencional) de *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora*, confirma tal constatação, verificando nas duas espécies elevados percentuais de peças rachadas superficialmente após o final do processo. Com relação ao *Eucalyptus tereticornis*, Kabir e

Sattar (1995) citam que devido a sua alta massa específica a espécie torna-se muito suscetível ao aparecimento de rachaduras superficiais.

Haque (2002) realizando secagem em estufa solar de madeiras de *Eucalyptus pilularis* registrou que o tipo de defeito com maior degradação da madeira foi a rachadura superficial.

Uma possibilidade de redução do número de peças rachadas superficialmente é por meio do aplainamento das tábuas, antes de se processa a secagem. O aplainamento das tábuas elimina a marca dos dentes da serra os quais facilitam o surgimento das rachaduras (CUPPETT e CRAFT, 1972; CECH e PFAFF, 1977; SEVERO, 2000).

#### 4.5.3 Arqueamento

O arqueamento, caracterizado por ser uma curvatura ao longo do comprimento da peça de madeira, num plano paralelo à face, é causado pela diferença de contração longitudinal entre as laterais da tábua (MARTINS, 1988). Presença de lenhos diferentes na mesma peça, torna a madeira suscetível ao arqueamento.

A Tabela 10 apresenta a flecha média de arqueamento e o percentual de peças defeituosas, após o desdobro e a secagem para as madeiras de *Eucalyptus tereticornis*, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*.

Tabela 10 – Arqueamento médio e percentual de peças defeituosas nas três espécies estudadas.

Espécie	Método	Após desdobro		Após secagem		Diferença A médio <sup>1</sup>
		A médio	% defeito	A médio	% defeito	
<i>E. tereticornis</i>	Ar livre	2,88	20,00	3,13	30,91	0,25 <sup>A</sup>
	Solar	2,74	12,73	3,18	27,27	0,44 <sup>A</sup>
<i>E. saligna</i>	Ar livre	2,87	20,00	3,08	23,64	0,21 <sup>A</sup>
	Solar	3,26	23,64	3,67	30,91	0,41 <sup>A</sup>
<i>C. citriodora</i>	Ar livre	2,59	3,64	2,81	10,91	0,22 <sup>A</sup>
	Solar	2,83	16,36	3,02	25,45	0,19 <sup>A</sup>

em que: <sup>1</sup>= Flecha de arqueamento resultante do processo de secagem; Médias seguidas por letras iguais, dentro de cada espécie, não diferem significativamente entre si (LSD Fisher,  $p > 0,05$ ); A= flecha de arqueamento (mm/m).

Dentre as espécies, a madeira de *Eucalyptus tereticornis* foi a mais afetada, apresentando 10,91% de peças arqueadas ao final da secagem ao ar livre e 14,54% de peças arqueadas no fim do processo em estufa solar. Para a madeira de *Eucalyptus saligna*, o

percentual de peças arqueadas ao final do processo foi de 3,64 e 7,27%, secagem ao ar livre e em estufa solar. Por sua vez, *Corymbia citriodora* apresentou 7,27 e 9,09% de peças defeituosas ao final da secagem ao ar livre e em estufa solar, respectivamente.

Verifica-se para as três espécies que a secagem em estufa solar apresentou maiores percentagens de peças arqueadas. Bauer (2003), ao analisar o acréscimo da flecha de arqueamento em madeiras de *Eucalyptus grandis*, também verificou ao final da secagem que o arqueamento foi mais severo nas tábuas secas em estufa solar. Todavia, Santini (1981) verificou tendência contrária, sendo observada maior percentagem de peças arqueadas na secagem ao ar livre quando comparada à estufa solar.

A manifestação de peças arqueadas ao final da secagem é um dos defeitos mais problemáticos com relação ao seu controle, uma vez que durante a secagem as tábuas ficam dispostas sem qualquer restrição lateral que as impeça de trabalharem. Lumley e Choong (1981) citam que a presença de peças empenadas, nesse caso em especial o arqueamento, juntamente com as rachaduras, são os principais defeitos incidentes na madeira seca em estufa solar.

Segundo Lima (2005) para que o defeito de arqueamento possa ser reduzido no processo de secagem deve-se evitar o desdobro de toras que apresentem alguma excentricidade, dada pelo deslocamento de medula. Além disso, deve-se ter cuidados quanto à execução de cortes assimétricos devido ao mau posicionamento da tora no carrinho.

Apesar das maiores percentagens de peças defeituosas no processo de secagem em estufa solar, ao analisar as médias das flechas de arqueamento, não foram observadas diferenças significativas entre os métodos de secagem para as três espécies estudadas (Tabela 10 e Apêndice 6). No entanto, as médias das flechas de arqueamento para as espécies *Eucalyptus tereticornis* e *Eucalyptus saligna* apresentaram tendência de aumento na secagem em estufa solar quando comparadas à secagem ao ar livre. Por sua vez, a madeira de *Corymbia citriodora* teve comportamento contrário. Chen e Rosen (1979) também não verificaram diferença significativa para o defeito nas duas metodologias de secagem, apesar da qualidade da madeira ter sido um pouco superior na secagem ao ar livre.

As maiores médias das flechas de arqueamento e percentagem de peças defeituosas na secagem em estufa solar podem ter sido resultado da diferença de teor de umidade final em comparação com o processo ao ar livre. Visto que não foi registrada grande diferença entre as contrações radial e tangencial nas duas metodologias de secagem (Tabela 7), que é considerada uma das principais fontes de peças empenadas (RASMUSSEN, 1961; CECH e PFAFF, 1977).

Com relação às médias das flechas de arqueamento, entre as espécies estudadas, resultantes da secagem em estufa solar, verifica-se que não houve diferença significativa. Resultado semelhante foi observado para as espécies submetidas à secagem ao ar livre. (Apêndice 7).

O defeito de arqueamento resultante de ambas as secagens não chegou a ser preocupante, uma vez que as percentagens de peças defeituosas ficaram abaixo de 15% do total. O Apêndice 8 apresenta a amplitude de variação dos dados de arqueamento nas três espécies estudadas.

#### 4.5.4 Encanoamento

O defeito de encanoamento não foi verificado entre as fases de avaliação e os métodos de secagem em que foi submetida cada espécie. Os valores ficaram abaixo do determinado pela Norma Brasileira de Classificação de Madeira Serrada (BRASIL, 1983), de modo que não prejudicaram a qualidade da madeira.

De acordo com Galvão e Jankowsky (1985), o encanoamento pode ser resultante da diferença entre as contrações transversais e pela exposição de apenas uma face da tábua à secagem.

No entanto, o correto empilhamento, dispondo peças tangenciais na parte de baixo da carga, a utilização de placas de concreto, com função de restrição mecânica, a secagem lenta e uniforme e a utilização de tábuas com largura inferior a 25 cm proporcionaram a ausência desse defeito nas duas metodologias de secagem. Dentro do item empilhamento, é importante ressaltar que a uniformidade nas dimensões das tábuas reduz a probabilidade de empenamentos, como o encanoamento. Peças com dimensões fora do padrão prejudicam o empilhamento, fazendo com que algumas peças fiquem livres para trabalharem (BOONE et al., 1992). No Apêndice 9, verifica-se que as tábuas das três espécies ensaiadas apresentaram pequena variação nas suas dimensões.

A pequena diferença entre as contrações radial e tangencial e a baixa porcentagem do fator de anisotropia, conforme discutido anteriormente, também favoreceu a minimização dos seus efeitos em peças encanoadas.

De acordo com Ponce (1995), o defeito de encanoamento é uma problemática na secagem de madeiras de eucalipto, principalmente quando realizada em condições severas e de altas temperaturas. A utilização de baixas temperaturas, como no caso desse estudo, propicia uma redução da suscetibilidade da madeira de eucalipto em apresentar esse defeito.

Silva et al. (1997), Bauer (2003) e Rosso (2006) ao realizarem secagem de madeiras de eucalipto em condições suaves também não verificaram incidência de encanoamento.

#### 4.5.5 Encurvamento

De acordo com Brandão (1989), a presença de lenhos anormais e peças orientadas tangencialmente favorecem o encurvamento da madeira.

A flecha média de encurvamento e o percentual de peças com defeito, após o desdobro e após a secagem, para as madeiras de *Eucalyptus tereticornis*, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna* pode ser observada na Tabela 11.

Tabela 11 – Encurvamento médio e percentual de peças defeituosas nas três espécies estudadas.

Espécie	Método	Após desdobro		Após secagem		Diferença E médio <sup>1</sup>
		E médio	% defeito	E Médio	% defeito	
<i>E. tereticornis</i>	Ar livre	2,06	9,09	1,57	1,82	- 0,49 <sup>A</sup>
	Solar	1,94	5,45	1,50	0,00	- 0,44 <sup>A</sup>
<i>E. saligna</i>	Ar livre	1,82	1,82	1,67	0,00	- 0,15 <sup>A</sup>
	Solar	1,49	1,82	1,53	0,00	0,04 <sup>A</sup>
<i>C. citriodora</i>	Ar livre	2,01	1,82	2,03	0,00	0,02 <sup>A</sup>
	Solar	2,08	1,82	1,77	1,82	- 0,31 <sup>A</sup>

em que: <sup>1</sup>= Flecha de encurvamento resultante do processo de secagem; Médias seguidas por letras iguais, dentro de cada espécie, não diferem significativamente entre si (LSD Fisher, p > 0,05); E= flecha de encurvamento mm/m).

Os dados médios das flechas de encurvamento das três espécies florestais apresentaram tendência de redução de seus valores ao final da secagem, exceto na secagem em estufa solar de *Eucalyptus saligna* e na secagem ao ar livre de *Corymbia citriodora*. Ao analisar as médias das flechas de encurvamento resultantes dos processos de secagem para cada espécie, não se verifica diferença significativa ao nível 5% de probabilidade de erro (Tabela 11 e Apêndice 10).

Chen e Rosen (1979) não verificaram grande diferença na flecha de encurvamento entre a secagem ao ar livre e solar, no entanto a flecha foi maior para o processo realizado em estufa solar.



A percentagem de peças defeituosas também manifestou redução ou estabilização dos valores ao final da secagem, em algumas cargas o defeito foi eliminado, em comparação à verificação realizada após o desdobro.

Segundo Simpson (1991) e Denig et al. (2000), o encurvamento não é um defeito problemático na madeira, uma vez que o mesmo pode ser facilmente eliminado durante o processo de empilhamento da carga de madeira. De modo 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 e/ou colocação de peças defeituosas na parte de baixo da pilha, conforme realizado neste estudo, possibilita-se a redução significativa do encurvamento (BEKELE, 1995; CINIGLIO, 1998).

A maior percentagem inicial de tábuas de *Eucalyptus tereticornis* com defeito de encurvamento pode ter sido devido as fortes tensões de crescimento, as quais afetam a qualidade da madeira resultante do desdobro (TRUGILHO, 2005).

Com relação às médias das flechas de encurvamento, entre as espécies estudadas, resultantes da secagem em estufa solar, verifica-se que não houve diferença significativa. Resultado semelhante foi observado para as espécies submetidas à secagem ao ar livre. (Apêndice 11).

Sthör (1977) estudando a secagem da madeira de *Eucalyptus grandis*, cita que o refilo das bordas em peças serradas antes da secagem, com o objetivo de retirada do alburno, produz peças mais estáveis, e conseqüentemente menor incidência de empenos como o encurvamento.

O Apêndice 12 apresenta a amplitude de variação dos dados de encurvamento nas três espécies estudadas.

#### 4.5.6 Colapso

Nenhuma das peças de madeira de *Eucalyptus tereticornis*, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna* submetidas à secagem ao ar livre e estufa solar desenvolveram colapso. Chen et al. (1982) e Bauer (2003) analisando a secagem de *Liriodendron tulipifera* e *Eucalyptus grandis*, respectivamente, também não verificaram a incidência de colapso ao final da secagem, tanto em estufa solar quanto ao ar livre.

Em geral, as madeiras refratárias à secagem, como no caso do eucalipto, apresentam tendência de manifestarem a presença de peças colapsadas (CAMPBELL e HARTLEY, 1988). No entanto, a realização de processos de secagem suave, com retirada lenta do

conteúdo de umidade da madeira, acima do PSF, proporcionou a ausência do defeito de colapso nesse estudo.

De acordo com Santini e Tomaselli (1980), o fator limitante durante a secagem de madeiras propensas ao defeito de colapso, em geral, se deve a remoção da água livre, acima do PSF, presente nas cavidades celulares.

Alguns autores, como Ciniglio (1998), Vermaas (1995) e Andrade (2000) citam que uma forma de minimizar e/ou eliminar a presença de peças colapsadas é a de trabalhar com temperaturas iniciais de secagem abaixo de 45°C, essa condição deve ser mantida até a total retirada da água capilar. Posteriormente, pode-se elevar a temperatura. Apesar da secagem em estufa solar apresentar controle parcial das condições ambientais, e a secagem ao ar livre ser diretamente influenciada pelas variáveis climáticas, foi verificada temperaturas iniciais dentro do proposto pelos autores acima.

Além disso, a massa específica também influencia no colapso. Ponce (1995) afirma que as madeiras de eucalipto que apresentam maior tendência ao colapso são aquelas de média massa específica, enquanto que as espécies de alta e baixa massa específica apresentam pouca tendência ao colapso.

#### 4.5.7 Tensões de secagem

Na Tabela 12 é apresentada a classificação das tensões de secagem de cada madeira submetida aos processos de secagem. A avaliação foi realizada pelo teste de garfo, conforme descrito na metodologia, após a secagem e após o condicionamento em câmara climatizada por 24 horas.

Tabela 12 – Classificação das tensões de secagem (%) nas três espécies estudadas.

Espécie	Método	Após secagem			Após condicionamento - 24 h		
		Forte	Suave	Normal	Forte	Suave	Normal
<i>E. tereticornis</i>	Ar livre	36,36	63,64	0,00	100	0,00	0,00
	Solar	54,55	45,45	0,00	100	0,00	0,00
<i>E. saligna</i>	Ar livre	0,00	80,00	20,00	96,36	3,64	0,00
	Solar	7,27	61,82	30,91	100	0,00	0,00
<i>C. citriodora</i>	Ar livre	0,00	40,00	60,00	100	0,00	0,00
	Solar	63,64	30,91	5,45	96,36	1,82	1,82

Verifica-se que, após a secagem, as tensões de secagem foram menos severas nas madeiras que foram submetidas ao processo ao ar livre em comparação com as expostas a secagem em estufa solar. A diferença entre os teores de umidade final em cada método de secagem propiciou esse comportamento. Entretanto, após o condicionamento de 24 horas, as madeiras de *Eucalyptus tereticornis*, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna* apresentaram, em sua maioria, 100% de peças com tensões fortes. No entanto, Viehbeck (1999) cita que durante a secagem em estufa solar, a madeira apresenta redução dos gradientes de umidade e consequente alívio das tensões de secagem. Isso se deve ao condicionamento que a madeira é exposta em períodos noturnos, quando a água deixa de evaporar da superfície ocorrendo apenas a movimentação da água do interior para a superfície.

Ciniglio (1998) afirma que o endurecimento superficial pode ser definido como sendo uma condição existente na madeira resultante dos esforços de secagem, os quais são causados devido à secagem não uniforme e acelerada. De acordo com Casin (1967), a provável explicação, para a presença de peças com endurecimento superficial, neste estudo, se deve ao fato da ausência de tratamento de condicionamento ao final da secagem, como ocorre na secagem em estufa convencional. Visto que as madeiras de eucalipto submetidas à secagem não eram provenientes de povoamentos de curta duração, rápido crescimento e tão pouco apresentavam tábuas espessas, condições que influem na propensão ao surgimento de tensões de secagem (EDWARDS, 1973).

A presença de tábuas com endurecimento superficial após a secagem em estufa solar também foi verificada por diversos autores (CASIN 1967; SANTINI, 1981; LUMLEY e CHOONG, 1981; BAUER, 2003). Entretanto Kennedy (1984), não verificou problemas significativos quanto ao endurecimento superficial da madeira de *Callitis columellaris* seca em estufa solar. Comportamento semelhante também foi verificado por Steinmann et al. (1980b), que atribui a minimização dos efeitos do endurecimento superficial ao funcionamento contínuo dos ventiladores.

## 5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados discutidos acerca da secagem em estufa solar e ao ar livre das madeiras de *Eucalyptus tereticornis*, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*, pode-se concluir que:

- O tempo de secagem em estufa solar, para as três espécies estudadas, é inferior em relação ao verificado no processo ao ar livre. Apesar dos estudos terem sido realizados em período desfavorável, baixa insolação e radiação solar, a secagem em estufa solar apresentou taxas de secagem satisfatórias, semelhantes às observadas em secadores solares, mais sofisticados, espalhados pelo mundo.
- O secador solar é sensivelmente influenciado pelas horas de insolação e pelo nível de radiação solar. Mesmo quando as condições não são propícias à secagem ao ar livre, a estufa solar apresenta maiores temperaturas e menores índices de umidade relativa do ar e de equilíbrio. O bom isolamento da estufa, mediante o uso das chapas de isopor, compensado e de fibra, pintura interna na cor preta, utilização das paredes de tijolos e camada dupla de plástico PVC contribuiu para conservação do calor gerado e, conseqüente redução do tempo de secagem.
- A diferença de temperatura dentro e fora do secador solar apresenta uma boa correlação com a umidade da madeira. Na secagem das três espécies, verificaram-se maiores diferenças de temperatura com a redução do teor de umidade da madeira.
- A madeira seca, tanto na estufa solar quanto ao ar livre, apresenta boa qualidade, não sendo observada a incidência de defeitos como encanoamento e colapso. Além disso, o adequado processo de empilhamento e secagem proporcionou minimização dos defeitos do tipo encurvamento.
- Apesar da maior ocorrência de peças arqueadas na secagem em estufa solar, a diferença entre as flechas de arqueamento, nos dois métodos de secagem, foram mínimas.

- A incidência de rachaduras superficiais e de topo apresentam comportamentos distintos, sendo verificada maior incidência de rachaduras de topo nas madeiras secas em estufa solar, enquanto que as rachaduras superficiais foram mais frequentes na secagem ao ar livre.

A partir dos resultados obtidos recomenda-se para futuros estudos:

- Abordagem do comportamento da secagem em estufa solar, com relação a teor de umidade final, tempo de secagem e qualidade da madeira, em diferentes épocas do ano.

- Avaliar o uso de um sistema de condicionamento e uniformização do teor de umidade final da madeira, de modo a reduzir a incidência de endurecimento superficial nas tábuas, conforme visualizado nesse trabalho.

- Realizar ensaios de secagem em estufa solar para outras madeiras de interesse comercial, principalmente as refratárias à secagem, como no caso do eucalipto.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIMCI. **Defeitos de secagem de serrados e lâminas de madeira**. Artigo Técnico n. 28. 2004. 5p.
- ALEON, D. The use of solar energy in wood drying. In: ENERGY ASPECTS OF THE FOREST INDUSTRIES, 1979. **Proceedings...UNECE**, 1979. p. 359-370.
- ANDRADE, A. **Indicação de programas para secagem convencional de madeiras**. 2000. 72f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia da Madeira) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.
- ARMSTRONG, J.P. **Wood Industry Fact Sheet**. West Virginia University, Extension Service, <http://www.wvu.edu/~agexten/forestry/wooddr1.pdf>, 13.11.2008.
- BANKS, C.H. **Solar drying of timber – a development study**. Pretoria: CSIR Timber Research Unit, 1969. 27 p.
- BAUER, K. **Development and optimisation of a low-temperature drying schedule for *Eucalyptus grandis* (Hill) ex Maiden in a solar-assisted timber dryer**. 2003. 178f. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias) – Fakultät Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim, Hohenheim, 2003
- BENITEZ, F. et al. Secadero solar de maderas complementado con gasogeno de residuos de aserrado: escala semiindustrial. **Revista de Ciencia y Tecnologia de la Universidad Tecnologica Nacional**, v. 2, n. 4, p. 35-42, 1997.
- BEKELE, T. Degradation of boards of *Eucalyptus globulus* Labill. and *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. during air drying. **Holz als Roh und Werkstoff**, v. 53 n. 6, p. 407-412, 1995.
- BOND, B. **Design and Operation of a Solar-Heated Dry Kiln**. Virginia Tech. 2006. 10 p
- BOIS, P.J. **Constructing and operating a small solar-heated lumber dryer**. Madison: Forest Products Utilization: Technical Report n. 7. USDA Forest Service, 1977. 12 p.
- BOONE, R. et al. **Quality drying of hardwood lumber**. Gen. Tech. Rep. FPL-IMP-GTR-1. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1992, 58 p.
- BRAMHALL, G.; WELLWOOD, R.W. **Kiln drying of western Canadian lumber**. Vancouver: Fisheries and Environment Canada/Environmental Management Service, 1976. 112 p.
- BRANDÃO, A.T.O. **Determinação de metodologia para a indicação de programas de secagem de madeiras**. 1989. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.

BRASIL. **Norma para classificação de madeira serrada de folhosas**. Brasília: Ministério da Agricultura, IBDF, Laboratório de Produtos Florestais, 1983. 67 p.

BRENNAN, L.J. et al. Predying in Australia. **Australian Timber Journal**, v. 32, n. 11, p. 360-369, 1968.

BROWN, H.P.; PANSHIN, A.J.; FORSAIT, C.C. **Textbook of wood technology**. New York: McGraw-Hill, 1952. v. 2, 783 p.

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

CASIN, R.F. **Solar dryer for lumber**. Philippines: For. Prod. Res. Inst., Technical Note, n.76, 1967. 3p.

CASIN, R.F. et al. Solar drying of Apitong, Narra, Red Luan and Tanquile. **The Philippine Lumberman**, v. 15, n. 4, p. 23-30, 1969.

CECH, M.Y.; PFAFF, F. **Kiln operator's manual of Eastern Canada**. Ontario: Eastern Forest Products Laboratory, 1977. 189 p.

CHEN, P.Y.S. et al. Pilot plant studies of solar and solar-dehumidification lumber drying. In: 15<sup>th</sup> INTERSOCIETY ENERGY CONVERSION ENGINEERING CONFERENCE, 1980, Seattle. **Proceedings...** Seattle: IECEC, 1980. p. 18-22.

CHEN, P.Y.S. et al. Experimental solar-dehumidification kiln for lumber drying. **Forest Products Journal**, v. 32, n. 9, p. 35-41, 1982.

CHEN, P.Y.S.; ROSEN, H.N. Drying yellow-poplar in a highly efficient solar kiln. In: 30<sup>th</sup> Annual Western Dry Kiln Clubs. **Proceedings...** 1979. p. 23-32.

CHMIELEWSKI, W. et al. Untersuchungen über die Solartrocknung von Holz. **Holzindustrie**, n. 2, p. 40-42, 1982.

CHUDNOFF, M. et al. **Solar drying of tropical hardwoods**. USDA: Forest Service Institute of Tropical Forestry Research, Paper ITF-2. (Puerto Rico), 1966. 26 p.

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

CUETO, E.M.P. Diseño y ensayo de un secador solar para madera. **Madera y Bosques**, v. 3, n. 2, p. 13-28, 1997.

CUPPETT, D.G.; CRAFT, E.P. **Kiln-drying of pre-surfaced 4/4 appalachion OAK**. Forest Products Journal, v. 22, n. 6, p. 36-41, 1972.

CUPPETT, D.G.; CRAFT, E.P. **Low-temperature forced-air drying of Appalachian hardwoods**. USDA Forest Service Northeast, For. Exp. Station Research Paper, NE-328. 10p. 1975.

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, 2000. 138 p.

DESCH, H.E.; DINWOODIE, J.M. **Timber: structure, properties, conversion and use**. 7 ed. London: Macmillan Press Ltd., 1996. 306p.

DURLO, M.A. Relação água-madeira. In: I SEMINÁRIO SOBRE SECAGEM DE MADEIRA, 1., 1992, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM/CEPEF/FATEC, 1992. p. 35-46.

EDWARDS, D.W. Defects of fast-grown eucalypts in New South Wales. In: IUFRO MEETINGS DIVISION, 5, Pretoria, 1973, **Proceedings...** Pretoria, 1973. v. 2, p. 256-70.

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

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

GOUGH, D.K. **The design and operation of a solar timber kiln**. Suva: Fiji Timbers and their uses n. 67, Department of Forestry, 1977. 17 p.

GOUGH, D.K. **Timber seasoning in a solar kiln**. Technical paper n. 24. Department of Forestry, Queensland. 6p. 1981.

GUENEAU, P. An experiment on solar drying of wood. **Bois Forest Tropical**, v.131, p. 69-78, 1970.

HAQUE, M.N. **Modelling of solar kilns and the development of an optimised schedule for drying hardwood timber**. 2002. 354f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – University of Sidney, Sidney, 2002.

HART, C.A. **The drying of wood**. Raleigh: North Carolina Agricultural Extension Service, 1966. 24 p.

HART, C.A.; DARWIN JR., W.M. The slow drying rate of white oak. **Wood Science**, v. 4, n. 1, p. 46-54, 1971

HILDEBRAND, R. **Kiln drying of sawn timber**. Berlin: Maschinenbau GmbH, 1970. 198 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. **Métodos de ensaios adotados no IPT para o estudo de madeiras nacionais: tabelas de resultados obtidos para madeiras nacionais, nomenclatura das madeiras nacionais**. 2.ed. São Paulo: 1956. 62 p. (Boletim Técnico, 31).

JANKOWSKY, I.P. **Fundamentos de secagem de madeiras**. Piracicaba: n.10, 1990. 13p. (Documentos Florestais).



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

JANKOWSKY, I.P. Secagem de madeira de reflorestamento: técnica e equipamentos. In: SEMINÁRIO SOBRE PROCESSAMENTO E UTILIZAÇÃO DE MADEIRAS DE REFLORESTAMENTO – SEMADER, 4., Curitiba, 1996. **Anais...** Curitiba: ABPM, 1996. p. 107-117.

JOHNSON, C.L. Wind-powered solar-heated lumber dryer. **Southern Lumberman**, v. 203, n. 2532, p. 41-44, 1961.

KABIR, M.F.; SATTAR, M.A. Strength properties and drying characteristics of Eucalyptus wood grown in Bangladesh. **Thai J. For.**, v. 14, p. 103-109, 1995.

KANAGAWA, Y. Perspectives of the vacuum drying of wood development. In: VACUUM DRYING OF WOOD'93 (INTERNATIONAL CONFERENCE ON WOOD DRYING). **Anais...** High Tratas, 1993. p. 7-11.

KEEY, R.B.; LANGRISH, T.A.G.; WALKER, J.C.F. **Kiln-Drying of Lumber**. Springer, Berlin. 326p. 2000.

KENNEDY, J. **Solar Kiln Seasoning of White Cypress Pine**. Report n.15, Department of Forestry, Queensland. 7p. 1984.

KLITZKE, R.J. **Manual de secagem de madeira**. Caderno didático, Curitiba: UFPR, 2005. 119 p.

KOLLMANN, F.F.P. **Tecnología de la madera y sus aplicaciones**. 2 ed. Madrid: Gráficas Reunidas, 1959. 675p.

KOLLMANN, F.F.P.; CÔTÉ Jr., W.A. **Principles of wood science and technology**. New York, Springer-Verlag, 1968. 592 p.

KUMAR, S. Utilization of solar energy in India. **Forest Products Journal**, v.31, n.9, p. 10-12, 1981.

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.

LIMA, J.T. Deformações residuais longitudinais decorrentes de tensões de crescimento em eucaliptos e suas associações com outras propriedades. **Revista Árvore**, v. 28, n. 1, p. 107-116, 2004.

LEMPELIUS, J. Neues Vakuum Trocknungssystem für Schnittholz hat Erfolg. **Holz Zentralblatt**, v. 30, p. 430-432, 1990.

LUMLEY, T.G.; CHOONG, E.T. Technical and economic characteristics of two solar kiln designs. **Forest Products Journal**, v. 29, n. 7, p. 49-56, 1979.

LUMLEY, T.G.; CHOONG, E.T. **Solar drying of wood in Louisiana**. Agricultural Experiment Station Bulletin n. 732. Louisiana State University (Baton Rouge). 55p. 1981.

MALAN, F.S. Eucalyptus improvement for lumber production. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, 1995, São Paulo. **Anais...** Piracicaba, SP: IPEF/IPT, 1995. p1-19.

MALDONADO, E.D.; PECK, E.C. Drying by solar radiation in Puerto Rico. **Forest Products Journal**, v. 12, n. 10, p. 487-488, 1962.

MARQUES, M.H.B. **Agrupamento de 41 espécies de madeiras da Amazônia para secagem baseado em características anatômicas e físicas**. 2008. 125f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

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

McCORMICK, P.O. Solar heating system for kiln drying lumber. **Sunworld**, v. 4, n. 6, p. 204-207, 1980.

McMILLEN, J.M. Drying stress in red oak. **Forest Products Journal**, v. 5, n.1, p. 71-76, 1955.

MENDES, A.S. **Utilização de coletor solar parabólico na secagem da madeira**. 1985. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1985.

MORAES-DUZAT, R.; BARBOSA, A.P.; VETTER, R. O secador solar do INPA – uma alternativa econômica para secar madeira In: 3º ENC. ENERG. MEIO RURAL. **Anais...** 2000, 7p.

NOCK, H.P.; RICHTER, H.G.; BURGER, L.M. **Tecnologia da madeira**. Curitiba: Departamento de Engenharia e Tecnologias Rurais, Universidade Federal do Paraná, 1975. 216 p.

NOVES, H.A.; SECO, J.I.F.G. Solar drying of sawn lumber in Spain. **Holz als Roh und Werkstoff**, v. 48, n. 5, p. 173-178, 1990.

OLIVEIRA, J.T.S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. 1998. 429 f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

OLIVEIRA, L.; SKAAR, C.; WENGERT, E. Solar and air lumber drying during winter in Virginia. **Forest Products Journal**, v. 32, n. 12, p. 37-44, 1982.

PECK, E.C. Drying 4/4 red oak by solar heat. **Forest Products Journal**, v. 12, n. 3, p.103-107, 1962.

PLUMPTRE, R.A. The design and operation of a small solar seasoning kiln on the Equator in Uganda. **Commonwealth Forestry Review**, v. 46, n. 4, p. 298-309, 1967.

PLUMPTRE, R.A. Simple solar heated timber dryers: design, performance and commercial viability. **Commonwealth Forestry Review**, v. 58, n. 4, p.243-251, 1979.

PONCE, R.H. Madeira serrada de eucalipto: desafios e perspectivas In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, São Paulo, 1995. **Anais...** Piracicaba: IPEF/IPT, 1995. p. 50-58.

PONCE, R.H.; WATAI, L.T. **Manual de secagem da madeira**. São Paulo: IPT, 1985. 72 p.

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: United States Department of Agriculture - USDA, 1961. 197 p.

READ, W.R.; CHODA, A.; COPPER, P.I. A solar timber kiln. **Solar Energy**, v. 15, p. 309-316, 1974.

REUSS, M. et al. Modelling and experimental investigation of a pilot plant for wood drying. **Solar Energy**, v. 59, n. 4/6, p. 259-270, 1997.

RIETZ, R.C.; PAGE, R.H. **Air drying of lumber: a guide to industry practices**. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 1971. 110 p. (Agriculture handbook, n. 402).

ROBBINS, A.M. **Solar lumber kilns: design ideas**. New Mexico Energy Research and Development Institute, University of New Mexico (Albuquerque). 17p. 1983.

RODRÍGUEZ, L.E.S.; CARDEÑA, M.A.C.; AHUMADA, I.G. Diseño y operación de una estufa solar para secar madera. **Ingeniería Revista Académica**, v. 7, n. 3, p. 35-48, 2003.

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

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

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

SANTINI, E.J. Umidade de equilíbrio para algumas cidades do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO FLORESTAL ESTADUAL, 5, 1984, Nova Prata. **Anais...** Nova Prata, 1984. p.828-840.

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, 1992. p. 47-59.

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**, v. 12, n. 2, p. 99-106, 2002.

SANTINI, E.J.; TOMASELLI, I. **Colapso na madeira e algumas experiências brasileiras**. Curitiba: FUPEF, 1980, 21p. (Série Técnica, n.3).

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

SATTAR, M.A. Comparative studies of wood seasoning with a special reference to solar drying. **Bano Biggyan Patrica**, v. 16, n. 1/2, p. 30-42, 1987.

SATTAR, M.A. Solar drying of timber - a review. **Holz als Roh und Werkstoff**, v. 51, p. 409-416, 1993.

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

SHARMA, S.N. Solar timber drying. In: Seminar on Industrial Application of solar energy, Madras, June/1975. **Proceedings...** 6p.

SHARMA, S.N.; NATH, P.; BALI, B.I. A solar timber seasoning kiln. **Journal of the Timber Development Association India**, v. 18, n. 2, p. 10-26, 1974.

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

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

SILVA, J.C. **Estufa Solar: Uma Opção para Secagem de Madeira**. Revista da Madeira, v.1, p. 42-46, 2000.

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.

SIMPSON, W.T., Equilibrium moisture content prediction for wood. **Forest Products Journal**, v. 21, n. 5, 48-49, 1971.

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

- SKAAR, C. **Water in wood**. Syracuse: Syracuse University Press, 1972. 218 p.
- SKAAR, C. **Wood water relations**. New York: Springer-Verlag, 1988. 283 p.
- SMITH, R. Economic evaluation of drying softwood dimension lumber in a greenhouse type solar kiln. **Proceedings...** In: 32th Annual Proc. West. Dry Kiln Club. 1981. p.79-84.
- SMITH, W.B.; SMITH, A.; NEUHAUSER, E.F. Radio-frequency vacuum drying of red oak. **Proceedings...** In: PROFITABLE SOLUTIONS FOR QUALITY DRYING OF SOFTWOODS AND HARDWOODS. Charlotte, 1994. p. 101-108.
- STAMM, A.J. **Wood and cellulose science**. New York: Ronald Press, 1964. 509 p.
- STEINMANN, D.E., VERMAAS H.F. Control of equilibrium moisture content in a solar kiln. **Holz als Roh und Werkstoff**, v. 48, n. 4, p. 147-152, 1990.
- STEINMANN, D.E.; VERMAAS, H.F.; FORRER, J.B. **Microprocessor control of a solar kiln**. In: IUFRO Division V Conference, Wood drying papers, IUFRO, Oxford (Great Britain), 1980a, p. 71-96.
- STEINMAN, D.E. VERMAAS, H.F.; FORRER, J.B. Solar timber drying kilns: Part I: Review of previous system and control measures and description of an automated solar kiln. **Journal of the Institute and Wood Science** v.48, p.254-257, 1980b.
- STÖHR, H.P. The seasoning of South African grown *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus saligna*. **South African Forestry Journal**, n. 102, p. 61-66, 1977.
- STUMPP, E. Curso de secagem. In: SEMINÁRIO SOBRE SECAGEM DE MADEIRA, 1., 1992, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria, 1992. p.75-100.
- SUDAM/IPT. **Estudo sobre métodos de secagem de madeiras da Amazônia**. SUDAM (Belém). 77p. 1981.
- TOMASELLI, I. **Secagem de madeira**. Curitiba: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, 1979. 25 p.
- TOMASELLI, I.; KLITZKE, R.J. **Secagem da Madeira**. Fundação Hugo Simas: UFPR, Lages, 2000.
- TROXELL, H.E. Solar lumber drying in Colorado. **Proceedings...** In: 15th Annual Meeting of the West Coast Dry Kiln Clubs (Portland). 1963. p.61-66.
- TROXELL, H.E.; MULLER, L.A. Solar lumber drying in the Central Rocky Mountain Region. **Forest Products Journal**, v. 18, n. 1, p. 19-24, 1968.
- TRUGILHO, P.F. **Tensão de crescimento em árvores vivas de clones de *Eucalyptus* spp. e de *Eucalyptus dunnii* Maiden. e propriedades de sua madeira**. 2005. 167f. Tese (Pós-Doutorado em Engenharia Florestal) Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

TSCHERNITZ, J.L.; SIMPSON, W.T. Solar-heated forced-air, lumber dryer for tropical latitudes. **Solar Energy**, v. 22, p. 563-566, 1979.

TSCHERNITZ, J.L.; SIMPSON, W.T. **FPL Design for Lumber Dry Kiln Using Solar/Wood Energy in Tropical Latitudes**. Forest Products Laboratory, Research Paper n. 44, Forests Service, United States Department of Agriculture, Madison, Wisconsin (USA), 1985, p. 1-18.

VERMAAS, H.F. Drying of 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, São Paulo, 1995, **Anais...** Piracicaba: IPEF, 1995. p. 119-132.

VERMAAS, H.F. Drying of eucalypts with special reference to young, fat-grown plantation material. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA DE ALTA TECNOLOGIA E ENCONTRO SOBRE TECNOLOGIAS APROPRIADAS DE DESDOBRO, SECAGEM E UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO, 1., Belo Horizonte, 1998. **Anais...** Viçosa: SIF/UFV, 1998, p. 106-118.

VERMAAS, H.F. A review of drying technology for young fast grown eucalypts. In: THE FUTURE OF EUCALYPTS FOR WOOD PRODUCTS, Launceston, Tasmania, 2000. **Proceedings...** Tasmania: IUFRO, 2000. p.193-203.

VIEHBECK, P. **Lo básico del secado de madera con energía solar**. Eschborn: Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien – GATE, 1999. 49 p.

VITAL, B.R. Utilização de energia solar para secagem de madeira. **Revista Ceres**, v. 23, n.125, p. 1-10, 1976.

VITAL, B.R.; COLLOM, J.L. **Secador solar para madeira**. Viçosa: Imprensa Universitária da Universidade Federal de Viçosa, 1974. 34 p.

WALKER, J.C.F. et al. **Primary wood processing**. London: Chapman and Hall, 1993. 595 p.

WENGERT, E.M. **Improvements in solar dry kiln design**. U.S. Forest Service, Research Note FPL -0212, 1971. 10 p.

WENGERT, E.M. **Solar heated lumber dryer for the small business**. MT #20C Utilization and Marketing; Virginia Cooperative Extension Service; Blacksburg, VA. 1980.

WENGERT, E.M.; OLIVEIRA, L.C. **Solar heated, lumber dry kiln designs**. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia (USA), <http://www.woodweb.com>, 20.11.2008.

WENGERT, E.M. **New drying technology in the U.S.A**. In: Symposium on Forest Products Research International. Proceedings... CSIR: Conference Centre, Pretória, 1985, p. 8-12.

WILLIAMS, D.H. **The Use of Solar Energy for Timber Drying**: Progress Report after One Year's Operation of the Rotorua Experimental Unit. Rotorua: Forest Products Division, Project Record 184, NZ Forest Service, FRI, 1982. 25 p.

WILLIAMS, D.H. **The Use of Solar Energy for Timber Drying**: Progress Report on Year 2 of the Rotorua Experimental Unit. Rotorua: Forest Products Division, Project Record 261, NZ Forest Service, FRI, 1983. 9 p.

WISE, L.E.; JAHN, E.C. **Wood chemistry**. 2 ed. New York: Reinhold Publishing Corp., 1952. 1343 p.

YANG, K.C. Solar kiln performance at a high latitude, 48°N. **Forest Products Journal**, v. 30, n. 3, p. 37-40, 1980.

## 7 APÊNDICES

Apêndice 1 – Ilustrações esquemáticas do secador solar.

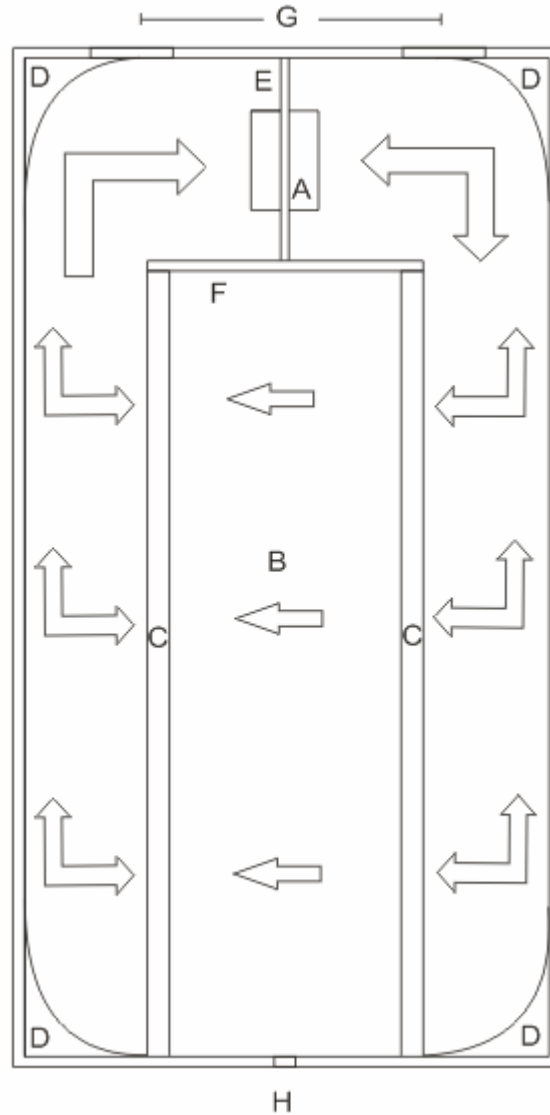


Figura 30 – Vista superior da estufa solar, com circulação de ar indicada pelo sentido das setas, e seus detalhes construtivos (A= ventilador; B= área de empilhamento; C= parede vazada de tijolo; D= defletor; E= suporte para fixação do ventilador; F= chapa compensada; G= janelas para renovação do ar; H= porta de carga e descarga).



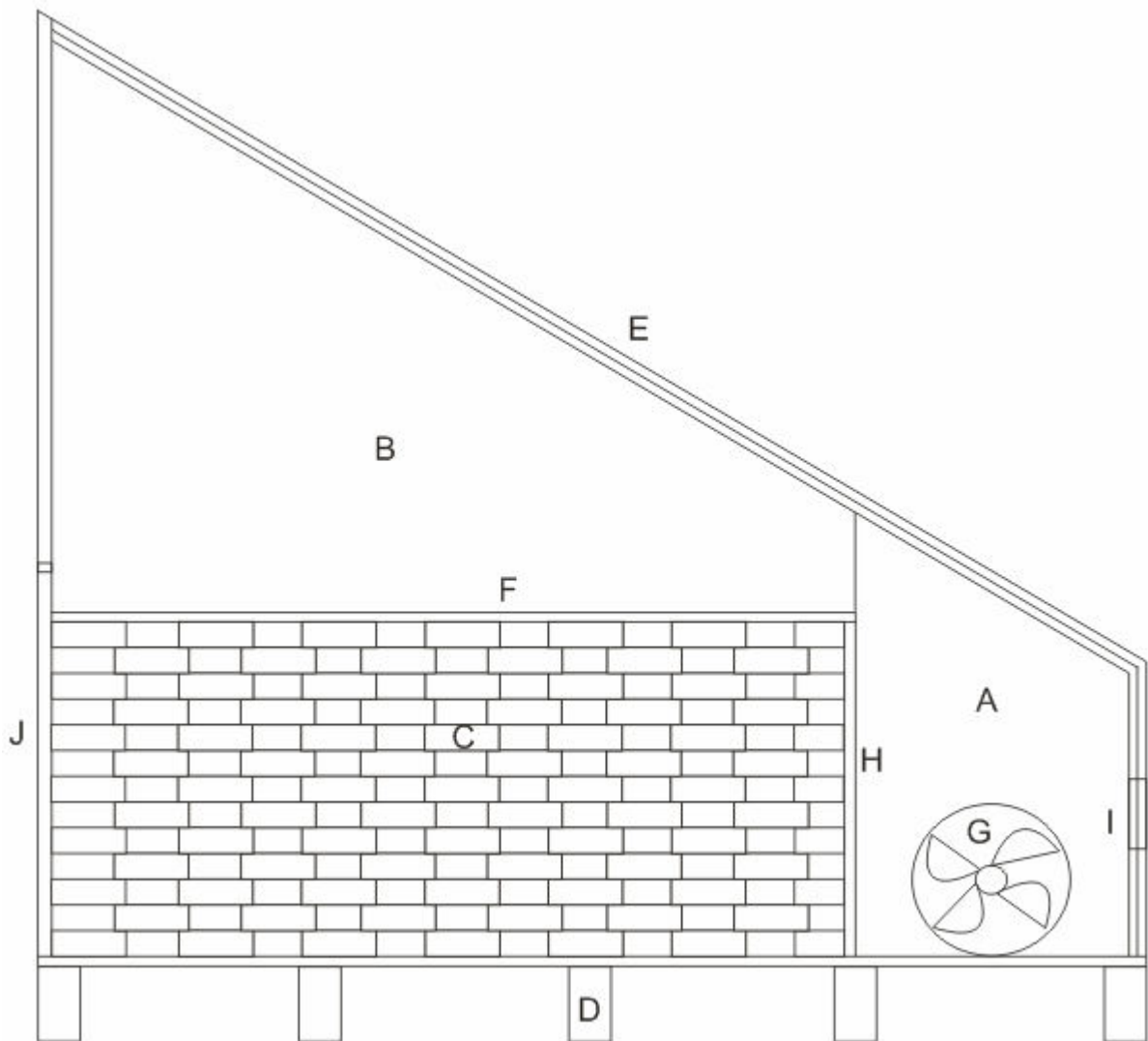


Figura 31 – Vista lateral da estufa solar e seus detalhes construtivos (A= suporte para fixação do ventilador; B= divisória de PVC; C= parede vazada de tijolo; D= fundação; E= camada dupla de PVC; F= chapa coletora; G= ventilador; H= chapa compensada; I= janelas para renovação do ar; J= porta de carga e descarga).

Apêndice 2 – Variação da temperatura máxima interna (Tmi) e externa (Tme), insolação diária (Ins) e radiação solar máxima (Rad) durante a secagem em estufa solar.

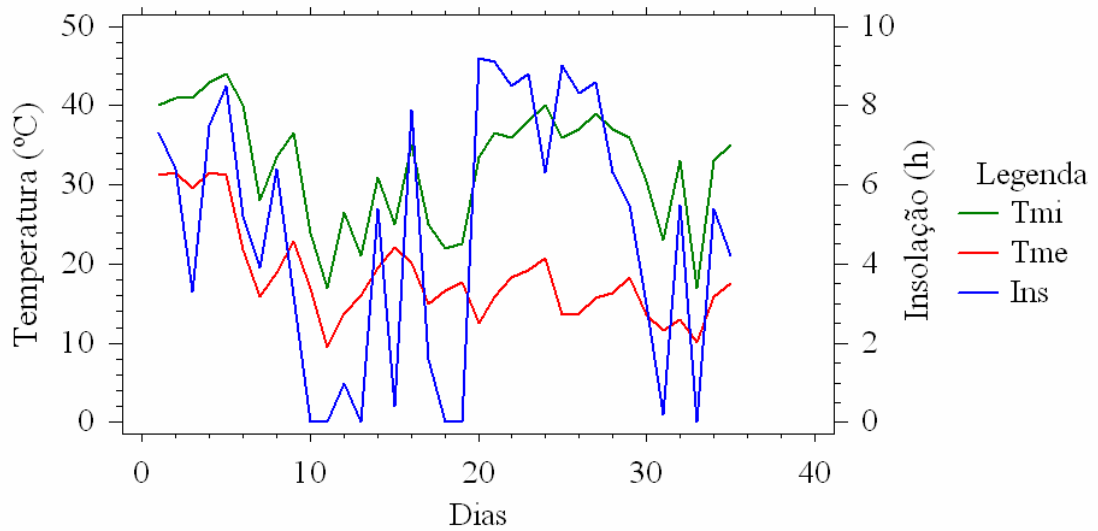


Figura 32 – Variação da temperatura máxima interna (Tmi) e externa (Tme), e insolação (Ins) diária durante o período de secagem da madeira de *Eucalyptus tereticornis*.

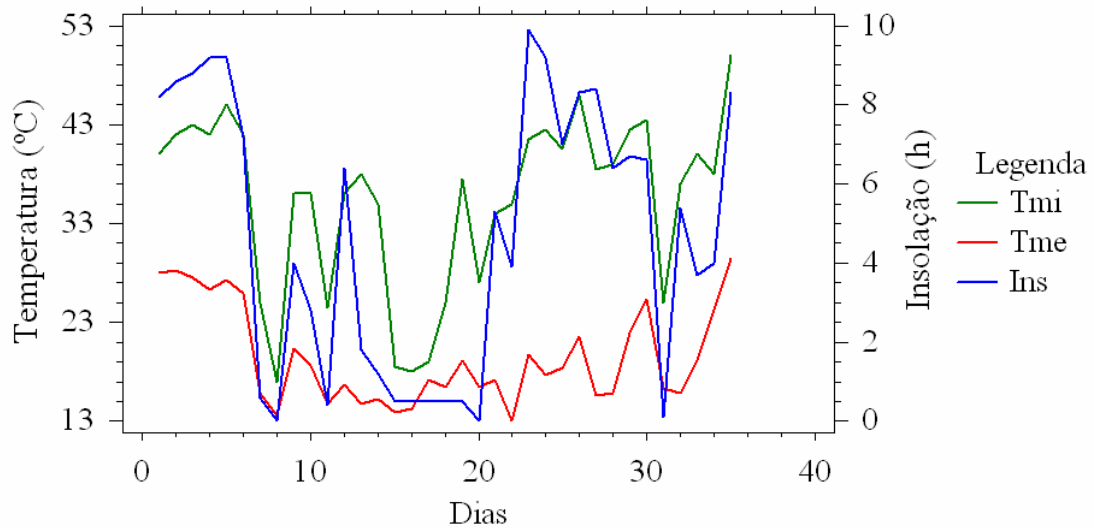


Figura 33 – Variação da temperatura máxima interna (Tmi) e externa (Tme), e insolação (Ins) diária durante o período de secagem da madeira de *Corymbia citriodora*.

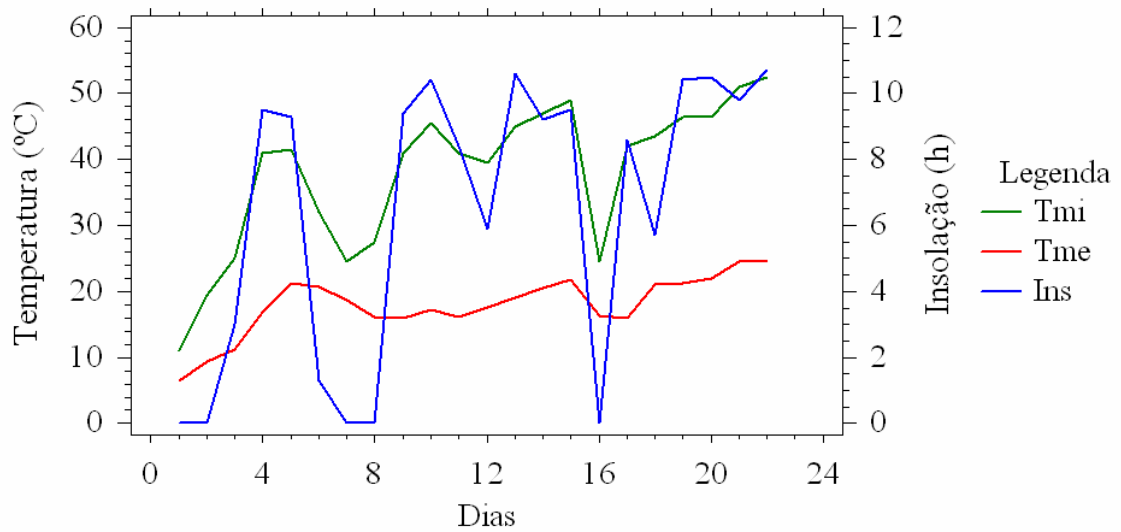


Figura 34 – Variação da temperatura máxima interna (Tmi) e externa (Tme), e insolação (Ins) diária durante o período de secagem da madeira de *Eucalyptus saligna*.

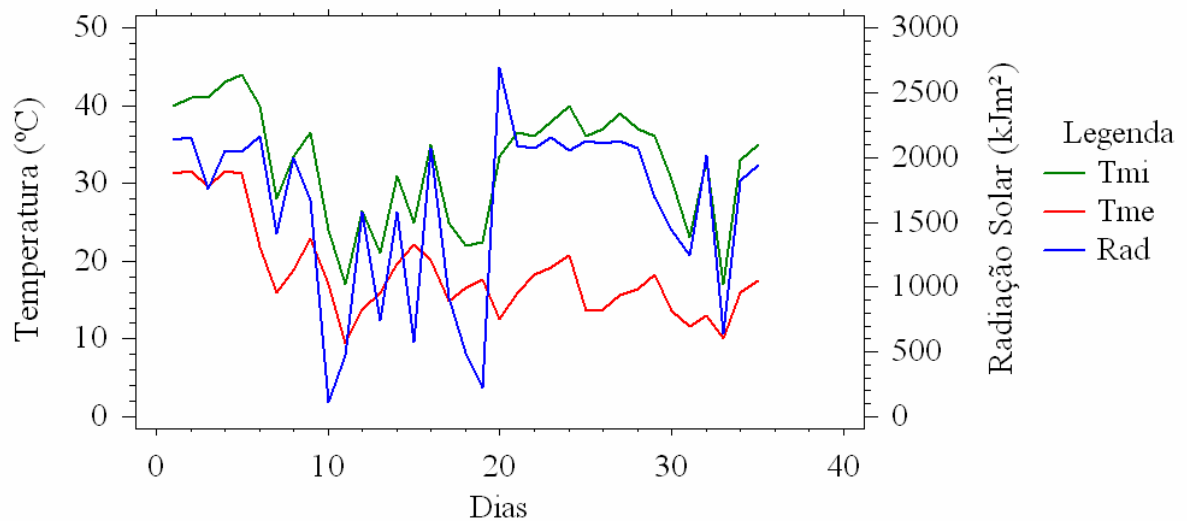


Figura 35 – Variação da temperatura máxima interna (Tmi) e externa (Tme), e radiação solar (Rad) diária durante o período de secagem da madeira de *Eucalyptus tereticornis*.

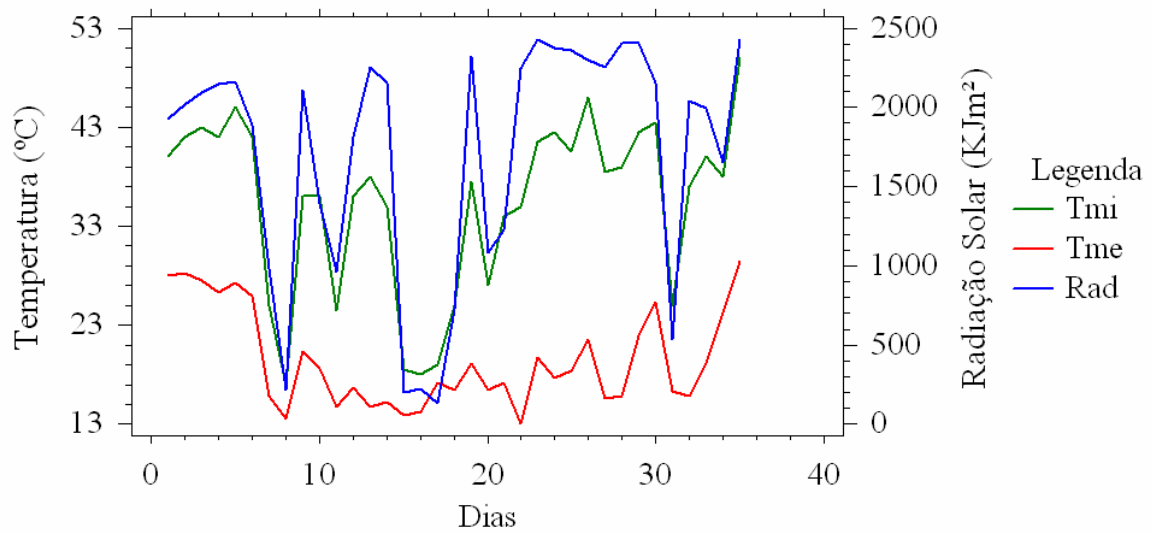


Figura 36 – Variação da temperatura máxima interna (Tmi) e externa (Tme), e radiação solar (Rad) diária durante o período de secagem da madeira de *Corymbia citriodora*.

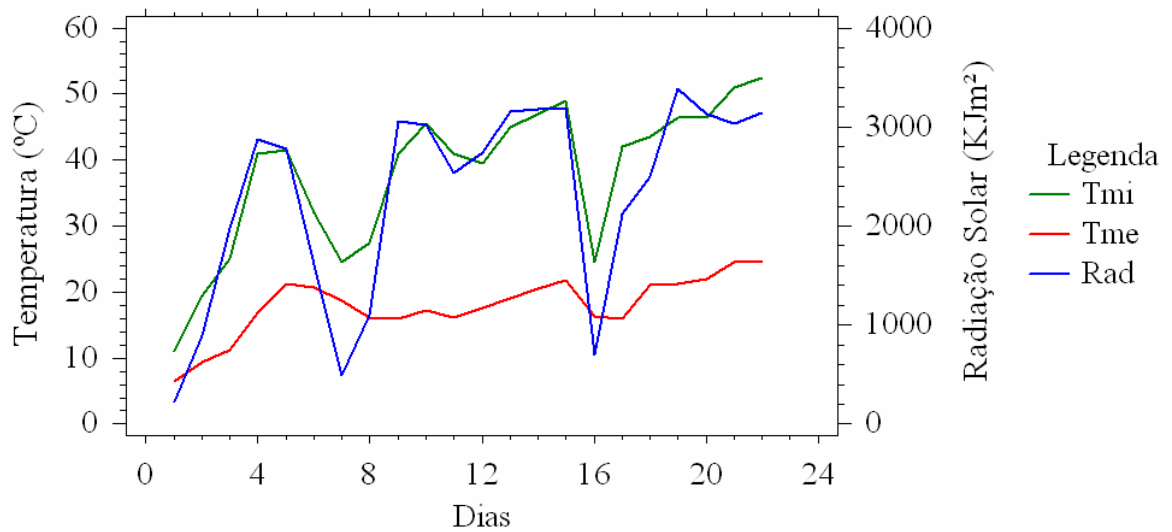


Figura 37 – Variação da temperatura máxima interna (Tmi) e externa (Tme), e radiação solar (Rad) diária durante o período de secagem da madeira de *Eucalyptus saligna*.

Apêndice 3 – Análise de variância para o índice de rachaduras de topo (%) nas três espécies estudadas em função do método de secagem.

Tabela 13 – Análise de variância para o índice de rachaduras de topo (%) na madeira de *Eucalyptus tereticornis* em função do método de secagem.

<b>FV</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>QM</b>	<b>F-cal.</b>	<b>P</b>
<i>Secagem</i>	14,2135	1	14,2135	0,91 <sup>NS</sup>	0,3434
<i>Resíduos</i>	1647,75	105	15,6929		
<i>Total</i>	1661,96	106			

em que: FV= fonte de variação; SQ= soma dos quadrados; GL= graus de liberdade; QM= quadrado médio; F-cal.= valor de F calculado; P= probabilidade de erro; <sup>NS</sup>= não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 14 – Análise de variância para o índice de rachaduras de topo (%) na madeira de *Corymbia citriodora* em função do método de secagem.

<b>FV</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>QM</b>	<b>F-cal.</b>	<b>P</b>
<i>Secagem</i>	2,08932	1	2,08932	0,20 <sup>NS</sup>	0,657
<i>Resíduos</i>	1137,91	108	10,5362		
<i>Total</i>	1140	109			

em que: FV= fonte de variação; SQ= soma dos quadrados; GL= graus de liberdade; QM= quadrado médio; F-cal.= valor de F calculado; P= probabilidade de erro; <sup>NS</sup>= não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 15 – Análise de variância para o índice de rachaduras de topo (%) na madeira de *Eucalyptus saligna* em função do método de secagem.

<b>FV</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>QM</b>	<b>F-cal.</b>	<b>P</b>
<i>Secagem</i>	0,81356	1	0,81356	0,06 <sup>NS</sup>	0,8137
<i>Resíduos</i>	1574,62	108	14,5798		
<i>Total</i>	1575,43	109			

em que: FV= fonte de variação; SQ= soma dos quadrados; GL= graus de liberdade; QM= quadrado médio; F-cal.= valor de F calculado; P= probabilidade de erro; <sup>NS</sup>= não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Apêndice 4 – Análise de variância para o índice de rachaduras de topo (%) nos dois métodos de secagem em função da espécie.

Tabela 16 – Análise de variância para o índice de rachaduras de topo (%) na secagem em estufa solar em função da espécie.

<b>FV</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>QM</b>	<b>F-cal.</b>	<b>P</b>
<i>Espécie</i>	148,643	2	74,3216	4,28*	0,0154
<i>Resíduos</i>	2795,38	161	17,3626		
<i>Total</i>	2944,02	163			

em que: FV= fonte de variação; SQ= soma dos quadrados; GL= graus de liberdade; QM= quadrado médio; F-cal.= valor de F calculado; P= probabilidade de erro; \*= significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 17 – Teste de médias para o índice de rachaduras de topo (%) na secagem em estufa solar em função da espécie.

<b>Espécie</b>	<b>Médias</b>
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	4,04 <sup>A</sup>
<i>Corymbia citriodora</i>	3,38 <sup>A</sup>
<i>Eucalyptus saligna</i>	1,77 <sup>B</sup>

em que: Médias seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si (LSD Fisher,  $p > 0,05$ ).

Tabela 18 – Análise de variância para o índice de rachaduras de topo (%) na secagem ao ar livre em função da espécie.

<b>FV</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>QM</b>	<b>F-cal.</b>	<b>P</b>
<i>Espécie</i>	270,771	2	135,385	13,84*	<0,01
<i>Resíduos</i>	1564,9	160	9,78064		
<i>Total</i>	1835,67	162			

em que: FV= fonte de variação; SQ= soma dos quadrados; GL= graus de liberdade; QM= quadrado médio; F-cal.= valor de F calculado; P= probabilidade de erro; \*= significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 19 – Teste de médias para o índice de rachaduras de topo (%) na secagem ao ar livre em função da espécie.

<b>Espécie</b>	<b>Médias</b>
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	4,76 <sup>A</sup>
<i>Corymbia citriodora</i>	3,11 <sup>B</sup>
<i>Eucalyptus saligna</i>	1,60 <sup>C</sup>

em que: Médias seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si (LSD Fisher,  $p > 0,05$ ).

Apêndice 5 – Amplitude de variação dos índices de rachaduras de topo nas três espécies estudadas.

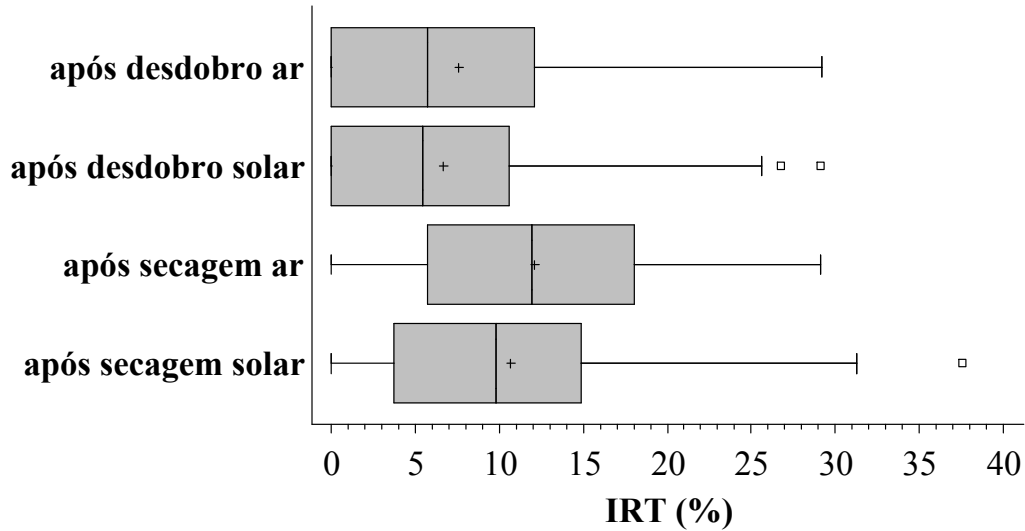


Figura 38 – Amplitude de variação dos índices de rachaduras de topo após o desdobro e após a secagem em estufa solar e ao ar livre de *Eucalyptus tereticornis*.

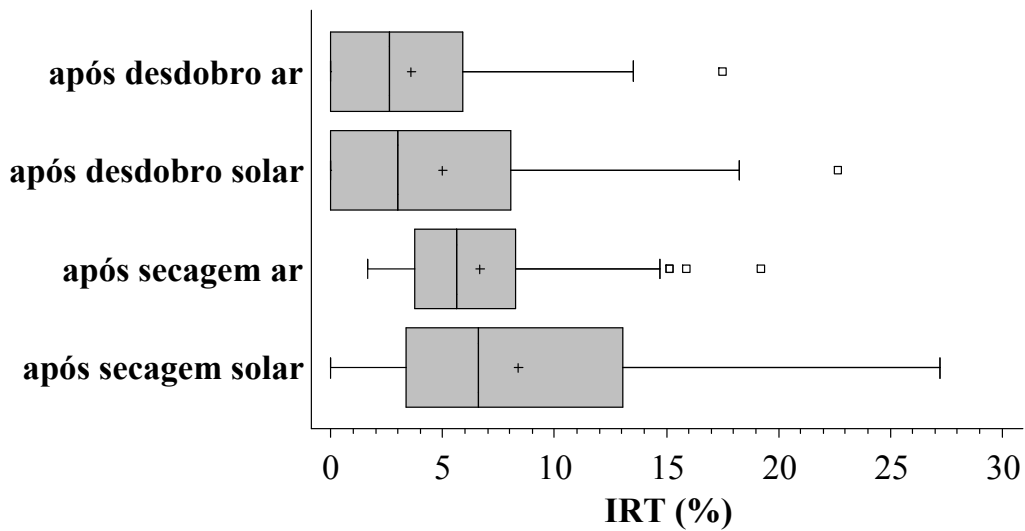


Figura 39 – Amplitude de variação dos índices de rachaduras de topo após o desdobro e após a secagem em estufa solar e ao ar livre de *Corymbia citriodora*.

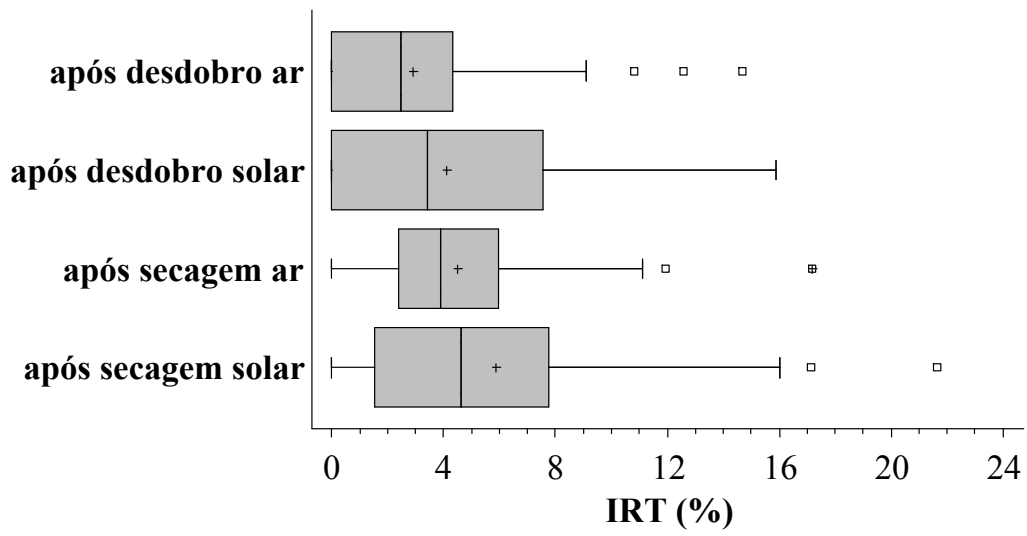


Figura 40 – Amplitude de variação dos índices de rachaduras de topo após o desdobro e após a secagem em estufa solar e ao ar livre de *Eucalyptus saligna*.



Apêndice 6 – Análise de variância para a flecha de arqueamento (mm/m) nas três espécies estudadas em função do método de secagem.

Tabela 20 – Análise de variância para a flecha de arqueamento (mm/m) na madeira de *Eucalyptus tereticornis* em função do método de secagem.

<b>FV</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>QM</b>	<b>F-cal.</b>	<b>P</b>
<i>Secagem</i>	1,08784	1	1,08784	0,83 <sup>NS</sup>	0,3651
<i>Resíduos</i>	142,028	108	1,31507		
<i>Total</i>	143,116	109			

em que: FV= fonte de variação; SQ= soma dos quadrados; GL= graus de liberdade; QM= quadrado médio; F-cal.= valor de F calculado; P= probabilidade de erro; <sup>NS</sup>= não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 21 – Análise de variância para a flecha de arqueamento (mm/m) na madeira de *Corymbia citriodora* em função do método de secagem.

<b>FV</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>QM</b>	<b>F-cal.</b>	<b>P</b>
<i>Secagem</i>	0,0226388	1	0,0226388	0,02 <sup>NS</sup>	0,8995
<i>Resíduos</i>	152,479	108	1,41184		
<i>Total</i>	152,502	109			

em que: FV= fonte de variação; SQ= soma dos quadrados; GL= graus de liberdade; QM= quadrado médio; F-cal.= valor de F calculado; P= probabilidade de erro; <sup>NS</sup>= não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 22 – Análise de variância para a flecha de arqueamento (mm/m) na madeira de *Eucalyptus saligna* em função do método de secagem.

<b>FV</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>QM</b>	<b>F-cal.</b>	<b>P</b>
<i>Secagem</i>	1,11121	1	1,11121	0,28 <sup>NS</sup>	0,5988
<i>Resíduos</i>	430,996	108	3,9907		
<i>Total</i>	432,107	109			

em que: FV= fonte de variação; SQ= soma dos quadrados; GL= graus de liberdade; QM= quadrado médio; F-cal.= valor de F calculado; P= probabilidade de erro; <sup>NS</sup>= não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Apêndice 7 – Análise de variância para a flecha de arqueamento (mm/m) nos dois métodos de secagem em função da espécie.

Tabela 23 – Análise de variância para a flecha de arqueamento (mm/m) na secagem em estufa solar em função da espécie.

<b>FV</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>QM</b>	<b>F-cal.</b>	<b>P</b>
<i>Espécie</i>	2,09812	2	1,04906	0,47 <sup>NS</sup>	0,6269
<i>Resíduos</i>	362,84	162	2,23975		
<i>Total</i>	364,938	164			

em que: FV= fonte de variação; SQ= soma dos quadrados; GL= graus de liberdade; QM= quadrado médio; F-cal.= valor de F calculado; P= probabilidade de erro; <sup>NS</sup>= significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 24 – Teste de médias para a flecha de arqueamento (mm/m) na secagem em estufa solar em função da espécie.

<b>Espécie</b>	<b>Médias</b>
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	0,44 <sup>A</sup>
<i>Corymbia citriodora</i>	0,19 <sup>A</sup>
<i>Eucalyptus saligna</i>	0,41 <sup>A</sup>

em que: Médias seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si (LSD Fisher,  $p > 0,05$ ).

Tabela 25 – Análise de variância para a flecha de arqueamento (mm/m) na secagem ao ar livre em função da espécie.

<b>FV</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>QM</b>	<b>F-cal.</b>	<b>P</b>
<i>Espécie</i>	0,048486	2	0,024243	0,01 <sup>NS</sup>	0,9892
<i>Resíduos</i>	362,662	162	2,23866		
<i>Total</i>	362,711	164			

em que: FV= fonte de variação; SQ= soma dos quadrados; GL= graus de liberdade; QM= quadrado médio; F-cal.= valor de F calculado; P= probabilidade de erro; <sup>NS</sup>= não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 26 – Teste de médias para a flecha de arqueamento (mm/m) na secagem ao ar livre em função da espécie.

<b>Espécie</b>	<b>Médias</b>
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	0,25 <sup>A</sup>
<i>Corymbia citriodora</i>	0,22 <sup>A</sup>
<i>Eucalyptus saligna</i>	0,21 <sup>A</sup>

em que: Médias seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si (LSD Fisher,  $p > 0,05$ ).

Apêndice 8 – Amplitude de variação dos dados de arqueamento nas três espécies estudadas.

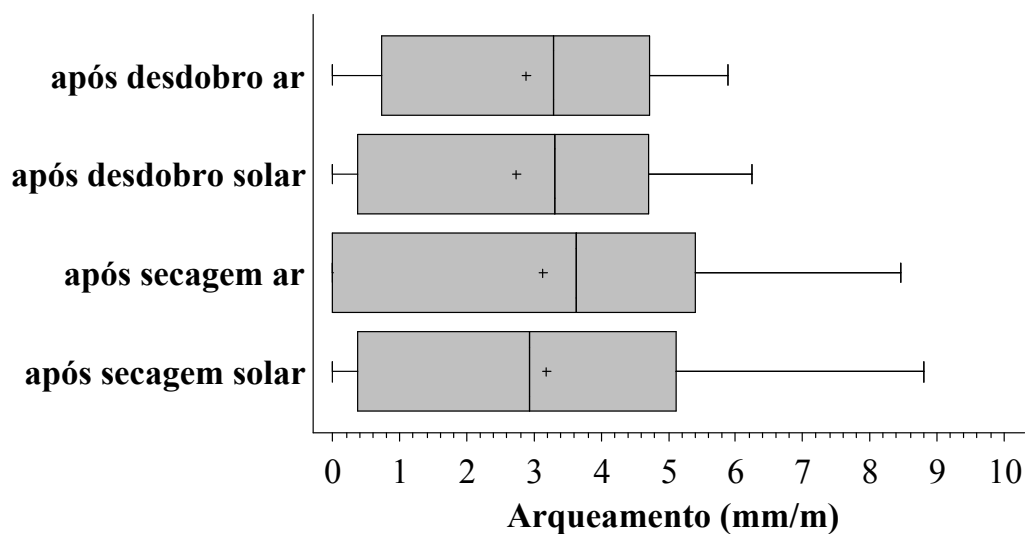


Figura 41 – Amplitude de variação dos dados de arqueamento após o desdobro e após a secagem em estufa solar e ao ar livre de *Eucalyptus tereticornis*.

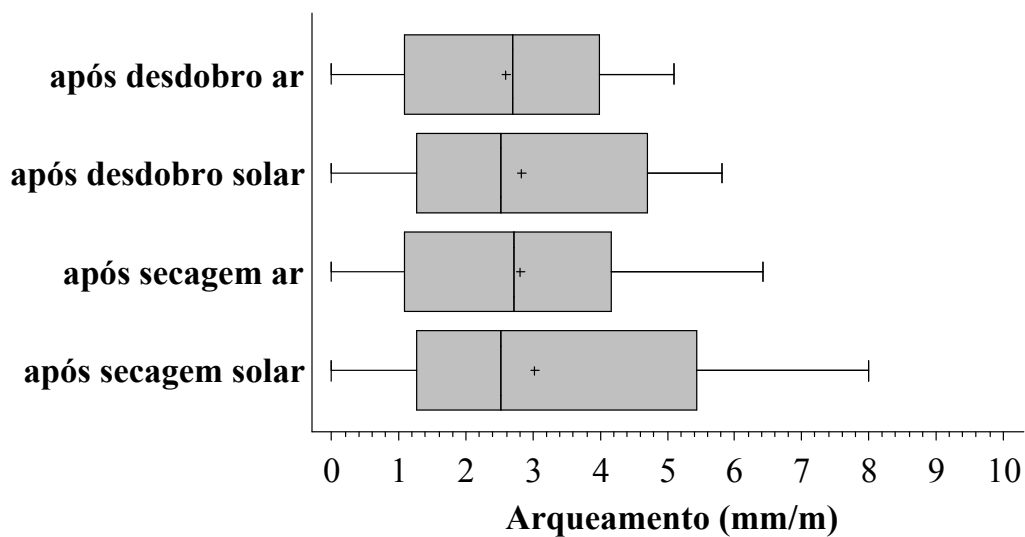


Figura 42 – Amplitude de variação dos dados de arqueamento após o desdobro e após a secagem em estufa solar e ao ar livre de *Corymbia citriodora*.

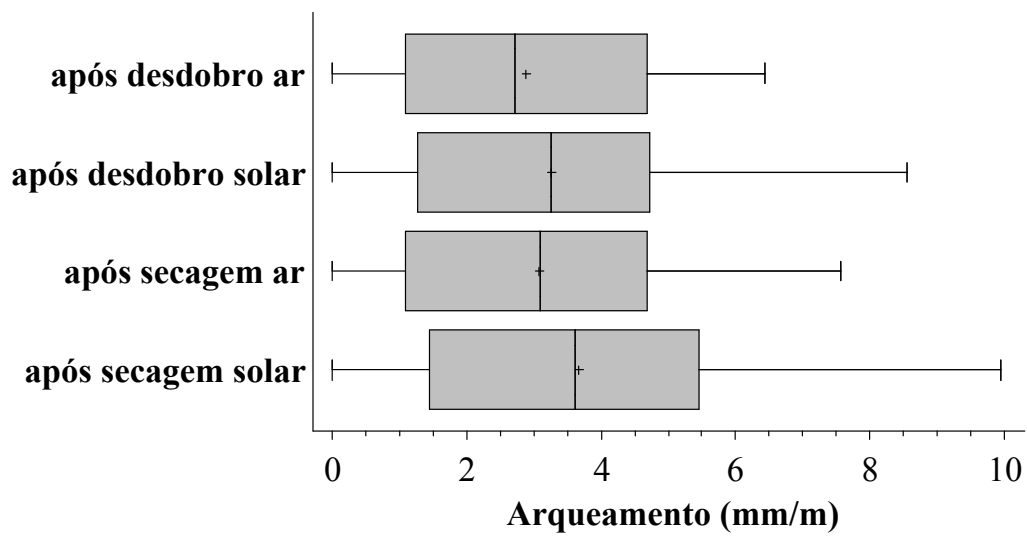


Figura 43 — Amplitude de variação dos dados de arqueamento após o desdobro e após a secagem em estufa solar e ao ar livre de *Eucalyptus saligna*.

Apêndice 9 – Dimensões das tábuas das três espécies estudadas expostas a secagem ao ar livre e em estufa solar.

Tabela 27 – Dimensões médias e desvio padrão das tábuas das três espécies estudadas expostas a secagem em estufa solar e ao ar livre.

<b>Espécie</b>	<b>Secagem</b>	<b>Comprimento (cm)</b>	<b>Largura (cm)</b>	<b>Espessura (cm)</b>
<i>E. tereticornis</i>	Ar livre	276,83 (5,04)	15,51 (0,46)	2,59 (0,25)
	Solar	275,63 (4,67)	15,50 (0,43)	2,59 (0,25)
<i>C. citriodora</i>	Ar livre	276,38 (2,18)	15,57 (0,71)	2,68 (0,17)
	Solar	276,31 (2,06)	15,72 (0,64)	2,72 (0,20)
<i>E. saligna</i>	Ar livre	277,86 (3,95)	15,15 (0,48)	2,51 (0,20)
	Solar	278,19 (4,28)	15,18 (0,60)	2,49 (0,24)

em que: os valores apresentados entre parênteses são relativos ao desvio padrão.

Apêndice 10 – Análise de variância para a flecha de encurvamento (mm/m) nas três espécies estudadas em função do método de secagem.

Tabela 28 – Análise de variância para a flecha de encurvamento (mm/m) na madeira de *Eucalyptus tereticornis* em função do método de secagem.

<b>FV</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>QM</b>	<b>F-cal.</b>	<b>P</b>
<i>Secagem</i>	0,0613968	1	0,0613968	0,03 <sup>NS</sup>	0,8714
<i>Resíduos</i>	251,77	108	2,3312		
<i>Total</i>	251,831	109			

em que: FV= fonte de variação; SQ= soma dos quadrados; GL= graus de liberdade; QM= quadrado médio; F-cal.= valor de F calculado; P= probabilidade de erro; <sup>NS</sup>= não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 29 – Análise de variância para a flecha de encurvamento (mm/m) na madeira de *Corymbia citriodora* em função do método de secagem.

<b>FV</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>QM</b>	<b>F-cal.</b>	<b>P</b>
<i>Secagem</i>	2,93085	1	2,93085	2,84 <sup>NS</sup>	0,0948
<i>Resíduos</i>	111,456	108	1,032		
<i>Total</i>	114,386	109			

em que: FV= fonte de variação; SQ= soma dos quadrados; GL= graus de liberdade; QM= quadrado médio; F-cal.= valor de F calculado; P= probabilidade de erro; <sup>NS</sup>= não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 30 – Análise de variância para a flecha de encurvamento (mm/m) na madeira de *Eucalyptus saligna* em função do método de secagem.

<b>FV</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>QM</b>	<b>F-cal.</b>	<b>P</b>
<i>Secagem</i>	0,969886	1	0,969886	0,58 <sup>NS</sup>	0,4496
<i>Resíduos</i>	181,926	108	1,6845		
<i>Total</i>	182,896	109			

em que: FV= fonte de variação; SQ= soma dos quadrados; GL= graus de liberdade; QM= quadrado médio; F-cal.= valor de F calculado; P= probabilidade de erro; <sup>NS</sup>= não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Apêndice 11 – Análise de variância para a flecha de encurvamento (mm/m) nos dois métodos de secagem em função da espécie.

Tabela 31 – Análise de variância para a flecha de encurvamento (mm/m) na secagem em estufa solar em função da espécie.

<b>FV</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>QM</b>	<b>F-cal.</b>	<b>P</b>
<i>Espécie</i>	6,79673	2	3,39837	2,44 <sup>NS</sup>	0,0901
<i>Resíduos</i>	225,39	162	1,3913		
<i>Total</i>	232,187	164			

em que: FV= fonte de variação; SQ= soma dos quadrados; GL= graus de liberdade; QM= quadrado médio; F-cal.= valor de F calculado; P= probabilidade de erro; <sup>NS</sup>= significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 32 – Teste de médias para a flecha de encurvamento (mm/m) na secagem em estufa solar em função da espécie.

<b>Espécie</b>	<b>Médias</b>
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	- 0,44 <sup>A</sup>
<i>Corymbia citriodora</i>	- 0,31 <sup>A B</sup>
<i>Eucalyptus saligna</i>	0,04 <sup>B</sup>

em que: Médias seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si (LSD Fisher,  $p > 0,05$ ).

Tabela 33 – Análise de variância para a flecha de encurvamento (mm/m) na secagem ao ar livre em função da espécie.

<b>FV</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>QM</b>	<b>F-cal.</b>	<b>P</b>
<i>Espécie</i>	7,34134	2	3,67067	1,86 <sup>NS</sup>	0,159
<i>Resíduos</i>	319,761	162	1,97384		
<i>Total</i>	327,103	164			

em que: FV= fonte de variação; SQ= soma dos quadrados; GL= graus de liberdade; QM= quadrado médio; F-cal.= valor de F calculado; P= probabilidade de erro; <sup>NS</sup>= não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 34 – Teste de médias para a flecha de encurvamento (mm/m) na secagem ao ar livre em função da espécie.

<b>Espécie</b>	<b>Médias</b>
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	- 0,49 <sup>A</sup>
<i>Corymbia citriodora</i>	- 0,15 <sup>A</sup>
<i>Eucalyptus saligna</i>	0,02 <sup>A</sup>

em que: Médias seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si (LSD Fisher,  $p > 0,05$ ).

Apêndice 12 – Amplitude de variação dos dados de encurvamento nas três espécies estudadas.

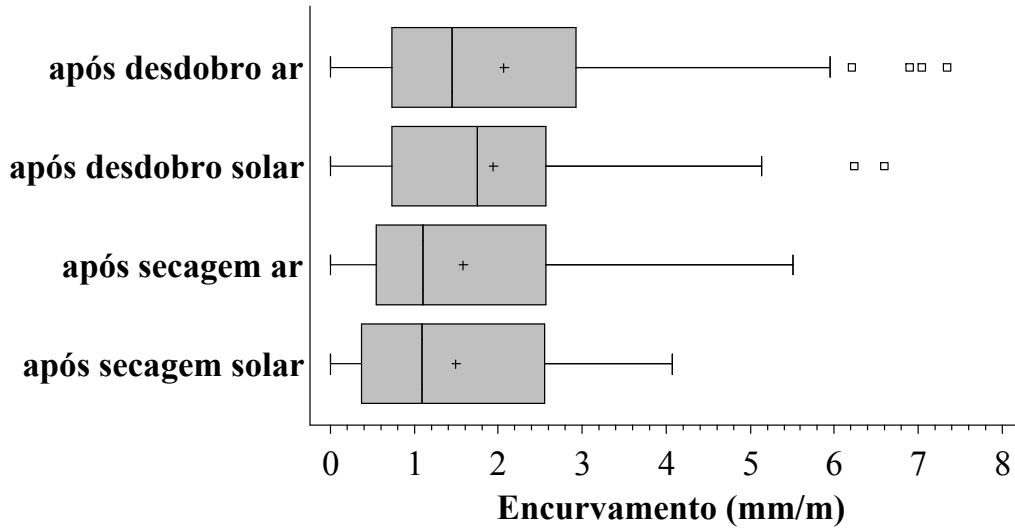


Figura 44 – Amplitude de variação dos dados de encurvamento após o desdobro e após a secagem em estufa solar e ao ar livre de *Eucalyptus tereticornis*.

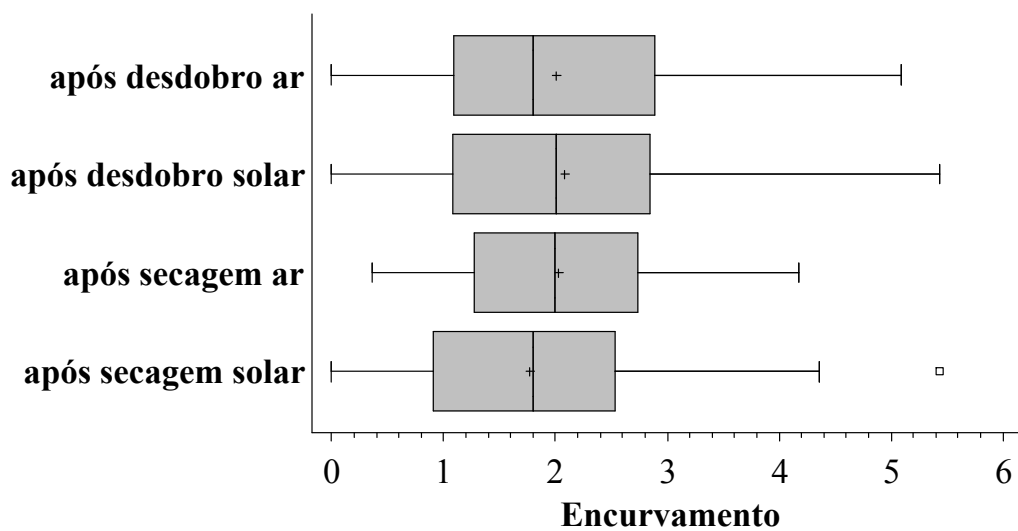


Figura 45 – Amplitude de variação dos dados de encurvamento após o desdobro e após a secagem em estufa solar e ao ar livre de *Corymbia citriodora*.



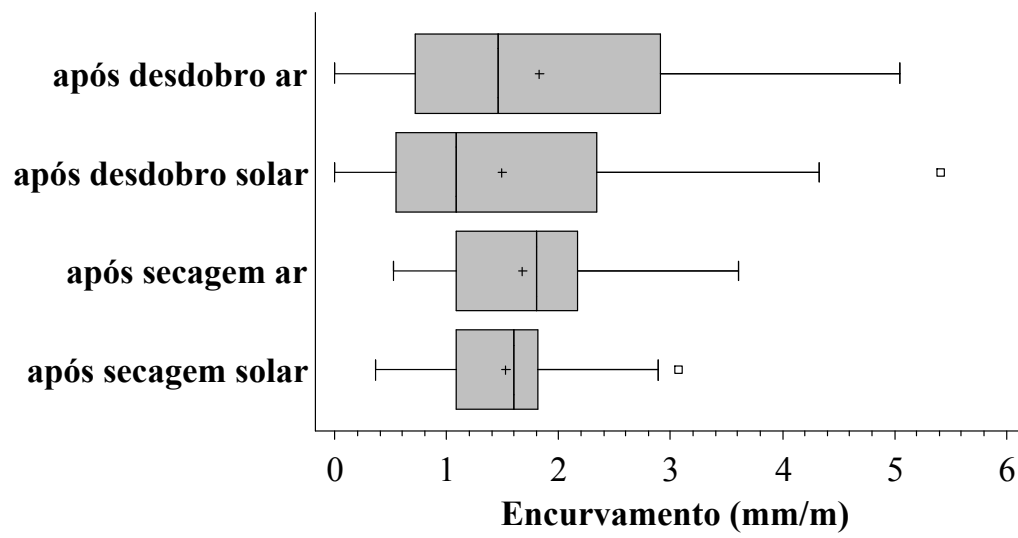


Figura 46 – Amplitude de variação dos dados de encurvamento após o desdobro e após a secagem em estufa solar e ao ar livre de *Eucalyptus saligna*.