

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

**AVALIAÇÃO DE PROGRAMAS DE SECAGEM PARA
MADEIRAS DE EUCALIPTO ELABORADOS COM BASE EM
TESTES PRÉVIOS A ALTA TEMPERATURA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Felipe Susin

Santa Maria, RS, Brasil.

2012

AVALIAÇÃO DE PROGRAMAS DE SECAGEM PARA MADEIRAS DE EUCALIPTO ELABORADOS COM BASE EM TESTES PRÉVIOS A ALTA TEMPERATURA

Felipe Susin

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.

2012

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Susin, Felipe

AVALIAÇÃO DE PROGRAMAS DE SECAGEM PARA MADEIRAS DE EUCALIPTO ELABORADOS COM BASE EM TESTES PRÉVIOS A ALTA TEMPERATURA / Felipe Susin.-2012.

161 p.; 30cm

Orientador: Elio José Santini

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2012.

1. Secagem da madeira 2. Gradientes de umidade 3. Uniformização da madeira 4. Programas de secagem 5. Qualidade da madeira I. Santini, Elio José II. Título.

Todos os direitos autorais reservados a Felipe Susin.

A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

**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 DE PROGRAMAS DE SECAGEM PARA
MADEIRAS DE EUCALIPTO ELABORADOS COM BASE EM
TESTES PRÉVIOS A ALTA TEMPERATURA**

elaborada por
Felipe Susin

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

COMISSÃO EXAMINADORA:

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

Ivaldo Pontes Jankowsky, Dr. (ESALQ)

Leonardo da Silva Oliveira, Dr. (UFPeI)

Santa Maria, 25 de maio de 2012.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus pela força nos momentos difíceis, quando as coisas pareciam que não dariam certo.

Gostaria de agradecer aos meus pais, dona Maria Helena Torezzan Susin e o seu Alvides Luiz Susin, minha irmã Camila Susin, minha avó, dona Donália Z. Torezzan e demais familiares pelo apoio, carinho, incentivo e compreensão por nem sempre eu poder me fazer presente o quanto eu gostaria. Também agradeço as orações da minha mãe e da minha avó, que me deram fé e força para seguir em frente.

Ao meu orientador, Prof. Elio J. Santini, pela oportunidade e confiança na minha capacidade e no meu trabalho, pelo apoio e disposição no auxílio de problemas e dúvidas, pela orientação e conversas na hora do cafezinho no LPF.

Aos professores Ivaldo P. Jankowsky e Leonardo da Silva Oliveira por aceitarem o convite para integrarem a comissão julgadora, além do Prof. Miguel Durlo pelo aceite na condição de suplente.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal pela oportunidade, bem como a CAPES pela concessão da bolsa de mestrado, sem a qual esta etapa teria sido um pouco mais difícil.

Aos funcionários do LPF, Fabi, Seu Nelson e Tarso, bem como a Tita e Dona Naira, secretárias do PPGEF e do Departamento de Ciências Florestais, respectivamente.

Agradeço a FEPAGRO, ao Eng. Florestal Roberto Trevisan, por ceder a madeira utilizada no presente estudo, bem como a prestatividade, receptividade quanto ao projeto, além da exímia disponibilidade para atender de modo integral as necessidades quanto as especificações do material. A todos os demais funcionários que, de algum modo, colaboraram para que este estudo pudesse ser concluído, o meu sincero muito obrigado.

Ao meu amigo e colega, Eng. Florestal Guilherme B. Ivanov, pela convivência durante um ano e meio, compartilhando de incertezas, dúvidas e boas risadas, bem como alguns bons churrascos ou algumas partidas emocionantes de tênis.

Ao amigo, Eng. Florestal Diego M. Stangerlin, pela frequente ajuda em questões técnicas, cuja experiência no assunto auxiliava no crescimento e desenvolvimento de meus propósitos e metas relativas ao mestrado.

Aos colegas e ex-colegas de laboratório, pela convivência, amizade, pelos diálogos e compartilhamento de momentos bons e mais difíceis, de experiências, viagens e pela ajuda que recebi, a qual foi de grande importância para a realização do presente trabalho, sem esquecer dos incontáveis mates que dividimos.

Ao amigo Douglas E. Carvalho, o meu sincero muito obrigado pela amizade, conversas e pelo imprescindível auxílio de modo direto ou indireto nas diversas atividades que foram realizadas para que este trabalho pudesse ser concluído.

A amiga e colega Eng. Florestal Rosana L. Guma pelo auxílio nas atividades, pela amizade, convivência diária no LPF e pela companhia na hora do chimarrão quase que diário.

Aos amigos Bibiana R. A. Vidrano e Henrique C. Vieira pela amizade, auxílio nas avaliações, companhia e convivência durante boa parte do meu trabalho e que sempre estiveram a disposição para me auxiliar quando necessitei, o meu muito obrigado.

Aos demais amigos, colegas e pessoas que fazem ou que fizeram parte desta etapa, saibam que devo um agradecimento especial a todos vocês, pois em menor ou maior nível, todos contribuíram para que eu pudesse chegar aonde cheguei.

Ao amigo Ramón pelas manutenções, adaptações e consertos realizados sempre de forma rápida e eficiente na estufa de secagem, sem esta ajuda este trabalho talvez ainda estivesse em fase experimental.

E por fim agradeço a estufa de secagem convencional, que mesmo após apresentar incontáveis problemas, provocar a perda de sono por algumas longas noites durante os seis meses que fixei domicílio no laboratório, possibilitou que este trabalho estivesse concluído.

RESUMO

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

AVALIAÇÃO DE PROGRAMAS DE SECAGEM PARA MADEIRAS DE EUCALIPTO ELABORADOS COM BASE EM TESTES PRÉVIOS A ALTA TEMPERATURA

AUTOR: FELIPE SUSIN

ORIENTADOR: ELIO JOSÉ SANTINI

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 25 de maio de 2012.

A dificuldade de obter-se madeira seca com reduzida incidência de defeitos é um desafio quando se trata de madeira de eucalipto, visto que as espécies deste gênero apresentam secagem difícil e elevada incidência de defeitos, contribuindo para que a sua utilização seja limitada e o nível de perdas, em muitas ocasiões, elevado. O objetivo principal deste estudo foi elaborar e avaliar programas de secagem para madeira de *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus saligna*. Para isso, avaliaram-se parâmetros de secagem e características físicas das espécies em ensaios prévios, utilizando equações para elaborar os programas de secagem para cada uma das espécies. Submeteram-se dois lotes, com 32 tábuas de 270,0 x 15,0 x 2,5 cm (comprimento, largura e espessura), respectivamente, de cada espécie, à secagem utilizando o mesmo programa de secagem para cada espécie. Para cada lote, utilizaram-se quatro amostras de controle para o monitoramento do teor de umidade e outras quatro tábuas para as avaliações dos gradientes de umidade, durante a secagem e na fase de uniformização. Os programas de secagem foram avaliados quanto a taxa de secagem, manifestação de defeitos, o teor de umidade final, retratibilidade, gradiente de umidade e etapa de uniformização. A taxa de secagem na aplicação dos programas de secagem manteve a tendência apresentada durante a avaliação prévia, com valores iguais a $5,38 \times 10^{-4}$, $11,0 \times 10^{-4}$ e $7,96 \times 10^{-4}$ g/cm².h, respectivamente para o *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus saligna*, sendo que as mesmas apresentaram massa específica básica de 0,82, 0,61 e 0,69 g/cm³, respectivamente. Para o teor de umidade final, as três espécies apresentaram variação satisfatória, sendo que o *Corymbia citriodora* mostrou a menor dispersão entre as peças, seguido pelo *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus robusta*. As avaliações qualitativas da madeira indicaram que, de modo geral, a espécie que obteve os melhores resultados foi o *Corymbia citriodora*, seguida pela de *Eucalyptus saligna* e pela de *Eucalyptus robusta*. A mesma tendência foi verificada para as contrações durante a secagem, não se verificando diferença entre as espécies para o coeficiente anisotrópico. O tempo aplicado para a etapa de uniformização foi suficiente apenas para o *Eucalyptus robusta*, o qual apresentou gradientes de umidade abaixo de 4% após o final da uniformização.

Palavras-chave: Secagem da madeira. Gradientes de umidade. Uniformização da madeira. Programas de secagem. Qualidade da madeira.

ABSTRACT

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

EVALUATION OF PROGRAMS FOR DRY EUCALIPTO WOOD ELABORATE BASED ON PREVIOUS TESTS AT HIGH TEMPERATURE

AUTHOR: FELIPE SUSIN

ADVISOR: ELIO JOSÉ SANTINI

Date and place of defence: Santa Maria, May 25th, 2012.

The difficulty of obtaining dry wood with a low incidence of defects is a challenge when it comes to eucalyptus wood, since the species of this genus exhibit drying difficult and high expression of defects, contributing to their use is limited and the level of losses on many occasions raised. The main objective of this study was to develop and evaluate programs for drying wood *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus robusta* and *Eucalyptus saligna*. For this, it was evaluated drying parameters and physical characteristics of the species in preliminary tests, using equations to establish the drying programs for each species. Underwent two batches of 32 tablets with 270,0 x 15,0 x 2,5 (length, width and thickness), respectively, of each kind, drying using the same drying program for each species. For each batch, we used four control samples to monitor the moisture content and four boards for the evaluation of moisture gradients during drying and standardization phase. The programs were evaluated for drying the drying rate, the manifestation of defects, the final moisture content, the shrinkage, moisture gradient and the standardization phase. The drying rate in the application of drying programs maintained the trend presented during the preliminary assessment, with values equal to $5,38 \times 10^{-4}$, $1,10 \times 10^{-3}$ e $7,96 \times 10^{-4}$ g/cm³.h for *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus robusta* and *Eucalyptus saligna*, respectively. For the final moisture content, the three species showed variation satisfactory, and the *Corymbia citriodora* showed less dispersion between the parts, followed by *Eucalyptus saligna* and *Eucalyptus robusta*. The qualitative assessments showed that the wood, in general, the species which obtained the best results was *Corymbia citriodora*, followed by *Eucalyptus saligna* robust and Eucalyptus. The same trend was observed for the contractions during drying was not observed for the species difference between the coefficient anisotropic. The time used for the standardization step is only sufficient for *Eucalyptus robusta*, the moisture content which presented below 4% after the end of the standardization.

Keywords: Wood drying. Moisture content. Standardization of wood. Drying programs. Quality of wood.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação do colapso na avaliação preliminar.	56
Tabela 2. Equações para determinação dos parâmetros do programa de secagem.....	58
Tabela 3. Classes de qualidade da madeira em função do IRPT.....	66
Tabela 4. Grau de colapso.	70
Tabela 5. Posições em relação à superfície da amostra para determinação do teor de umidade.	72
Tabela 6. Gradiente de umidade admitido para cada classe de qualidade.	73
Tabela 7. Amplitude de $MC_{(1/3)}$ para as classes de qualidade em função do teor de umidade desejado.	74
Tabela 8. Massa específica básica e aparente a 12%, teor de umidade inicial e tempo da secagem drástica.	77
Tabela 9. Taxas de secagem médias para a secagem drástica das três espécies...	82
Tabela 10. Retratibilidade e coeficiente de anisotropia durante o teste prévio.	84
Tabela 11. Avaliação das rachaduras durante a secagem drástica.	86
Tabela 12. Ocorrência do colapso durante o teste prévio.	87
Tabela 13. Valores médios das variáveis para elaborar os programas de secagem.....	88
Tabela 14. Comparação entre os valores médios de teor de umidade inicial, massa específica básica e variáveis do ensaio de secagem drástica.	90
Tabela 15. Valores médios do tempo de secagem em diferentes intervalos.	91
Tabela 16. Valores médios da velocidade de secagem em diferentes intervalos.	92
Tabela 17. Parâmetros dos programas de secagem para as três espécies.....	93
Tabela 18. Parâmetros dos programas de secagem disponíveis na literatura para a madeira de eucalipto.	93
Tabela 19. Teor de umidade inicial e final, tempo e taxa de secagem média.	96
Tabela 20. Taxa de secagem média acima e abaixo do PSF e total.....	97
Tabela 21. Avaliação das rachaduras de superfície por lote para as três espécies.....	103
Tabela 22. Índice de rachaduras de topo.	106
Tabela 23. Valores médios do IRT para a madeira das três espécies.	107

Tabela 24. Classificação das tábuas quanto ao IRT por espécie (%).	110
Tabela 25. Avaliação do índice médio de perda por rachadura de topo.	113
Tabela 26. Classificação das tábuas quanto ao IPRT.	115
Tabela 27. Flecha média de arqueamento para cada lote.	116
Tabela 28. Flecha média de arqueamento para as três espécies.	116
Tabela 29. Classificação das tábuas quanto ao arqueamento, em percentual.	118
Tabela 30. Flecha média de encurvamento para cada lote.	121
Tabela 31. Flecha média de encurvamento para as três espécies.	121
Tabela 32. Classificação das tábuas quanto ao encurvamento, em percentual.	123
Tabela 33. Flecha média de encanoamento para cada lote.	124
Tabela 34. Flecha média de encanoamento para as três espécies.	125
Tabela 35. Classificação das tábuas quanto ao encanoamento, em percentual.	126
Tabela 36. Percentagem de peças defeituosas e nível do colapso para a madeira de <i>E. robusta</i> .	127
Tabela 37. Colapso em <i>E. robusta</i> , em função da orientação das tábuas.	129
Tabela 38. Valores médios do colapso após a secagem e após 45 dias.	130
Tabela 39. Contrações radiais, tangenciais e coeficiente de anisotropia.	131
Tabela 40. Teor de umidade final (%) das tábuas submetidas à secagem.	132
Tabela 41. Gradientes de umidade durante a secagem para o <i>C. citriodora</i> .	137
Tabela 42. Gradientes de umidade durante a secagem para o <i>E. robusta</i> .	139
Tabela 43. Gradientes de umidade durante a secagem para o <i>E. saligna</i> .	142
Tabela 44. Classificação da qualidade da uniformização quanto ao gradiente de umidade.	149
Tabela 45. Classificação da qualidade da uniformização quanto ao teor de umidade nas camadas intermediárias.	150

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Curva característica de secagem para madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> com 20 mm de espessura.	27
Figura 2: Defeitos de secagem.....	39
Figura 3: Marcação das amostras após o aplainamento das peças.....	48
Figura 4: Esquema de retirada dos corpos de prova.....	49
Figura 5: Amostras para realização das avaliações preliminares.....	49
Figura 6: Esquema para retirada das amostras de controle.....	51
Figura 7: Manifestação de rachadura de topo em <i>Eucalyptus saligna</i>	55
Figura 8: Madeira empilhada antes de ser submetida à secagem em estufa.....	59
Figura 9: Estufa de secagem convencional: (A) aspersores de vapor d’água, com o ventilador ao fundo; (B) controlador lógico programável; (C) dumper frontal para entrada de ar; (D) sensores de temperatura – bulbo seco e úmido.	61
Figura 10: Procedimento para medição das rachaduras de topo.....	64
Figura 11: Procedimento para determinação do IPRT.	66
Figura 12: Procedimento para mensuração do arqueamento.	67
Figura 13: Procedimento para mensuração do encurvamento.....	68
Figura 14: Procedimento para mensuração do encanoamento.....	69
Figura 15: Procedimento para mensuração do colapso.....	69
Figura 16: Método para corte e obtenção das amostras para determinação do gradiente de umidade.....	72
Figura 17: Curva de secagem com valores médios para as três espécies.	78
Figura 18: Regressão relacionando o teor de umidade com o tempo de secagem para a madeira de <i>Eucalyptus robusta</i>	79
Figura 19: Regressão relacionando o teor de umidade com o tempo de secagem para a madeira de <i>Eucalyptus saligna</i>	79
Figura 20: Regressão relacionando o teor de umidade com o tempo de secagem para a madeira de <i>Corymbia citriodora</i>	80
Figura 21: Curva de secagem para o lote 01 de <i>Corymbia citriodora</i>	99
Figura 22: Curva de secagem para o lote 02 de <i>Corymbia citriodora</i>	99
Figura 23: Curva de secagem para o lote 01 de <i>Eucalyptus robusta</i>	100
Figura 24: Curva de secagem para o lote 02 de <i>Eucalyptus robusta</i>	100
Figura 25: Curva de secagem para o lote 01 de <i>Eucalyptus saligna</i>	101
Figura 26: Curva de secagem para o lote 02 de <i>Eucalyptus saligna</i>	101
Figura 27: Rachaduras de superfície antes e após a secagem.....	105

Figura 28: Índice de rachaduras de topo antes e após a secagem.	109
Figura 29: Percentual de tábuas com rachaduras de topo por espécie.	111
Figura 30: Avaliação do Índice de Rachadura de Topo (IRT) e Índice de Perda por Rachadura de Topo (IPRT) antes da secagem.	114
Figura 31: Avaliação do IRT e IPRT após a secagem.	114
Figura 32: Peças com flecha de arqueamento acima do admitido.	120
Figura 33: Dispersão do teor de umidade das tábuas dos lotes 01 e 02 de <i>Corymbia citriodora</i>	133
Figura 34: Dispersão do teor de umidade das tábuas dos lotes 01 e 02 de <i>Eucalyptus robusta</i>	133
Figura 35: Dispersão do teor de umidade das tábuas dos lotes 01 e 02 de <i>Eucalyptus saligna</i>	134
Figura 36: Gradientes de umidade durante a secagem do lote 01 de <i>C. citriodora</i>	135
Figura 37: Gradientes de umidade durante a secagem do lote 02 de <i>C. citriodora</i>	136
Figura 38: Gradientes de umidade durante a secagem do lote 01 de <i>E. robusta</i>	138
Figura 39: Gradientes de umidade durante a secagem do lote 02 de <i>E. robusta</i>	138
Figura 40: Gradientes de umidade durante a secagem do lote 01 de <i>E. saligna</i>	140
Figura 41: Gradientes de umidade durante a secagem do lote 02 de <i>E. saligna</i>	141
Figura 42: Gradientes de umidade durante a uniformização da madeira.	143
Figura 43: Gradientes de umidade durante a uniformização da madeira.	144
Figura 44: Gradientes de umidade durante a uniformização do lote 01 de <i>C. citriodora</i>	145
Figura 45: Gradientes de umidade durante a uniformização do lote 02 de <i>C. citriodora</i>	145
Figura 46: Gradientes de umidade durante a uniformização do lote 01 de <i>E. robusta</i>	146
Figura 47: Gradientes de umidade durante a uniformização do lote 02 de <i>E. robusta</i>	147
Figura 48: Gradientes de umidade durante a uniformização do lote 01 de <i>E. saligna</i>	148
Figura 49: Gradientes de umidade durante a uniformização do lote 02 de <i>E. saligna</i>	148

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Programa de secagem para a madeira de <i>Corymbia citriodora</i>	94
Quadro 2. Programa de secagem para a madeira de <i>Eucalyptus robusta</i>	94
Quadro 3. Programa de secagem para a madeira de <i>Eucalyptus saligna</i>	95

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1 Espécies utilizadas	25
2.1.1 Gêneros <i>Eucalyptus</i> e <i>Corymbia</i>	25
2.1.2 <i>Corymbia citriodora</i>	28
2.1.3 <i>Eucalyptus saligna</i>	30
2.1.4 <i>Eucalyptus robusta</i>	32
2.2 Secagem da madeira.....	34
2.3 Secagem convencional.....	36
2.3 Defeitos de secagem	38
2.3.1 Rachaduras	39
2.3.2 Empenamentos	40
2.3.3 Colapso	41
2.4 Gradientes de umidade.....	42
2.5 Programas de secagem	43
3 MATERIAL E MÉTODOS	47
3.1 Obtenção e preparo do material	47
3.2 Testes prévios	47
3.2.1 Confecção dos corpos de prova.....	48
3.2.2 Massa específica básica e aparente	50
3.2.3 Determinação do teor de umidade inicial	51
3.3 Secagem drástica	52
3.3.1 Taxa de secagem.....	52
3.3.2 Retratibilidade	53
3.3.3 Variação volumétrica máxima	54
3.3.4 Coeficiente de anisotropia.....	54
3.3.5 Verificação de rachaduras.....	54
3.3.6 Avaliação do colapso	55
3.4 Elaboração e aplicação dos programas de secagem	56
3.4.1 Variáveis para estimativa dos programas de secagem	56
3.5 Características da estufa de secagem.....	58

3.6	Aplicação dos programas de secagem	61
3.7	Avaliação dos programas de secagem	62
3.7.1	Taxa de secagem	62
3.7.2	Defeitos de secagem	63
3.7.3	Retratibilidade e coeficiente de anisotropia durante a secagem.....	70
3.7.4	Teor de umidade final entre as peças.....	70
3.7.5	Gradientes de umidade durante a secagem	71
3.8	Avaliações do tempo e da qualidade da uniformização	74
3.9	Análises estatísticas.....	74
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
4.1	Avaliações prévias	77
4.1.1	Massa específica e teor de umidade inicial	77
4.1.3	Taxa de secagem	81
4.1.4	Retratibilidade.....	84
4.1.5	Avaliação de rachaduras de topo	85
4.1.6	Avaliação do colapso.....	86
4.2	Elaboração dos programas de secagem.....	87
4.2.1	Variáveis para elaboração dos programas de secagem.....	87
4.2.2	Parâmetros dos programas de secagem	92
4.2.3	Programas de secagem.....	94
4.3	Avaliação dos programas de secagem	95
4.3.1	Taxa de secagem	95
4.3.2	Manifestação de defeitos.....	103
4.3.3	Retratibilidade e Coeficiente de Anisotropia	130
4.3.4	Teor de umidade final entre as peças.....	132
4.3.5	Gradientes de umidade durante a secagem	135
4.4	Avaliações da etapa de uniformização.....	143
4.4.1	Gradiente de umidade durante a uniformização	145
4.4.2	Teor de umidade médio na camada intermediária.....	150
5	CONCLUSÕES	153
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	155

1 INTRODUÇÃO

A otimização em qualidade e rendimento na utilização da madeira, para os fins mais diversos, fornece aporte para a busca de novas técnicas de desdobro e secagem. Especificamente, na secagem de madeira, existem princípios básicos que devem ser respeitados quando se realiza tal processo.

De acordo com Andrade (2000), a secagem em estufa convencional é considerada uma etapa crítica no beneficiamento da madeira, visto que requer um investimento inicial considerável e apresenta um custo operacional relativamente significativo. Aliado a isso, o elevado nível de perdas, em virtude da falta de informações sobre as espécies e sobre os procedimentos adequados nessa etapa, revelam a dificuldade de conduzir a secagem, sobretudo, em madeiras refratárias, como é o caso do gênero *Eucalyptus*.

Todavia, quando a secagem for realizada utilizando meios e técnicas adequadas, é possível reduzir o tempo dessa etapa e os defeitos ocasionados na mesma e, desse modo, agregar valor ao produto final.

Na secagem de espécies do gênero *Eucalyptus*, uma das dificuldades consiste em identificar a espécie que será submetida ao referido processo. Sendo assim, em termos práticos, é frequente que madeiras de espécies diferentes sejam submetidas à secagem juntamente, até mesmo, de maneira não intencional.

A utilização da metodologia proposta e aplicada neste estudo permite a estimativa dos parâmetros de secagem que possibilitam a elaboração de programas de secagem para diferentes espécies, sem a necessidade de conhecer a espécie que está sendo utilizada.

Em certos casos, a madeira de eucalipto é rejeitada para utilização na forma sólida, em virtude da dificuldade de obter-se madeira com reduzida incidência de defeitos e da falta de conhecimento acerca do processo de secagem.

Espécies com maior massa específica são de secagem mais difícil, comparativamente às de menor massa específica. Isso é explicado porque as primeiras possuem a parede celular mais espessa e um lume de menor volume, contendo uma quantidade maior de água higroscópica, cuja movimentação é mais lenta. Por outro lado, as de menor massa específica possuem uma maior quantidade

de água capilar, cuja movimentação depende, principalmente, do raio dos capilares (ANDRADE, 2000).

Por essa razão selecionou-se o *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus saligna*, visto que as três espécies possuem características distintas entre si. O *Corymbia citriodora* é uma madeira relativamente conhecida, de massa específica elevada e que, por isso, acredita-se, apresenta dificuldades para proceder a sua secagem.

O *Eucalyptus saligna* é uma espécie da qual há disponibilidade de informações acerca de sua secagem. Por essa razão, buscou-se consolidar as informações sobre sua secagem, explorando aspectos ainda um tanto desconhecidos, como o tempo necessário para a uniformização e a consequente redução no gradiente de umidade ao final da secagem.

Em relação ao *Eucalyptus robusta*, as informações sobre sua secagem são limitadas, não sendo encontrados na literatura estudos com secagem convencional. Desse modo, buscaram-se informações preliminares através da metodologia empregada, avaliando, por meio da qualidade da madeira após a secagem, se a espécie apresenta potencialidade para ser utilizada como fonte de matéria-prima para a indústria madeireira.

Complementarmente, a elaboração dos programas de secagem específicos para as espécies citadas, informações sobre a uniformização da madeira são escassas para as espécies utilizadas comercialmente no Brasil. De modo geral, é recomendado um tempo variável para a uniformização após a secagem, porém, não existem informações se esse tempo é suficiente para todas as situações ou se é demasiado para alguns casos.

A metodologia empregada para avaliar os gradientes de umidade permitiu quantificá-los em diferentes momentos da secagem, além de possibilitar a avaliação em distintos intervalos de tempo na etapa de uniformização. Com isso, foi possível sugerir o tempo de uniformização adequado à determinada espécie, para que a mesma apresente um gradiente de umidade aceitável. Desse modo, uma vez que a madeira for resserrada em peças menores, em função da sua utilização após a secagem, é possível reduzir as perdas ocasionadas pelos empenamentos decorrentes da presença de elevados gradientes de umidade.

O objetivo principal deste estudo foi elaborar e avaliar programas de secagem para as madeiras de *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus saligna*

elaborados com base na metodologia de secagem a 100°C. Os objetivos específicos do presente estudo foram:

- a) Elaborar programas de secagem específicos para cada uma das três espécies utilizando testes preliminares, submetendo as amostras à secagem a 100°C;
- b) Obter informações preliminares sobre as espécies, como massa específica, reprodutibilidade, tendência a rachaduras e colapso e velocidade de secagem;
- c) Aplicar os programas de secagem e avaliá-los sob aspectos qualitativos como ocorrência de rachaduras, empenamentos, colapso, taxa de secagem e gradientes de umidade;
- d) Avaliar o gradiente de umidade durante a secagem e verificar a influência do tempo da etapa de uniformização na redução dos gradientes de umidade após a secagem convencional.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Espécies utilizadas

2.1.1 Gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia*

Os gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* pertencem à família *Myrtaceae* e possuem mais de 600 espécies, variedades e híbridos, ocorrendo em locais de condições ambientais que vão desde áreas pantanosas, até muito secas, solos de baixada, de alta e baixa fertilidade, até solos arenosos (LAMPRECHT, 1990). Segundo Marchiori (1997) a grande maioria dos eucaliptos está confinada aos limites da Austrália continental e Tasmânia, com um número menor de espécies em Papua-Nova-Guiné, Timor e arquipélago indonésico (Ilhas de Sonda, Flores e Witar).

As espécies desse gênero habitam florestas tropicais pluviais, áreas com precipitação estival (zona tropical), zonas subtropicais de precipitação uniforme, e áreas de clima mediterrâneo, com chuvas restritas ao inverno. Diversas espécies prosperam em zonas áridas ou com precipitação inferior a 300 mm anuais. Dentre as espécies introduzidas no Brasil, destacam-se *Eucalyptus grandis*, *E. urophylla*, *E. saligna*, *E. cloeziana*, diversos híbridos (OLIVEIRA, 1998), além da espécie *Corymbia citriodora* até bem pouco tempo referida como *Eucalyptus citriodora*.

O gênero *Eucalyptus*, de acordo com Oliveira et al. (1999) é representado por árvores com alta taxa de crescimento, forma retilínea do fuste, desrama natural e madeira com grande variabilidade nas propriedades tecnológicas, adaptadas as mais diversas condições de uso. As espécies são aptas ao manejo pelo sistema de talhadia onde, após o corte raso, gemas dormentes dos cotilédones e primeiras folhas entram em atividade, permitindo a condução das rebrotas por mais duas rotações.

De maneira geral, a madeira apresenta pouco brilho, grã direita à revessa, textura fina a média; macia à moderadamente dura ao corte. Quanto à massa específica aparente, esta varia desde leves até pesadas, ocorrendo variações de aproximadamente 0,40 a 1,20 g/cm³. Outro aspecto positivo é o grande espectro de propriedades, em função das diferentes espécies que são facilmente cultivadas no país, tem-se desde madeiras leves e de baixa durabilidade, até aquelas aptas às

utilizações estruturais e de relativa durabilidade, mesmo sem passarem por tratamentos preservativos (OLIVEIRA et al., 1999).

Os eucaliptos foram introduzidos no Brasil como monocultura no início do século XX, por volta de 1904, destinado à produção de lenha e carvão, logo passando a ser usado em estruturas simples, como poste para transmissão de energia e telefonia, além de moirões. As espécies também são muito utilizadas como fornecedora de matéria prima para as indústrias de celulose e papel, de chapas aglomeradas e, mais recentemente, para as indústrias de MDF e moveleiras (NAHUZ, 1998).

Direcionando para aspectos gerais referentes à secagem da madeira de eucalipto, Ponce (1995) cita a necessidade de cuidados especiais no desdobro em virtude de alguns fatores como as tensões de crescimento, presença de madeira juvenil, colapso celular, nós, empenamentos, instabilidade dimensional e bolsas de resina. Alguns desses fatores podem ocasionar defeitos que são toleráveis na madeira para muitos usos finais e o objetivo da secagem deve ser a redução dos defeitos a um nível aceitável no produto pretendido. Todavia, defeitos inevitáveis em algumas espécies podem impedir sua utilização para determinados fins (CAMPBELL e HARTLEY, 1988).

De acordo com Campbell e Hartley (1988), praticamente todos os defeitos possíveis de ocorrerem durante a secagem, tais como rachaduras, empenamentos de distintas formas, gradientes de umidade, colapso, tensões de secagem e endurecimento superficial podem ser observados na madeira de *Eucalyptus*.

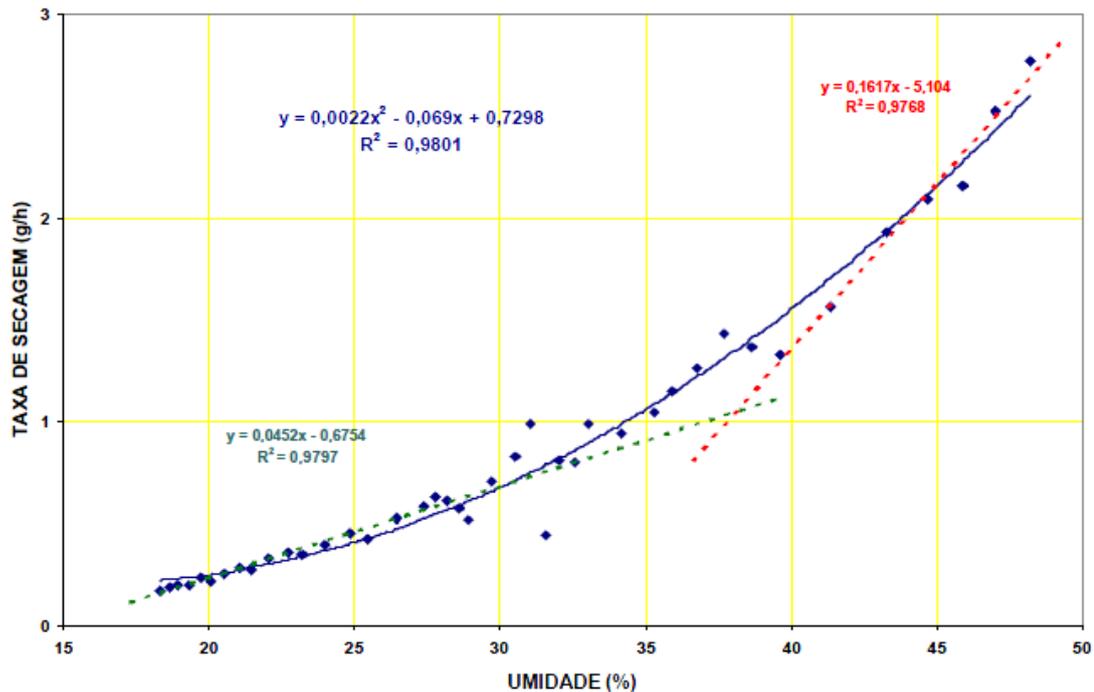


Figura 1: Curva característica de secagem para madeira de *Eucalyptus grandis* com 20 mm de espessura.

Fonte: Jankowsky, Santos e Baltieri, 2000.

A madeira de eucalipto não apresenta a fase de taxa constante na sua curva característica de secagem (Figura 1), comprovando a impermeabilidade da espécie. A permeabilidade reduzida implica na necessidade de uma secagem lenta e no desenvolvimento, durante o processo, de gradientes de umidade acima do normal (SANTOS, JANKOWSKY e ANDRADE, 2003).

Segundo Vermaas (1998), a baixa permeabilidade durante a secagem contribui para que as camadas superficiais das peças atinjam um teor de umidade menor comparativamente as porções mais centrais, gerando tensões em virtude do acentuado gradiente de umidade. O mesmo autor cita que isso pode ocasionar colapso devido à baixa permeabilidade da madeira, além de rachaduras de superfície e topo em virtude do elevado gradiente de umidade. Tais defeitos tendem a aumentar com a elevação da temperatura de secagem principalmente até o término da retirada da água capilar.

Essa é a razão principal pela qual a madeira de eucalipto é conhecida como de secagem lenta e difícil, com alta propensão a defeitos como colapso e rachaduras. Quando a madeira é proveniente de plantios de rápido crescimento, tensões de crescimento podem agravar o problema, acentuando a incidência de

rachaduras e de empenamentos (SANTOS, JANKOWSKY e ANDRADE, 2003). Os mesmos autores enfatizam que a alternativa é buscar o desenvolvimento da tecnologia de secagem, visando soluções que permitam reduzir as perdas verificadas durante a secagem.

2.1.2 *Corymbia citriodora*

O *Corymbia citriodora* Hill & Johnson (Hook) ocorre naturalmente na Austrália em altitudes entre 80 e 800 m, com precipitação média anual variando de 625 a 1.000 mm (FERREIRA, 1979). As temperaturas máximas médias variam entre 29 a 35°C e as mínimas médias variam entre 5 a 10°C (BERTOLA, 2004).

A madeira apresenta elevada massa específica, assim como as propriedades de resistência mecânica, com cerne diferenciando-se do alburno (BERTOLA, 2004). De acordo com Ferreira (1979), possui alta estabilidade dimensional, baixa permeabilidade, muito utilizada em componentes estruturais para construção, caixotaria, postes, mourões, dormentes, lenha e carvão.

Segundo Marchiori e Sobral (1997), a madeira de *Corymbia citriodora* apresenta coloração castanho-clara ou castanho-acinzentada, possui massa específica de 0,93 e 1,04 g/cm³ em material procedente do Rio Grande do Sul e boa resistência à deterioração. Por suas características mecânicas favoráveis, indica-se para o desdobro em serrarias, postes e construção civil em geral, podendo ser torneada com facilidade.

Stangerlin et al. (2009) encontrou valor médio de 0,89 g/cm³ para massa específica aparente a 12% de *Corymbia citriodora*, enquanto que Sturion et al. (1987) encontraram valor médio de 0,71 g/cm³ para a massa específica básica. Lemos et al. (2012) obtiveram massa específica básica média de 0,59 g/cm³ para indivíduos com 15 anos de idade.

Lima et al. (1999) citam que as contrações nos planos radial, tangencial e a volumétrica para o *Corymbia citriodora*, foram 6,9, 9,4 e 18,2%, respectivamente. Deste modo, os autores encontraram valor médio de 1,36 para o coeficiente anisotrópico. Oliveira et al. (2010) obtiveram 7,1, 10,0 e 0,2% para as contrações nos planos radial, tangencial e axial, respectivamente. A contração volumétrica total apresentou valor médio igual a 18,3% e o coeficiente anisotrópico de 1,4. Lemos et al. (2012) encontraram contração volumétrica média para o *C. citriodora* de 15,51%.

Rosso (2006) verificou que a madeira de *Corymbia citriodora* necessita de maior tempo de secagem comparado com o *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*. Em relação ao tempo necessário para secagem do *Corymbia citriodora* utilizando método combinado, procedendo a secagem ao ar até o teor de umidade igual a 27% e concluindo a secagem até 12% em estufa convencional, a autora necessitou de aproximadamente 41 e 54 dias para o período do verão e inverno, respectivamente.

Stangerlin et al. (2009) observaram que o *C. citriodora* necessitou de 35 e 58 dias, respectivamente para a secagem em estufa solar e ao ar, para reduzir o teor de umidade de 60 e 62% para 15 e 21%, respectivamente para os dois métodos de secagem. A taxa de secagem média para a secagem em estufa solar e ao ar foi de 1,30 e 0,68 %/dia, respectivamente. O período foi superior ao verificado pelos mesmos autores para as demais espécies estudadas, evidenciando a dificuldade para remoção da água nesta espécie.

Quanto a qualidade da madeira de *C. citriodora* submetida à secagem, Rosso (2006), verificou que o índice de rachaduras de topo médio foi de 14,83% e 2,9%, respectivamente para o período do verão e inverno. Em relação às rachaduras de superfície a mesma autora verificou que 78,13% das peças submetidas à secagem no verão apresentaram tal defeito, enquanto que apenas 34,38% no período do inverno. Dentre as peças avaliadas, 15,63% apresentaram arqueamento na secagem conduzida no verão, não sendo verificada a presença de encanoamento e encurvamento.

Stangerlin et al. (2009) avaliando a qualidade da madeira de *C. citriodora*, verificaram que a secagem ocasionou um acréscimo médio no índice de rachadura de topo de 3,11 e 3,38% para a secagem ao ar e em estufa solar. Além disso, 60% das peças apresentam alguma rachadura superficial em razão da secagem na secagem ao ar e 27,3% para a secagem em estufa solar. Na avaliação de arqueamento, 7,27 e 9,10% das peças foram consideradas defeituosas pelos autores na secagem ao ar e em estufa solar, respectivamente, apresentando acréscimo médio na flecha de arqueamento de 0,22 e 0,19 mm/m. Os mesmos autores citam que não ocorreu acréscimo no encurvamento, com leve redução deste defeito na secagem em estufa solar, além de não verificar peças com colapso celular.

2.1.3 *Eucalyptus saligna*

O *Eucalyptus saligna* Smith é uma espécie nativa da costa leste da Austrália, ocorrendo naturalmente desde a baía de Bateman (36° latitude sul), sul de New South Wales, até o sudoeste de Queensland (27° latitude sul) (FORESTRY AND TIMBER BUREAU, 1962).

De acordo com Bertola (2004), a madeira do *Eucalyptus saligna* assemelha-se à do *Eucalyptus grandis*, é medianamente leve e fácil de ser trabalhada em operações de usinagem, de baixa estabilidade dimensional e elevada permeabilidade. A madeira é utilizada intensivamente como madeira de construção e matéria prima na fabricação de móveis, caixotaria, paletes, celulose e papel, chapas duras, painéis aglomerados, carvão e mourões. Além disso, é considerada uma das espécies mais versáteis e indicadas para uso múltiplo.

De acordo com Marchiori e Sobral (1997) a madeira é de coloração rosado-clara ou avermelhada, dura, resistente e de baixa durabilidade natural, apresenta massa específica superior a do *E. grandis*, alcançando 0,69 g/cm³. Apesar da dificuldade de secagem, indica-se para construções e mobiliário, sendo uma das mais cultivadas no sul do Brasil e muito utilizada em reflorestamentos para a indústria de celulose.

Diversos estudos foram realizados visando avaliar a massa específica da madeira de *E. saligna*. Tomazello Filho (1985) avaliando duas procedências de *E. saligna* com 10 anos de idade obteve valores médios de massa específica básica de 0,43 e 0,50 g/cm³. Sturion et al. (1987) verificou para a madeira de *E. saligna* valor médio de 0,56 g/cm³ para a massa específica básica. Trugilho et al. (1996) estudando as características da madeira de *E. saligna* aos 12, 24, 36 e 48 meses verificaram massas específicas básicas de 0,37, 0,44, 0,50 e 0,52 g/cm³, respectivamente. Pereira et al. (2000) obtiveram massas específicas básicas de 0,44, 0,53 e 0,55 g/cm³ para as idades de 9, 8 e 10,5 anos, respectivamente, enquanto que Stangerlin et al. (2009) obtiveram 0,69 g/cm³ para massa específica aparente.

Oliveira e Silva (2003) estudaram a madeira de *E. saligna* de 16 anos de idade e obtiveram contração radial, tangencial e volumétrica de 7,67%, 14,83% e 26,00% e coeficiente anisotrópico de 1,99. Malan (2000) obteve contração radial,

tangencial e volumétrica de 6,30%, 9,80% e 16,30%, respectivamente, e coeficiente anisotrópico de 1,56.

Batista (2009) obteve 0,46 g/cm³ para a massa específica básica, apresentando contração radial e tangencial de 5,03 e 9,82%, respectivamente, e contração volumétrica de 15,17%, coeficiente anisotrópico de 2,06, indicando assim que a espécie apresenta baixa estabilidade dimensional.

Quanto à utilização de testes preliminares a alta temperatura visando a elaboração de programas de secagem ou ainda apenas para obtenção de informações referentes às características da madeira na secagem, encontrou-se referências apenas para o *E. saligna*.

Brandão (1989) utilizando esta espécie obteve taxas de secagem desde a condição verde até 5% e verde até 30% de umidade de 0,94 g/h e 2,50 g/h, respectivamente, com umidade inicial de 91,8%. Klitzke e Batista (2010) obtiveram taxa de secagem de 0,0191, 0,0332 e 0,0131 g/cm².h para os intervalos desde a condição verde até 5%, de verde até 30% e de 30% até 5%, com teor de umidade inicial de 63,49%.

Batista (2010) em secagem convencional de *E. saligna* observou que 4,94 e 3,70% das peças avaliadas apresentaram rachaduras de topo e de superfície, respectivamente. Em 67,9% das peças o autor observou a ocorrência de algum tipo de empenamento

Rosso (2006) avaliando a secagem combinada de *E. saligna* em duas estações do ano necessitou 27 e 42 dias para atingir o teor de umidade de 15% no verão e inverno, respectivamente. Stangerlin et al. (2009) necessitaram de 22 e 33 dias para atingir 15,06 e 20,75% de teor de umidade, respectivamente para a secagem em estufa solar e ao ar, resultando numa taxa de secagem média de 2,70 e 1,66%/dia.

Rosso (2006) verificou que 3,12 e 9,38% das peças submetidas a secagem combinada foram consideradas defeituosas no verão e inverno, respectivamente, na avaliação de rachaduras de topo. Complementarmente, a mesma autora obteve índice de rachaduras de topo de 6,50 e 4,60% para o verão e o inverno, respectivamente. Em relação às rachaduras de superfície, 46,88 e 34,38% das peças apresentaram tal defeito na aplicação da secagem no verão e no inverno, respectivamente.

Stangerlin et al. (2009) não observaram ocorrência de peças defeituosas quanto a rachaduras de topo na secagem ao ar, enquanto que na secagem em estufa solar apenas 1,82% das peças foram consideradas defeituosas. O índice de rachaduras de topo foi de 1,60 e 1,77% para a secagem ao ar e em estufa solar, respectivamente. Na avaliação de rachaduras de superfície, os mesmos autores verificaram que 10,45% das peças submetidas à secagem ao ar apresentaram tal defeito e 10,91% na secagem em estufa solar.

Na avaliação qualitativa da madeira de *E. saligna* submetida a secagem, Stangerlin et al. (2009) verificaram que 23,64% das peças apresentam arqueamento acima de 5mm/m após a secagem ao ar e 30,91% em estufa solar, com flecha média de 3,67 mm/m para este último método e 3,08 mm/m para aquele. Rosso (2006) obteve 37,5% de peças com arqueamento após a secagem para as duas épocas do ano, com flecha média igual a 4,09 e 4,69 mm/m para a avaliação no verão e no inverno, respectivamente. Ambos os autores encontraram valores baixos para a flecha média de encurvamento, o que não resultou em peças defeituosas, ocorrendo até mesmo a redução deste defeito após a secagem. Simpson (1991) afirma que o encurvamento não é um defeito problemático na secagem da madeira, uma vez que este pode ser facilmente eliminado durante o processo de empilhamento da carga de madeira.

Tanto Rosso (2006) quanto Stangerlin et al. (2009) não verificaram peças com encanoamento e colapso celular para a secagem combinada e ao ar e em estufa solar, respectivamente. Todavia, Batista (2010) utilizando secagem convencional verificou que 28,40% das peças apresentaram colapso celular após a secagem.

2.1.4 *Eucalyptus robusta*

Na Austrália, ocorre naturalmente no litoral de New South Wales e no sul de Queensland, entre as latitudes de 23 a 36°S, com a altitude predominantemente ao nível do mar. A precipitação pluviométrica média anual varia de 1.000 a 1.500mm, com chuvas concentradas no verão. O período seco não ultrapassa quatro meses, com temperatura média máxima entre 30 a 32°C e a temperatura média mínima entre 3 a 5°C, com geadas que podem ocorrer com intensidade de 5 a 10 dias por ano (BERTOLA, 2004).

Segundo Little Jr. e Skolmen (1989), as árvores de *Eucalyptus robusta* são consideradas medianamente altas, podendo atingir 48 metros, com diâmetro que pode alcançar 1,2m e tronco retilíneo até aproximadamente 2/3 da altura total da árvore. Possui casca espessa, escamosa, enrugada em longos sulcos, de textura fibrosa e resistente, de coloração marrom avermelhada em locais úmidos e castanho acinzentado em locais secos.

Embora a área de ocorrência natural na Austrália seja restrita ao litoral, esforços foram realizados para a introdução da espécie fora das condições de sua zona natural. Os resultados foram bastante satisfatórios, com a espécie apresentando alta plasticidade, adaptando-se a solos hidromórficos ou francamente arenosos, em diferentes altitudes. É considerada apta para regiões onde não ocorrem geadas e situações de déficits hídricos severos. (BERTOLA, 2004).

Segundo o IPEF (2004), o *Eucalyptus robusta* pode ser plantado com êxito em solos hidromórficos, com clima que pode variar de quente e úmido a frio e sua madeira é indicada para a serraria, laminação, construções e dormentes. Bertola (2004) cita que a madeira é medianamente leve, de relativa estabilidade dimensional, média permeabilidade e propriedades de resistência mecânica moderadas. No Brasil, a espécie não tem sido plantada intensivamente e poucos trabalhos têm sido realizados.

A madeira de *Eucalyptus robusta* apresenta uma característica peculiar relatada por Skolmen e Gerhards (1964), denominada de cerne quebradiço que envolve o centro da árvore, próximo à medula. Os mesmos autores afirmam que a madeira dessa porção apresenta resistência ao choque extremamente baixa, com valores próximos a 29% da resistência normal da espécie. Skolmen (1973) estimou que 18,5% do volume total de madeira serrada da espécie é cerne quebradiço, sendo o mais adequado descartar esse material para a maioria das finalidades. Complementarmente, o cerne quebradiço normalmente apresenta sérios defeitos após a secagem, o que limita a utilização da mesma em plantios.

Skolmen (1971) afirma que a madeira apresenta tensões de crescimento, o que aumenta a possibilidade de ocorrência de rachaduras de topo nas toras, sendo recomendado adotar técnicas e equipamentos adequados, visando minimizar tais defeitos. De acordo com Skolmen (1964), a secagem de *Eucalyptus robusta* pode ser conduzida combinando a secagem ao ar até 30% de teor de umidade com

secagem em estufa para obter o teor de umidade final desejado sem que ocorra uma significativa queda na qualidade da madeira.

Youngs (1960) encontrou valores médios para a massa específica de *E. robusta* de 0,60 g/cm³, enquanto que Skolmen (1964) obteve 0,66 g/cm³, ambos utilizando madeiras provenientes de plantios no Havaí. Youngs (1960) obteve contrações de 6,7 e 2,9% para os planos tangencial e radial, respectivamente na secagem ao ar até teor de umidade igual a 12%. Na secagem em estufa até massa constante, a contração no plano tangencial e radial foi de 10,7 e 6,1%, respectivamente, e coeficiente anisotrópico de 1,75.

2.2 Secagem da madeira

A secagem da madeira é o processo que consiste na redução da umidade, com o objetivo de atingir um teor de umidade pré-determinado, com o mínimo de defeitos, no menor tempo possível e de uma forma economicamente viável para o uso a que se destina (MARTINS, 1988).

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

De acordo com Andrade (2000), o calor é transferido do ar para a superfície da madeira por convecção e, após esta ser aquecida, o calor é transferido para o interior da mesma por condução. No início da secagem, quando a madeira está úmida, o fator mais importante é a transferência de calor do ambiente para a superfície. Com a perda de umidade da madeira, a transferência de calor da superfície para o interior torna-se o fator limitante, e por isso que altas velocidades de ar são mais importantes na fase inicial de secagem comparativamente que ao final.

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

Segundo Baker (1956), a água na madeira se movimenta de regiões de alta umidade para aquelas de baixa umidade, implicando que a parte externa da madeira

deve estar mais seca do que seu interior para que ocorra a secagem. Os elementos situados na superfície cedem água para o ar que a envolve, sendo que, quanto mais alta for a temperatura, menor a umidade relativa e maior a velocidade de deslocamento do ar, mais rápida será a secagem.

Deste modo, começa a se formar um gradiente de umidade que, segundo Perelygin (1965) reflete-se nas diferentes umidades de uma peça de madeira ao longo de suas dimensões (largura, espessura e comprimento). Esta irregularidade na distribuição da umidade é mais acentuada em tábuas grossas, necessitando-se de mais tempo para sua uniformização.

De acordo com Baker (1956), Kollmann e Côté Jr. (1968), Siau (1984) e Skaar (1988), quando a madeira está perdendo umidade, várias forças agem simultaneamente na movimentação da água, com ênfase para a capilaridade e a difusão. A capilaridade atua na movimentação da água no estado líquido, através de capilares representados na madeira principalmente pelos lumes e pontoações, além de fibras, traqueídeos e outros elementos anatômicos. Segundo os mesmos autores, a tensão capilar é decorrente da tensão superficial na interface gás/líquido e inversamente proporcional ao raio do capilar.

O movimento da água higroscópica pode ser considerado como um fenômeno de difusão (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985), onde a água está adsorvida na superfície e no interior da parede celular, ligada aos componentes básicos da madeira, sobretudo por pontes de hidrogênio. De acordo com Oliveira (1981), as moléculas de água movimentam-se de regiões com elevadas concentrações para regiões com baixas concentrações. Assim como a velocidade de difusão da água higroscópica depende do gradiente de umidade, a difusão do vapor d'água é função do gradiente de pressão. No interior da madeira, a pressão de vapor aumenta de acordo com a elevação da umidade até o ponto de saturação das fibras (PSF).

Durante a secagem, é possível dizer que os mecanismos de movimentação por difusão de vapor d'água e de água higroscópica e capilar são realizados simultaneamente (OLIVEIRA, 1981). Segundo Andrade (2000), a difusão da água higroscópica ocorre até o instante em que a molécula de água atinge a cavidade celular. Quando isto acontece, a água, em estado de vapor, começa a se movimentar por difusão através do ar contido no lume. Durante o seu percurso para a superfície da madeira, a água no estado de vapor é novamente adsorvida por outra parede celular, ocorrendo novamente o mecanismo de difusão da água

higroscópica. Esta combinação de mecanismos ocorrerá repetidamente até que a molécula de água atinja a superfície da madeira.

2.3 Secagem convencional

Na secagem convencional em estufas, têm-se o controle da temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, com temperaturas entre 40°C e 90°C, circulação forçada de ar, sistema de umidificação e troca do ar (JANKOWSKY et al., 2003). Os mesmos autores citam que o objetivo principal da secagem artificial é promover o equilíbrio entre a velocidade de evaporação da água na superfície da madeira, a taxa de movimentação interna de calor e umidade e as reações da madeira durante o processo, de modo que a secagem seja o mais rápida possível e com um nível de perdas ou um padrão aceitável para o produto que se pretende.

A secagem convencional é conduzida em estufas ou secadores, com total controle das condições internas da mesma. Segundo STCP (1990), este é o processo de maior aplicação na indústria madeireira. As estufas de secagem convencional podem ser definidas como câmaras de secagem que operam com temperaturas entre 35°C e 90°C, dotadas de um sistema de aquecimento, um sistema de umidificação do ar, um conjunto de “dampers” ou janelas, que permitem a troca de ar entre o interior da estufa e o meio externo, e um sistema de ventilação, que promove a circulação do ar através das pilhas de madeira (PRATT, 1974).

Os secadores convencionais são os mais utilizados especialmente para a secagem da madeira de folhosas. O sistema de aquecimento mais comum utiliza uma bateria de trocadores de calor, podendo utilizar como fluido térmico ar quente, água quente, vapor d'água ou óleo térmico. A umidificação do ar é realizada pela liberação de vapor de baixa pressão ou pela aspersão de água fria dentro do secador. A circulação do ar é promovida por um conjunto de ventiladores, posicionados lateralmente em relação às pilhas de madeira ou sobre o falso teto acima das pilhas. Os “dampers” ou janelas são colocados de tal forma que a ação dos ventiladores faz com que o ar quente e úmido do interior do secador seja expelido, com entrada de ar do meio externo (JANKOWSKY, 1995).

Conforme Tuset e Duran (1986) a secagem convencional apresenta como principais vantagens a independência das condições climáticas, a menor duração

em relação à secagem ao ar livre, o maior controle sobre os defeitos e a umidade final, a adequação a todo tipo de madeira e a ampla experimentação disponível.

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

O processo de secagem convencional é influenciado por fatores da própria madeira, como a massa específica, estrutura anatômica, teor de umidade e espessura e aos inerentes do ambiente em que a madeira está condicionada, como a temperatura da câmara de secagem, umidade relativa do ar, velocidade do ar e potencial de secagem do programa empregado.

A quantidade de água retirada em um 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).

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

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

à espessura das tábuas. Além disso, Rasmussem (1961) frisa que as tábuas mais espessas tendem a apresentar mais defeitos.

2.3 Defeitos de secagem

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

Os defeitos resultantes da secagem, além de reduzirem o valor de mercado da madeira, geram desinteresse quanto à utilização de espécies refratárias. Esse fato contribui, em parte, para a exploração seleta e de um pequeno número de espécies (MARTINS, 1988).

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

Hildebrand (1970) e Galvão e Jankowsky (1985) frisam que, para reduzir o período de secagem e minimizar os defeitos, a recomendação geral é secar uma espécie por vez e com peças de mesma espessura e qualidade. Além disso, a madeira da carga deve ter, aproximadamente, a mesma umidade no início da secagem.

Ponce e Watai (1985) destacam que a seleção e o uso adequado dos separadores reduzem sensivelmente os empenamentos das tábuas, favorecendo que a secagem transcorra de maneira mais rápida e uniforme.

Para reduzir os empenamentos das tábuas durante a secagem, as fileiras de separadores devem ser alinhadas verticalmente.

De acordo com Mendes et al. (1998), os principais defeitos gerados durante o processo de secagem são os empenos, as rachaduras, o colapso e o endurecimento superficial (Figura 2).

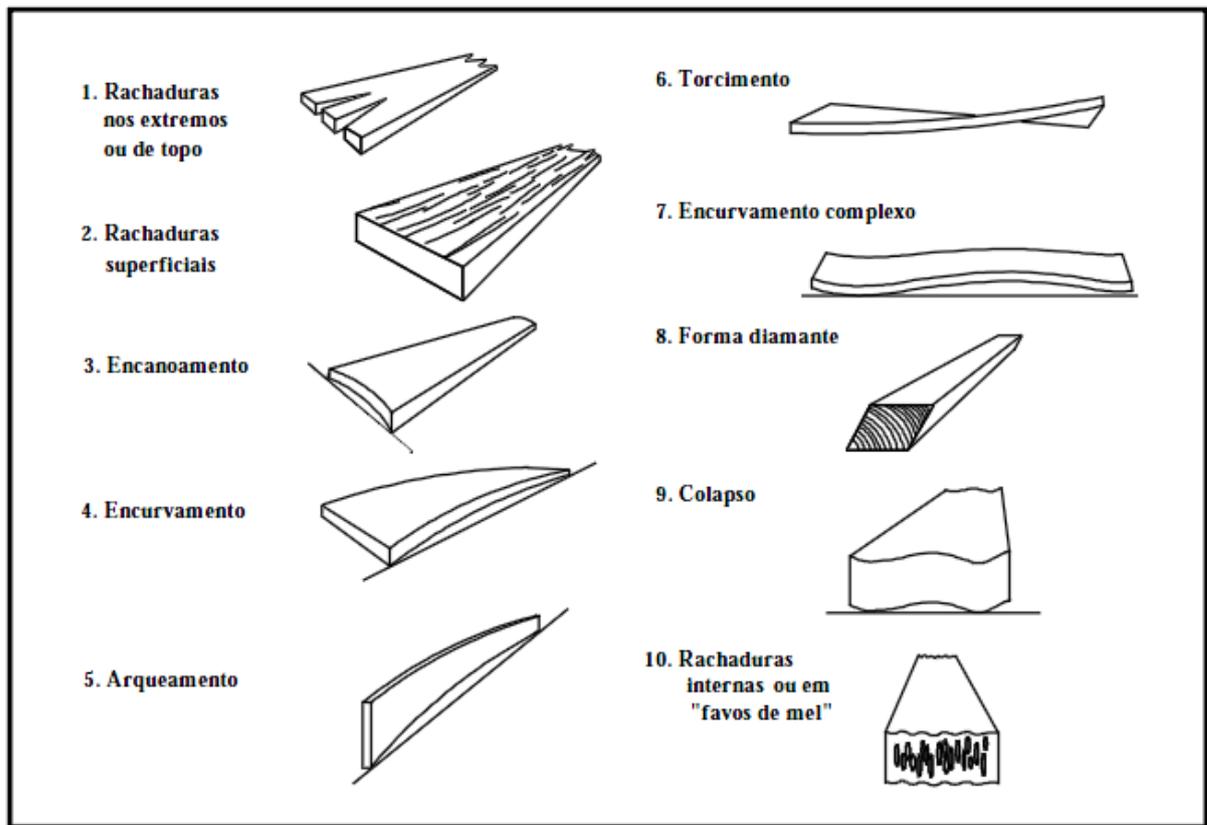


Figura 2: Defeitos de secagem

Fonte: Mendes et al.,1998.

Vermaas (1998) cita que os principais defeitos da secagem de eucalipto são as rachaduras e o colapso. Além destes, é importante o controle de outros defeitos, como empenamentos e endurecimento superficial.

2.3.1 Rachaduras

De acordo com Oliveira (1981) e Galvão e Jankowsky (1985), as rachaduras aparecem como consequência da diferença de retração nas direções radial e tangencial da madeira e da diferença de umidade entre regiões contíguas de uma peça, durante o processo de secagem. Santini (1992) complementa afirmando que as rachaduras são separações dos elementos constituintes da madeira no sentido longitudinal da grã. Existem três tipos de rachaduras: de topo, superficiais e internas.

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

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

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

A avaliação das rachaduras de topo pode ser realizada através da determinação do Índice de Rachaduras de Topo (IRT), que considera o somatório de todas as rachaduras de topo de uma face da peça em relação ao comprimento da mesma.

2.3.2 Empenamentos

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

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

- d) Torcimento: as causas podem ser as mesmas do encanoamento, podendo também ser gerado pela combinação de contrações diferentes e desvios da grã (espiralada, diagonal, inter cruzada, ondulada);
- e) Forma diamante: defeito característico de peças com secção quadrada, resultante da diferença entre as contrações tangencial e radial, quando os anéis de crescimento vão, diagonalmente, de um canto ao outro da secção;

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

2.3.3 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). O colapso ocorre acima do ponto de saturação das fibras e, por isso, se dá, geralmente, no início da secagem (KEEY et al., 2000).

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

O colapso é um defeito grave e deve ser evitado, se possível. O uso de programas de secagem especiais, planejados para minimizar esse defeito é recomendado (SIMPSON, 1991). Todavia, Ellwood et al. (1960), Ellwood et al. (1961) e Blumhm e Kauman (1965) citam que é possível realizar a recuperação do colapso aplicando alguns procedimentos e observando alguns aspectos, dentre eles:

- O teor de umidade médio da madeira deve estar entre 15% e 20%, preferencialmente em 17%;

- A madeira não deve conter gradientes de umidade muito fortes, de modo que nenhuma parte deve conter mais que 25% de teor de umidade e nem menos que 12%. Se os gradientes de umidade dentro das tábuas forem elevados, é vantajoso molhar a madeira antes do tratamento. Em casos extremos, é conveniente armazenar a madeira por cerca de três semanas antes da aplicação do tratamento para reversão do colapso, para permitir que a umidade esteja mais uniforme;
- O tratamento deve ser realizado a temperatura de 100°C e 100% de umidade relativa;
- Não é recomendado fazer pilhas muito altas, para evitar que, pelo peso, os separadores causem rachaduras nas tábuas das posições inferiores;
- Cuidar para que a água condensada no teto da câmara não caia em cima das tábuas, o que pode causar manchas nas mesmas.

Esses autores recomendam, para madeiras de uma polegada de espessura, um tempo de recuperação do colapso entre 2 e 6 horas, enquanto que, para madeiras de duas polegadas, entre 6 e 12 horas.

2.4 Gradientes de umidade

A água na madeira se movimenta de regiões de alta umidade para as de baixa umidade, desse modo, a parte externa da madeira deve estar mais seca do que seu interior para que ocorra secagem. Os elementos situados na superfície cedem água para o ar que a envolve mais rapidamente quanto mais alta for a temperatura, menor a umidade relativa e maior a velocidade do ar. Após a diminuição da umidade da superfície, ocorre movimentação da umidade do interior para a parte externa (BAKER, 1956).

Desse modo, forma-se o gradiente de umidade que, segundo Perelygin (1965), consiste na diferença entre o teor de umidade de uma peça de madeira ao longo de suas dimensões (largura, espessura e comprimento). Essa irregularidade na distribuição da umidade é mais acentuada em tábuas grossas, necessitando-se de mais tempo para sua uniformização.

Para Klitzke (2005), o gradiente de umidade é a diferença entre o teor de umidade do centro da peça e da superfície, significando que quanto maior a diferença entre o teor de umidade da superfície e do centro, mais elevado será o gradiente de umidade. Quanto maior a diferença entre o teor de umidade da

superfície e do centro de determinada peça, mais rapidamente a madeira perderá umidade. Desse modo, em uma situação com gradiente de umidade elevado, o tempo de secagem será inferior, e por consequência os custos da etapa de secagem serão menores. No entanto a qualidade da madeira também será alterada negativamente com a presença de gradientes de umidade elevados.

De acordo com Hart (1966), tanto o gradiente de umidade como as tensões internas são importantes na secagem racional da madeira, estando intimamente associados com a sua permeabilidade natural.

De acordo com Fernandes e Galvão (1978), a velocidade da secagem está diretamente relacionada com a inclinação do gradiente de umidade durante a secagem. Além disso, esse gradiente decresce à medida que a secagem progride, diminuindo também a velocidade da mesma.

Porém, Jankowsky e Henriquez (1983) advertem que é importante ressaltar que, durante esse processo devido a retração da madeira em função da dessorção de umidade, surgem tensões internas capazes de ocasionarem defeitos, tais com rachaduras superficiais e encruamentos.

Na secagem artificial da madeira, é importante estabelecer um gradiente de umidade adequado, que determina o tempo de secagem sem risco de ocasionar danos à madeira. O gradiente de umidade elevado reduz a umidade abaixo do PSF nas partes externas da peça de madeira, as quais ficam impedidas de se contraírem porque as camadas internas ainda contêm muita água livre, gerando tensões na madeira, que podem ocasionar deformações. Interrupções na circulação da água pela formação de uma camada muito seca que obstrui o fluxo capilar da umidade, originando o fenômeno conhecido como endurecimento superficial, podem causar rachaduras internas ou de superfície (KLITZKE, 2005).

2.5 Programas de secagem

De acordo com Klitzke (2005), a secagem artificial é realizada através da circulação de ar quente e seco, de modo uniforme através da pilha de madeira. Todavia, a velocidade da secagem e o risco de defeitos durante a secagem são distintos dependendo das características estruturais das espécies. Por esta razão, as madeiras de diferentes espécies requerem condições distintas durante a etapa de secagem, gerando a necessidade de programações diferenciadas para manter em

um nível ideal as condições internas da estufa, buscando-se o equilíbrio entre a velocidade da secagem e o nível de perdas.

Para aperfeiçoar a secagem em termos temporais e reduzir a incidência de defeitos dessa etapa, foram elaborados programas adequados para cada espécie. É recomendável considerar as dimensões do material durante a escolha, adaptação ou elaboração do programa de secagem.

Segundo Oliveira (1981), o programa de secagem é uma sequência de interferências ou ações que são realizadas durante a secagem por meio do controle da temperatura e da umidade relativa. O programa de secagem é elaborado experimentalmente, sendo seus objetivos a secagem rápida da madeira e a garantia de qualidade do material ao final da secagem.

Os principais aspectos envolvidos na escolha de um programa de secagem são a espécie (massa específica, permeabilidade, contração, entre outras), a umidade inicial e final, espessura do material, utilização final do produto e o equipamento utilizado para a secagem (MARTINS, 1988). No entanto, segundo Jankowsky, Santos e Andrade (2003) a velocidade de secagem depende mais das características da madeira do que da temperatura ou umidade relativa do ambiente.

A umidade relativa do ar e a temperatura são variáveis necessárias para conduzir a secagem. Para que a condução da secagem da madeira seja realizada adequadamente, o equipamento deve apresentar capacidade para manter as condições preestabelecidas pelo programa, bem como o operador conhecer as características do material e o funcionamento do equipamento. Em estufa convencional normalmente utiliza-se o psicrômetro para medir as condições climáticas do interior da mesma. Em função da umidade da madeira controla-se a temperatura e a umidade relativa da câmara (KLITZKE, 2005).

De uma forma geral, podem ser conceituadas três fases distintas nos programas de secagem: fase de aquecimento inicial, fase de secagem propriamente dita e fases de controle de qualidade (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985; KLITZKE, 2005).

Os programas do tipo umidade-temperatura são os mais comuns na secagem convencional, onde a temperatura e a umidade relativa do ar no interior do secador são ajustadas em função do teor de umidade da madeira (HILDEBRAND, 1970; PRATT, 1974; GALVÃO e JANKOWSKY, 1985). Os programas de secagem, de acordo com os mesmos autores, apresentam, de modo geral, três fases distintas:

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

b) Secagem propriamente dita: nessa fase ocorre a retirada de umidade da madeira. Inicialmente, procede-se à remoção da água capilar, a baixas temperaturas e altas umidades relativas, para minimizar a ocorrência de colapso e rachaduras. Tanto a temperatura quanto a umidade relativa inicial dependerá da espécie em secagem. Recomenda-se que a temperatura inicial seja mantida até que toda a água capilar da madeira seja removida. A retirada da água higroscópica caracteriza-se pela elevação da temperatura com a redução simultânea da umidade relativa. O período de tempo a ser despendido com a remoção da água higroscópica irá variar de acordo com a massa específica da espécie, espessura das peças, temperatura utilizada, potencial de secagem e gradiente de umidade.

c) Controle de qualidade: compreende as fases de uniformização e condicionamento, buscando homogeneizar a umidade entre as peças e dentro das peças, respectivamente. Tem por objetivo eliminar ou reduzir as tensões internas, através do reumedecimento das camadas superficiais. As tensões internas podem ser eliminadas com a redução do gradiente de umidade.

De acordo com STCP (1990), cada espécie apresenta um melhor comportamento a uma determinada temperatura e umidade relativa. Os programas de secagem para madeira de eucalipto têm por característica comum a recomendação de baixas temperaturas, principalmente no início do processo, e potencial de secagem suave (JANKOWSKY et al., 2003).

De acordo com Denig (1994), mudanças bruscas de temperatura e umidade de equilíbrio podem favorecer a ocorrência de defeitos. Um exemplo é a ocorrência de rachaduras superficiais quando as amostras chegarem próximas do PSF, onde acontece uma mudança muito drástica nas condições de secagem. Por outro lado, as mudanças suaves nas condições de secagem mantêm a velocidade e o potencial de secagem aproximadamente constantes, diminuindo a probabilidade de ocorrência de defeitos.

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

A partir de estudos desenvolvidos por Terazawa (1965), Brandão (1989) propôs uma metodologia para elaborar programas de secagem, baseada na relação entre os defeitos decorrentes de uma secagem a 100°C e os parâmetros do programa de secagem (temperatura inicial, temperatura final e potencial de secagem). Esses estudos envolvem a hipótese de que pequenas amostras de madeira, quando submetidas a condições severas de secagem, irão apresentar defeitos, taxa e velocidade de secagem em um nível proporcional ao esperado em uma secagem convencional.

Ciniglio (1998) desenvolveu programas de secagem para *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, adaptando a metodologia descrita por Brandão (1989). Os resultados foram considerados satisfatórios, com reduzida ocorrência de defeitos. Outros autores utilizaram a mesma metodologia para o desenvolvimento de programas de secagem (ANDRADE et al., 2001; BARBOSA et al., 2005; BATISTA, 2009).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Obtenção e preparo do material

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Produtos Florestais (LPF), pertencente ao Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Santa Maria (DCFL-UFSM). Para a realização do estudo, utilizaram-se madeiras de *Eucalyptus robusta* Sm., *Eucalyptus saligna* Smith. e *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson.

O material utilizado foi obtido em povoamentos com idade média de 40 anos pertencentes a Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária – Centro de Pesquisa em Recursos Florestais (FEPAGRO FLORESTAS), localizado no Distrito de Boca do Monte, Santa Maria. Para tal, foram selecionadas árvores adultas de modo aleatório, observando aspectos como a sanidade do indivíduo, fuste limpo, retilíneo e sem bifurcação, e diâmetro à altura do peito (DAP) superior a 30 cm. Além disso, buscou-se evitar a seleção de árvores próximas à borda dos plantios.

Para cada espécie foram utilizadas no mínimo, três árvores, das quais foram retiradas as duas primeiras toras com 2,8 m de comprimento. Portanto, utilizou-se 18 toras, seis para cada espécie.

As toras foram desdobradas na FEPAGRO FLORESTAS, utilizando um engenho de serra, adotando o sistema de cortes tangenciais para a confecção das tábuas. As peças foram cortadas com dimensões de 280 cm x 15 cm x 2,5 cm (comprimento, largura e espessura). Após o desdobro, todas as tábuas obtidas foram transportadas até o LPF.

3.2 Testes prévios

A realização dos estudos prévios referentes às espécies ocorreu em virtude da necessidade de informações preliminares acerca das mesmas, além do levantamento de dados para a elaboração do programa de secagem específico para cada uma das espécies utilizadas.

É necessário citar que também foram realizados testes preliminares com a estufa de secagem, com o intuito de conhecer seu funcionamento e características

específicas, visando mais facilidade de compreensão, gerenciamento e controle do processo de secagem.

3.2.1 Confeção dos corpos de prova

Para cada espécie, foram utilizadas cinco tábuas, selecionadas de modo que todos os exemplares abatidos estivessem representados nesta etapa. Buscou-se selecionar, também, pelo menos, uma peça orientada radialmente e outra tangencialmente, na tentativa de melhorar a representatividade do material, de modo a incluir o máximo possível da variação nele existente.

As peças selecionadas foram aplainadas até a espessura desejada (10 mm) e, posteriormente, foram confeccionados quatro corpos de prova de cada uma delas (Figura 3). Foi desenvolvido um gabarito especificamente para tal finalidade, visando tornar o processo de marcação dos corpos de prova eficiente.



Figura 3: Marcação das amostras após o aplainamento das peças.

Fonte: o autor (2012).

Em seguida, os corpos de prova foram seccionados para a aplicação da metodologia de secagem drástica a 100°C desenvolvida por Brandão (1989) (A),

determinação do teor de umidade inicial (B) e massa específica básica (C), conforme o esquema da Figura 4.

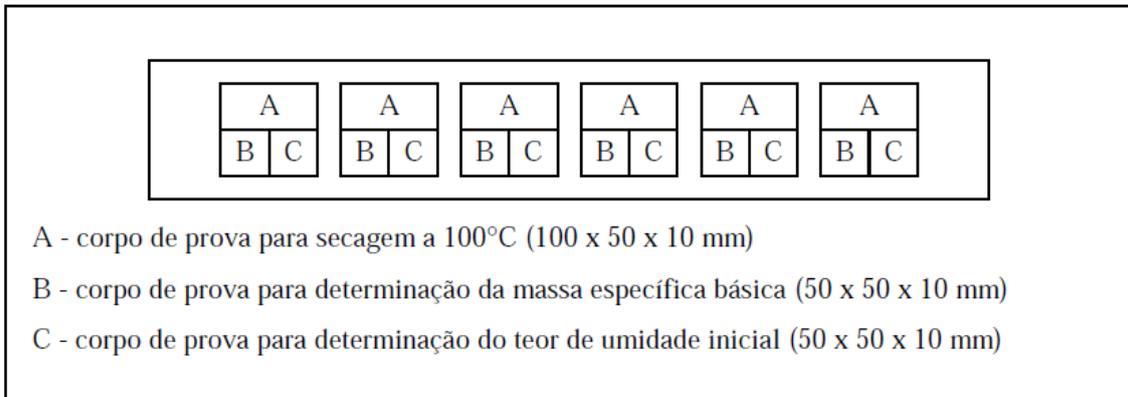


Figura 4: Esquema de retirada dos corpos de prova.

Fonte: Andrade, 2000.

Para cada um dos ensaios, foram utilizadas 20 amostras por espécie, e tais amostras podem ser observadas após o seccionamento na Figura 5.



Figura 5: Amostras para realização das avaliações preliminares.

Fonte: o autor (2012).

Após a confecção dos corpos de prova destinados para a secagem a 100°C, os mesmos tiveram suas massas determinadas e mensurado e identificado suas dimensões para que as avaliações subsequentes fossem realizadas exatamente no mesmo ponto da anterior. As amostras destinadas à determinação do teor de umidade inicial tiveram a massa úmida obtida e, posteriormente, foram submetidas à secagem em estufa a 103°C até atingirem massa constante.

3.2.2 Massa específica básica e aparente

Visando caracterizar o material utilizado, realizou-se a determinação das massas específica básica (ρ_b) e aparente, a 12% de teor de umidade (ρ_a), utilizando as Equações 1 e 2, respectivamente.

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_{sat}} \quad (1)$$

ρ_b = Massa específica básica (g/cm³);

M_s = Massa seca (g);

V_{sat} = Volume saturado (cm³).

$$\rho_a = \frac{M_{12}}{V_{12}} \quad (2)$$

ρ_a = Massa específica aparente (g/cm³);

M_{12} = Massa a 12% de teor de umidade (g);

V_{12} = Volume a 12% de teor de umidade (cm³).

Para determinar a massa específica aparente a 12%, os corpos de prova foram levados à câmara climatizada, a temperatura de 20°C e umidade relativa de 65%, onde permaneceram até atingirem massa constante. Para obtenção da massa seca, os corpos de prova foram submetidos à secagem em estufa de circulação de ar a temperatura de 103°C até apresentarem massa constante.

3.2.3 Determinação do teor de umidade inicial

Para a determinação do teor de umidade inicial, empregou-se o método gravimétrico, descrito em diversos manuais de secagem (Rasmussen, 1961; Pratt, 1974; Galvão e Jankowsky, 1985), em que as amostras úmidas foram submetidas à secagem em estufa a 103°C, até atingirem massa constante. Em seguida, foi aplicada a Equação 3 para obtenção do teor de umidade inicial (TU_i).

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

TU_i = teor de umidade inicial (%);

Mu = massa úmida da amostra (g);

Ms = massa seca da amostra (g).

As amostras para o monitoramento do teor de umidade utilizadas na aplicação dos programas de secagem foram retiradas a uma distância mínima de 50 cm do topo da peça. As amostras de controle do teor de umidade foram seccionadas com dimensões nominais de 100 cm x 15 cm x 2,5 cm, de comprimento, largura e espessura, respectivamente. O teor de umidade inicial das amostras de controle foi determinado através do teor de umidade médio de duas seções retiradas de cada topo da amostra de controle. Essas seções possuíam 2,5 cm x 15,0 cm x 2,5 cm, de comprimento, largura e espessura, respectivamente. Os procedimentos realizados estão ilustrados esquematicamente na Figura 6.

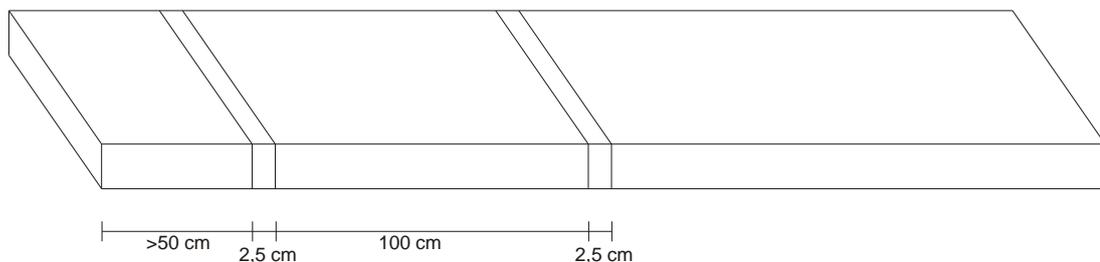


Figura 6: Esquema para retirada das amostras de controle.

Fonte: o autor (2012).

As amostras foram marcadas e tiveram suas respectivas massas e dimensões mensuradas. Em seguida, aplicou-se tinta plástica no topo das mesmas, visando reduzir a perda de água durante a secagem, visto que essas amostras possuem dimensões no sentido longitudinal menores que as tábuas submetidas à secagem. As peças foram distribuídas na pilha, observando para que as mesmas fossem alocadas em posições de fácil acesso, para que fossem retiradas durante a secagem.

3.3 Secagem drástica

Os 20 corpos de prova de cada espécie foram submetidos à secagem drástica, a 100°C, em estufa de laboratório com circulação de ar, até que os mesmos atingissem massa constante. Desse modo, foi possível obter o teor de umidade inicial exato, bem como estimar as variáveis necessárias para a obtenção dos parâmetros dos programas de secagem.

Durante a secagem drástica, as amostras tiveram suas massas determinadas e suas dimensões mensuradas, além de ter sido verificada a manifestação de rachaduras de topo e de colapso celular. O intervalo entre duas medições consecutivas apresentou variação de uma hora, no início do ensaio, chegando, no máximo, a 6 horas, após o teor de umidade das amostras atingir 5%. Essa variação no tempo entre as medições ocorreu em virtude da maior perda de massa no início da secagem, em relação ao final do processo.

Durante a secagem drástica, realizaram-se avaliações periódicas que consistiram na determinação da massa das amostras, mensuração das dimensões das mesmas e verificação visual da presença de rachaduras e de manifestação de colapso.

3.3.1 Taxa de secagem

Utilizando os dados das avaliações periódicas dos testes preliminares, foi determinada a taxa de secagem (Equação 4), recomendada por Santini (1980). Com o intuito de proceder à comparação de tal variável entre as espécies, obteve-se a

mesma para os intervalos compreendidos entre a condição verde e 30%, verde e 5%, verde e 0%, entre 30% e 5%, 30% e 0% e entre 5% e 0%.

$$TS = \left(\frac{\Delta m}{(A_{TS} * \Delta t)} \right) \quad (4)$$

TS = Taxa de secagem (g/cm².h);

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

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

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

3.3.2 Retratibilidade

As deformações específicas de retração ou retratibilidade, nos planos anatômicos axial ($\epsilon_{r,1}$), radial ($\epsilon_{r,2}$) e tangencial ($\epsilon_{r,3}$), foram estimadas de acordo com a norma NBR 7190 (ABNT, 1997), utilizando as Equações 5, 6 e 7, respectivamente.

$$\epsilon_{r,1} = \left(\frac{L_{1sat} - L_{1seca}}{L_{1sat}} \right) * 100 \quad (5)$$

$\epsilon_{r,1}$ = Retração no plano axial (%);

L_{1sat} = Dimensão saturada no plano axial (mm);

L_{1seca} = Dimensão seca no plano axial (mm).

$$\epsilon_{r,2} = \left(\frac{L_{2sat} - L_{2seca}}{L_{2sat}} \right) * 100 \quad (6)$$

$\epsilon_{r,2}$ = Retração no plano radial (%);

L_{2sat} = Dimensão saturada no plano radial (mm);

L_{2seca} = Dimensão seca no plano radial (mm).

$$\epsilon_{r,3} = \left(\frac{L_{3sat} - L_{3seca}}{L_{3sat}} \right) * 100 \quad (7)$$

$\epsilon_{r,3}$ = Retração no plano tangencial (%);

L_{3sat} = Dimensão saturada no plano tangencial (mm);

L_{3seca} = Dimensão seca no plano tangencial (mm).

3.3.3 Variação volumétrica máxima

A variação volumétrica (Δ_{vol}) foi determinada em função das dimensões dos corpos de prova, nas condições saturada e seca, utilizando a Equação 8, de acordo com a norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

$$\Delta_{vol} = \left(\frac{Vol_{sat} - Vol_{seco}}{Vol_{seco}} \right) * 100 \quad (8)$$

Δ_{vol} = Variação volumétrica (%);

Vol_{sat} = Volume saturado do corpo de prova (mm);

Vol_{seco} = Volume seco do corpo de prova (mm).

3.3.4 Coeficiente de anisotropia

Complementarmente, foi estimado o coeficiente de anisotropia (CA), que é a razão entre as contrações nos planos tangencial e radial, utilizando a Equação 9, de acordo com a norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

$$CA = \frac{\epsilon_{r,3}}{\epsilon_{r,2}} \quad (9)$$

CA = Coeficiente anisotrópico;

$\epsilon_{r,3}$ = Retração no plano tangencial (%);

$\epsilon_{r,2}$ = Retração no plano radial (%).

3.3.5 Verificação de rachaduras

A presença de rachaduras de topo foi verificada de forma visual, e as mesmas foram mensuradas em unidades para cada amostra. Tal procedimento foi realizado

em todas as avaliações durante a aplicação da secagem drástica, independente do teor de umidade das amostras (Figura 7).



Figura 7: Manifestação de rachadura de topo em *Eucalyptus saligna*.

Fonte: o autor (2012).

3.3.6 Avaliação do colapso

A avaliação do colapso foi realizada apenas para *Eucalyptus robusta*, visto que não foi verificada a manifestação de tal defeito nas madeiras de *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora*.

O colapso foi classificado pela diferença entre a espessura nominal da peça (E_n) em um determinado instante e a menor espessura medida (E_m). Todavia, o colapso não foi considerado para a elaboração dos programas de secagem, pois as equações utilizadas não contemplaram tal variável.

Apesar de o colapso não ser uma variável considerada na metodologia utilizada para a elaboração dos programas de secagem, a manifestação do colapso foi classificada de acordo com a Tabela 1, adaptando a recomendação de Welling, (1994) em virtude da espessura do material. Tal verificação foi importante para observar uma tendência do comportamento das espécies, visto que a tendência

apresentada quanto a esse defeito nos testes preliminares foi igualmente observada na secagem.

Tabela 1. Classificação do colapso na avaliação preliminar.

Classificação	Diferença entre E_n e E_m (mm)
Leve	0,00 – 1,0
Moderado	1,01 – 2,0
Severo	2,01 – 3,0

Em que: E_n : Espessura nominal; E_m : Espessura mínima.

Fonte: Adaptado de Welling, 1994.

3.4 Elaboração e aplicação dos programas de secagem

Neste estudo, a metodologia empregada para elaborar os programas de secagem baseou-se na hipótese de que pequenas amostras de madeira, quando submetidas à secagem drástica, apresentam comportamentos proporcionais aos que possivelmente ocorreriam na secagem convencional. A partir disso, os programas de secagem foram elaborados utilizando as variáveis obtidas através da aplicação da secagem drástica.

Os parâmetros dos programas de secagem, especificamente a temperatura inicial, final e o potencial de secagem, foram determinados com base na metodologia descrita por Ciniglio (1998). Para cada uma das espécies utilizadas no estudo, foi elaborado um programa de secagem específico.

3.4.1 Variáveis para estimativa dos programas de secagem

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

Após obter os dados necessários, foram estimadas as variáveis T_1 , T_2 e T_3 , que correspondem ao tempo de secagem de verde até 5%, verde até 30% e de 30%

até 5%, respectivamente. Essas variáveis foram empregadas para estimar as variáveis V_1 , V_2 e V_3 , que correspondem, respectivamente, à velocidade de secagem de verde a 5% (Equação 9), verde a 30% (Equação 10) e de 30% a 5% (Equação 11).

$$V_1 = \frac{m_u - m_5}{T_1 * 100} \quad (9)$$

V_1 = velocidade de secagem da umidade inicial até 5% (g/h);

m_u = massa da amostra úmida (umidade inicial) (g);

m_5 = massa da amostra a 5% de umidade (g);

T_1 = tempo de secagem da umidade inicial até 5% (h).

$$V_2 = \frac{m_u - m_{30}}{T_2 * 100} \quad (10)$$

V_2 = velocidade de secagem da umidade inicial até 30% (g/h);

m_u = massa da amostra úmida (umidade inicial) (g);

m_{30} = massa da amostra a 30% de umidade (g);

T_2 = tempo de secagem da umidade inicial até 30% (h).

$$V_3 = \frac{m_{30} - m_5}{T_3 * 100} \quad (11)$$

V_3 = velocidade de secagem de 30 a 5% de umidade (g/h);

m_{30} = massa da amostra a 30% de umidade (g);

m_5 = massa da amostra a 5% de umidade (g);

T_3 = tempo de secagem de 30 a 5% de umidade (h).

Os parâmetros do programa de secagem foram calculados com base nos valores médios das amostras por espécie, aplicando-se as equações da Tabela 2.

Tabela 2. Equações para determinação dos parâmetros do programa de secagem.

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

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

Fonte: Ciniglio, 1998.

Com base nos parâmetros encontrados pelas equações acima, os programas de secagem foram elaborados com o auxílio de cartas psicrométricas.

3.5 Características da estufa de secagem

A secagem convencional foi aplicada em estufa piloto, com dimensões de 1,3m x 0,8m x 3,5m, de altura, largura e comprimento, respectivamente. Todavia, a área útil para confecção da pilha apresenta uma redução em 0,5 m na sua altura, em virtude do espaço ocupado pelo carro modular. Desse modo, essa estufa apresenta uma capacidade para, aproximadamente, 1,0 m³ de madeira serrada (Figura 8).



Figura 8: Madeira empilhada antes de ser submetida à secagem em estufa.

Fonte: o autor, 2012.

A estufa possui um sistema de aquecimento por meio de serpentinas elétricas, além de um sistema de umidificação, onde a água é aquecida em uma pequena caldeira elétrica e levada para dentro da estufa sob pressão. Os pontos de aspersão, responsáveis pela entrada de água aquecida e sob pressão, estão posicionados na parte superior da estufa, imediatamente à frente do ventilador (Figura 9a). Tal alocação tem como objetivo dispersar a umidade por toda a estufa por meio do fluxo de ar gerado pelo ventilador.

O sistema de circulação de ar é composto por um ventilador, movido por um motor de 3 CV, e está posicionado na parte frontal da estufa, fazendo com que o fluxo de ar produzido atravesse a pilha de madeira longitudinalmente. O sistema de circulação de ar é gerenciado de modo independente à estufa por meio de um controlador lógico programável (Figura 9b).

Além dos sistemas citados, a estufa possui outro para o gerenciamento e supervisão do processo de secagem, composto por um microcomputador conectado a um CLP central, cuja finalidade é a leitura e processamento dos dados.

O gerenciamento é realizado através do uso de um software específico para tal finalidade, denominado *SmartDry VS550*[®]. Por meio desse software, é possível configurar o mesmo com o programa de secagem desejado, contendo as temperaturas de bulbo seco e úmido nas diferentes etapas do programa. No mesmo, é fornecido o teor de umidade final desejado da madeira, velocidade de funcionamento do ventilador e demais parâmetros. Dentre esses parâmetros de secagem, pode-se citar a seleção dos sensores para determinação do teor de umidade, duração mínima das etapas, abertura e fechamento dos dampers e ativamento do sistema de umidificação.

A estufa possui dois dampers com abertura proporcional, para permitir a renovação do ar no interior da estufa. O primeiro damper está posicionado na parte frontal inferior da estufa, abaixo do ventilador, e tem como finalidade permitir a entrada de ar (Figura 9c). O mesmo está alocado nesse local, pois sua posição direciona a entrada de ar para frente do ventilador, fazendo com que o ar renovado seja incluído na circulação. O segundo está localizado na parte de trás da estufa, no plano superior, permitindo a saída do ar saturado.

O controle da temperatura de bulbo seco e úmido é realizado por dois sensores localizados na parte de trás da estufa (Figura 9d), ou seja, no lado oposto ao do ventilador. A umidade relativa é estimada automaticamente pelo software através da diferença higrométrica.

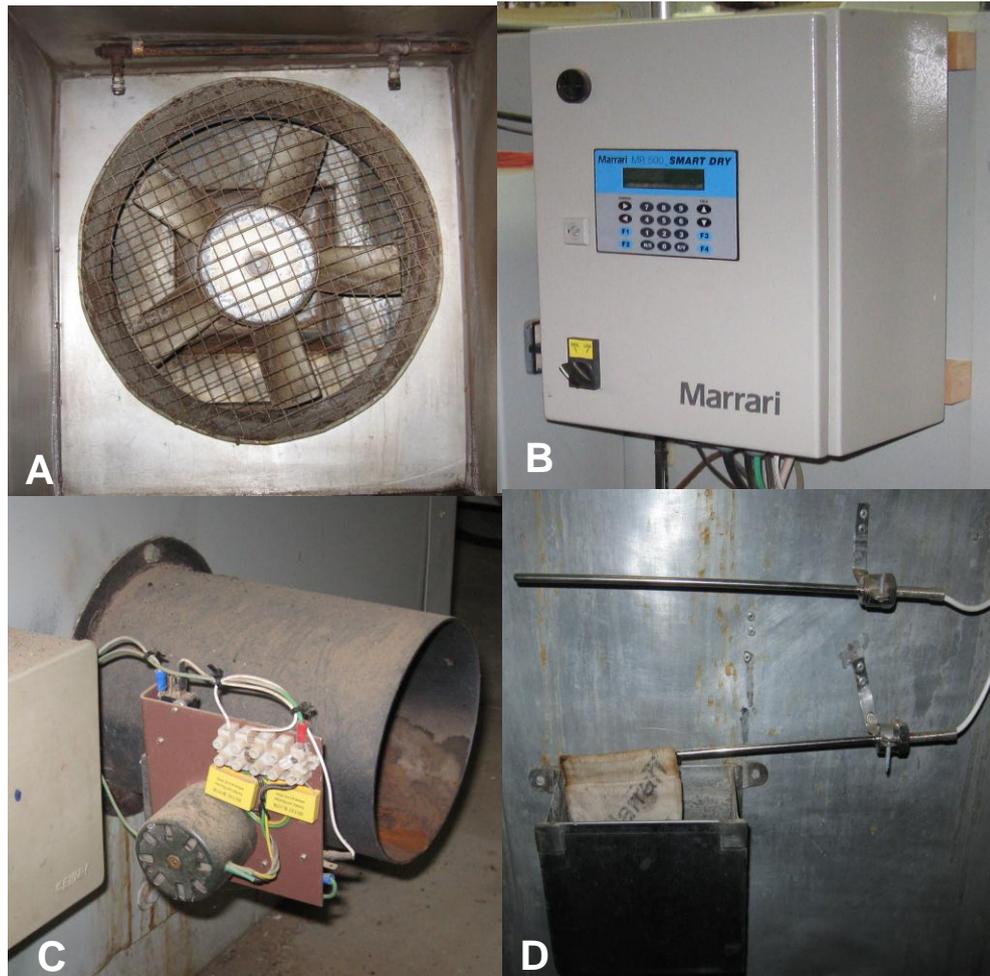


Figura 9: Estufa de secagem convencional: (A) aspersores de vapor d'água, com o ventilador ao fundo; (B) controlador lógico programável; (C) dumper frontal para entrada de ar; (D) sensores de temperatura – bulbo seco e úmido.

Fonte: o autor (2012).

3.6 Aplicação dos programas de secagem

Os programas de secagem foram aplicados em dois lotes para cada espécie, utilizando o mesmo programa de secagem, sendo cada lote constituído por 40 tábuas com dimensões nominais de 280,0 cm x 15 cm x 2,5 cm (comprimento, largura e espessura), com quatro tábuas por linha. Destas, 32 foram consideradas tábuas úteis e foram avaliadas qualitativamente, antes e após serem submetidas ao processo de secagem. Quatro tábuas foram utilizadas para confecção dos corpos de prova para monitoramento do teor de umidade. Para a avaliação dos gradientes de umidade durante a secagem e para a avaliação da etapa de uniformização, foram utilizadas outras quatro tábuas.

As peças foram empilhadas sobre o carro modular de carga no sentido longitudinal ao fluxo de ar. Utilizaram-se separadores metálicos vazados, com espessura de 2,5 cm e comprimento de 75 cm, para permitir a circulação do ar. As amostras de controle do teor de umidade foram dispostas em um local de acesso facilitado, em virtude das determinações de massa periódicas.

A secagem foi aplicada em dois lotes para cada espécie, utilizando o mesmo programa, visando a uma maior amostragem. O teor de umidade foi calculado pelo método gravimétrico, com intervalos de oito horas, além de ser medido com medidores elétricos resistivos. Todavia, os dados dos sensores elétricos não foram utilizados para o monitoramento do teor de umidade, em virtude da imprecisão dos seus dados.

3.7 Avaliação dos programas de secagem

A avaliação dos programas de secagem elaborados para cada espécie foi realizada através da taxa de secagem, manifestação de defeitos, retratibilidade e coeficiente de anisotropia, variação do teor de umidade final entre as peças, bem como através dos gradientes de umidade ao longo da espessura. O teor de umidade final desejado para as três espécies foi de 10%.

3.7.1 Taxa de secagem

A taxa de secagem, que corresponde à razão entre uma quantidade de água evaporada e a área total da peça em um determinado tempo, foi determinada através da diferença entre duas medições utilizando a Equação 4. Os valores obtidos para cada avaliação foram utilizados para determinar a taxa de secagem média para cada lote das três espécies.

Visando analisar de modo mais detalhado o comportamento das espécies, foi determinada a taxa de secagem média, desde a madeira verde até o PSF e deste até o teor de umidade final. Para tal, adotou-se, como PSF, o teor de umidade igual a 30%, para as três espécies.

3.7.2 Defeitos de secagem

A avaliação dos defeitos manifestados nas peças utilizadas foi realizada em duas etapas. A primeira ocorreu antes do processo de secagem, e a segunda após o término da mesma, para que não fossem obtidos resultados distorcidos, visto que defeitos como rachaduras e empenamentos podem ser decorrentes da atividade de desdobro da madeira. Foram avaliadas todas as peças submetidas à secagem, correspondendo a 32 tábuas por lote, sendo dois lotes por espécie e três espécies.

Os resultados obtidos da avaliação realizada anteriormente à aplicação da secagem foram comparados com aqueles observados na avaliação após a secagem. Através da diferença entre as avaliações, foi verificado se o defeito manifestou-se ou não em virtude da realização da secagem. Os valores obtidos das avaliações prévia e posterior à secagem permitiram comparar e classificar, de acordo com a Norma para Classificação de Madeira Serrada de Folhosas – NBR 9487 (ABNT, 1986), utilizando a classificação pela pior face. Todavia, as variáveis rachaduras de superfície, colapso e gradientes de umidade não foram classificadas quanto à norma, pois tais variáveis não são contempladas na mesma.

Os defeitos avaliados compreenderam rachaduras, empenamentos e colapso.

a) Rachaduras de superfície

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

b) Rachaduras de topo

As rachaduras de topo foram avaliadas e classificadas segundo recomendação da NBR 9487 (ABNT, 1986). As mesmas foram mensuradas através do somatório dos seus comprimentos individuais em cada face (Equação 12). Para tal, foi obtido o IRT para as duas faces, e considerou-se a pior face de cada peça para a avaliação nesse aspecto.

$$IRT = \frac{L_{r1} + L_{r2} + L_{r3}}{L_1} * 100 \quad (12)$$

IRT = Índice de Rachaduras de Topo (%);

L_{rn} = comprimento individual das rachaduras (mm);

L_1 = comprimento da peça (mm).

As rachaduras foram mensuradas com auxílio de um paquímetro digital, com precisão de 0,01 cm. Para facilitar a avaliação após a secagem, as rachaduras foram marcadas com lápis de anilina, durante as avaliações, após o desdobro. Na Figura 10, é apresentado um modelo esquemático para demonstração do procedimento adotado para quantificação do IRT.

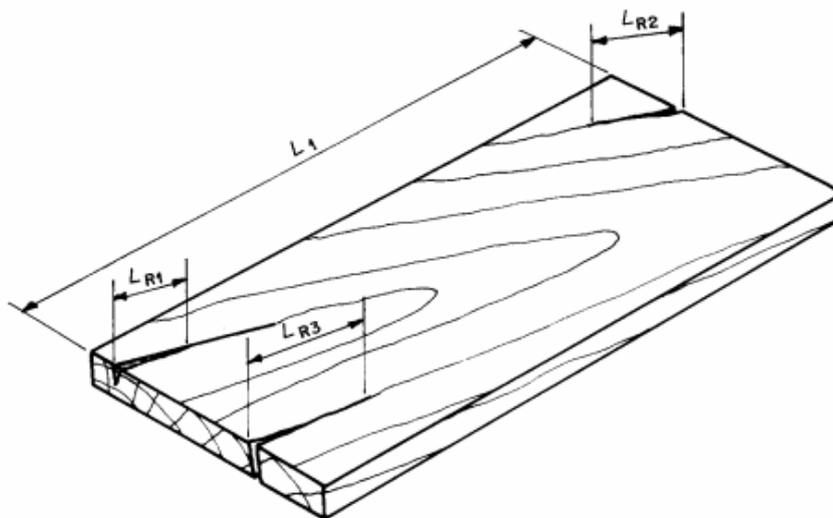


Figura 10: Procedimento para medição das rachaduras de topo.

Fonte: ABNT, 1986.

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

c) Índice de perda por rachaduras de topo

Para determinar e classificar as peças quanto às rachaduras de topo, foi elaborado o Índice de Perda por Rachaduras de Topo (IPRT), definido como a redução no comprimento útil da peça ocasionado pela soma da maior rachadura incidente em cada um dos topos, independente de ambas estarem situadas na mesma face.

O IPRT foi elaborado visando questionar a adoção do IRT e sua classificação quanto à norma NBR 9487. O IRT apresenta uma não conformidade com o aproveitamento comercial da peça sob o aspecto de incidências de rachaduras de topo, visto que considera o somatório de todas as rachaduras, independente do comprimento e da quantidade das mesmas.

Além disso, apresenta uma maior praticidade quanto à mensuração, pois como é necessária apenas a medição de uma rachadura em cada topo de ambas as faces, torna o processo mais rápido. Complementarmente, o IPRT possui uma maior precisão e proximidade com a porção da peça que apresenta impossibilidade ou limitação quanto ao uso devido à incidência de rachaduras de topo.

O índice de perda por rachaduras de topo foi determinado através da Equação 13.

$$IPRT = \frac{L_{r1} + L_{r2}}{L_1} \quad (13)$$

IPRT = Índice de Perda por Rachaduras de Topo;

L_m = comprimento individual das rachaduras (mm);

L_1 = comprimento da peça (mm).

Para a quantificação do índice de perda por rachadura de topo, considerou-se a maior rachadura verificada em cada topo das peças avaliadas, independente da face que as mesmas estivessem localizadas. Na figura 11 é apresentado um modelo esquemático para a determinação do IPRT.

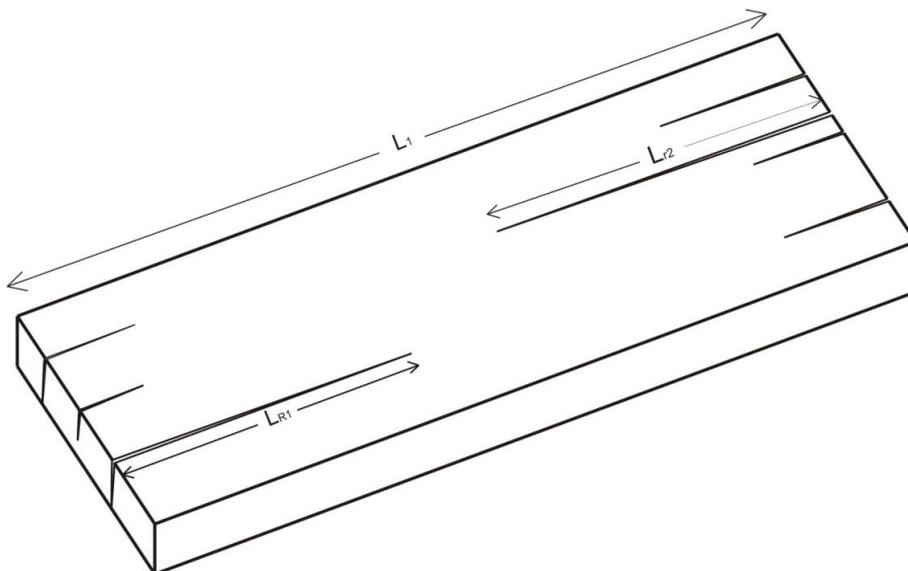


Figura 11: Procedimento para determinação do IPRT.

Fonte: o autor (2012).

As peças tiveram seus índices estimados e foram classificadas de acordo com o disposto na Tabela 3.

Tabela 3. Classes de qualidade da madeira em função do IRPT.

Classe de qualidade	IPRT (%)
A	0,00 – 5,00
B	5,01 – 10,00
C	10,01 – 15,00
D	15,01 – 20,00
E	Acima de 20,00

Fonte: o autor (2012).

Essa classificação foi elaborada com base na classificação do IRT proposta pela NBR 9487, definindo quatro classes, sendo que a última classe admitida apresenta valor igual a 20%, igual ao IRT. Peças com valores acima desse percentual são classificadas como inadequadas (Classe E).

d) Arqueamento

O arqueamento foi determinado a partir da flecha central formada entre a face curva da madeira e uma linha de nylon fixada nos topos da peça empenada. Tal procedimento é mostrado, esquematicamente, na Figura 12.

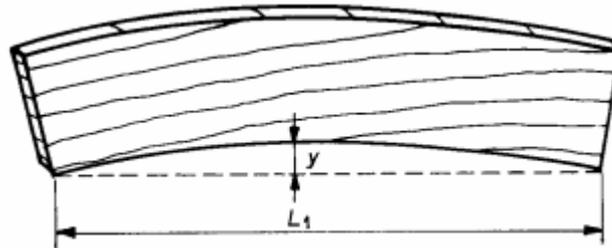


Figura 12: Procedimento para mensuração do arqueamento.

Fonte: ABNT, 1986.

O arqueamento foi determinado a partir da equação 14, e as peças que apresentaram um valor superior a 5 mm.m^{-1} foram classificadas como defeituosas, observando a restrição quanto ao número máximo de peças por lote para a primeira, segunda e terceira classes, e sem restrição para a quarta classe.

$$A = \frac{f_a}{L_1} \quad (14)$$

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

f_a = flecha de arqueamento da peça (mm);

L_1 = comprimento da peça (m).

e) Encurvamento

O encurvamento foi determinado utilizando a mesma metodologia descrita para o arqueamento e mostrada esquematicamente na Figura 13.

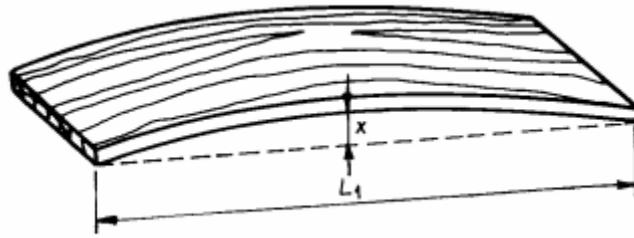


Figura 13: Procedimento para mensuração do encurvamento.

Fonte: ABNT, 1986.

O encurvamento foi determinado a partir da Equação 15 e, do mesmo modo que o arqueamento, as peças que apresentaram um valor superior a 5 mm.m^{-1} foram classificadas como defeituosas, observando a restrição quanto ao número máximo de peças por lote para a primeira, segunda e terceira classes, e sem restrição para a quarta classe.

$$E_v = \frac{f_{E_v}}{L_1} \quad (15)$$

E_v = encurvamento (mm.m^{-1});

f_{E_v} = flecha de encurvamento da peça (mm);

L_1 = comprimento da peça (m).

f) Encanoamento

O encanoamento foi obtido através da mensuração direta da flecha, utilizando uma linha de nylon presa nas bordas da peça. Considerou-se determinada peça como defeituosa se a mesma apresentasse uma flecha maior do que 4 mm, de acordo com a norma NBR 9487 (ABNT, 1986). Assim como para os demais empenamentos, observou-se a restrição quanto ao número máximo de peças por lote para a primeira, segunda e terceira classes, e sem restrição para a quarta classe.

O procedimento utilizado para a avaliação do encanoamento é apresentado na Figura 14.

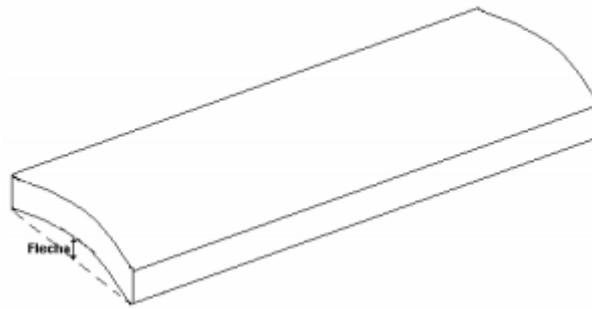


Figura 14: Procedimento para mensuração do encanoamento.

Fonte: ABNT, 1986.

g) Colapso

Em um primeiro instante, a presença de colapso foi avaliada visualmente nas peças. Verificada a manifestação de colapso, o mesmo foi avaliado através da redução da espessura nominal útil. A avaliação consistiu na determinação da maior e da menor espessura no topo de maior grau de colapso (Figura 15), utilizando paquímetro digital com precisão de 0,01mm.

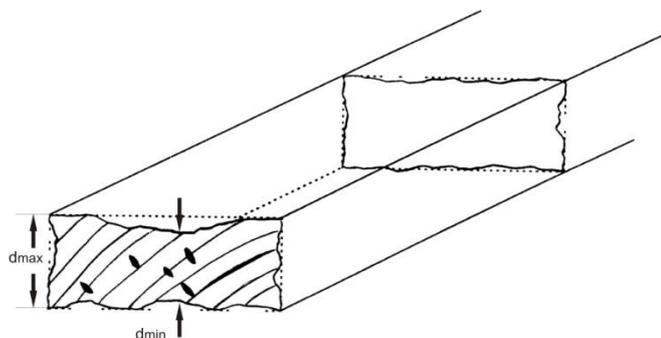


Figura 15: Procedimento para mensuração do colapso.

Fonte: adaptado de Welling, 1994.

Em seguida, foi calculada a redução na espessura ocasionada pelo colapso (d_c), através da subtração da maior e menor espessura verificada. Posteriormente, o colapso foi classificado de acordo com a recomendação da European Drying Group, que é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Grau de colapso.

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

Fonte: adaptado de Welling, 1994.

No instante da determinação dos pontos de maior e menor espessura, os mesmos foram marcados com lápis de anilina para a avaliação do colapso após 45 dias do término da secagem. A avaliação após 45 dias foi realizada para verificar se havia alguma alteração na severidade do colapso nas peças, em virtude da permanência das mesmas em um ambiente que apresentava condições climáticas estáveis.

3.7.3 Retratibilidade e coeficiente de anisotropia durante a secagem

A retratibilidade após a aplicação da secagem foi realizada através da identificação das peças orientadas radial e/ou tangencialmente. Essas tábuas tiveram suas dimensões identificadas e mensuradas antes e após a secagem. A retratibilidade foi estimada utilizando as Equações 9 e 10 e, com isso, obtiveram-se apenas as contrações radiais e tangenciais.

Complementarmente, foi estimado o coeficiente de anisotropia, utilizando a Equação 12. Nesse parâmetro de avaliação dos programas de secagem, o número de amostras foi variável em função da quantidade de peças orientadas presentes em cada lote das três espécies. Para avaliar a retratibilidade e o coeficiente de anisotropia na secagem, foram utilizadas 12 tábuas perfeitamente orientadas.

3.7.4 Teor de umidade final entre as peças

A determinação do teor de umidade entre as peças foi realizada imediatamente após a avaliação da qualidade da madeira. Para tal, foi retirada uma amostra de cada tábua, descartando-se 50 cm do topo da mesma. A amostra

utilizada possuía 6,0 cm de comprimento, com largura e espessura iguais às da tábua.

As amostras foram identificadas e tiveram suas massas determinadas e, posteriormente, levadas à estufa de secagem a 103°C até atingirem massa constante. Após, as mesmas tiveram suas massas determinadas para obtenção da massa seca. Para a determinação do teor de umidade de cada peça, foi utilizada a Equação 6.

3.7.5 Gradientes de umidade durante a secagem

A presença de gradientes de umidade foi determinada através de quatro avaliações realizadas durante a secagem, sendo definidos os teores de umidade médios das amostras de controle como parâmetro para tal. As avaliações foram realizadas a 40%, 30%, 20% e 10% de teor de umidade, além de uma avaliação após o término da etapa de uniformização da carga. Para tal, utilizaram-se quatro peças por carga, retirando-se uma amostra de cada peça. Descartou-se uma porção de 50 cm a partir do topo da peça, e após a retirada da amostra, o topo da peça foi vedado com polivinil acetato. As amostras subsequentes foram retiradas a uma distância mínima de 20 cm entre si, observando a presença de defeitos como nós, rachaduras e bolsas de resina.

Inicialmente, foram seccionadas peças com 6,0 cm de comprimento (plano longitudinal) e, em seguida, foram removidas as porções laterais dessa amostra, obtendo-se uma amostra com largura de 4,0 cm. Após, as peças foram cortadas transversalmente no sentido das fibras em três amostras, com dimensões de 2,0 x 4,0 x 2,5 cm (comprimento, largura e espessura), de acordo com a Figura 16. Dessas três amostras, a proveniente do centro foi utilizada para a determinação do gradiente de umidade, e as duas amostras laterais foram usadas como testemunha para comparação do teor de umidade entre as mesmas.

A amostra destinada à determinação do gradiente de umidade foi subdividida em cinco corpos de prova, com espessura nominal de 0,5 cm, utilizando uma lâmina de aço com espessura de aproximadamente 1,0 mm. Imediatamente após a secção dos corpos de prova, os mesmos tiveram suas massas determinadas e acondicionados em um gabarito visando agilizar o processo de confecção dos corpos de prova. Em seguida os mesmos foram levados à estufa de circulação de ar

a 103°C, obtendo-se a massa seca dos mesmos, e o teor de umidade foi determinado utilizando a Equação 7. O mesmo procedimento foi adotado para as testemunhas.

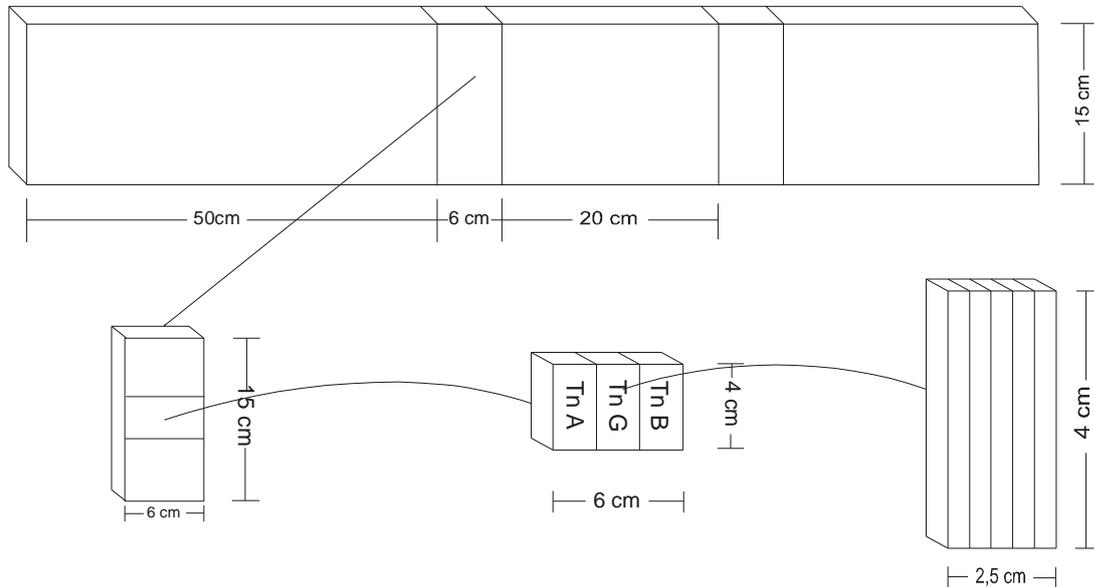


Figura 16: Método para corte e obtenção das amostras para determinação do gradiente de umidade.

Fonte: adaptado pelo autor (2012) de Milić e Kolin (2008).

O local de retirada das subamostras, a denominação, o número e a quantidade das mesmas para cada amostra de gradiente de umidade são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Posições em relação à superfície da amostra para determinação do teor de umidade.

Local de retirada das amostras	Número de amostras por peça
$MC_{(1/6)}$	2 (posições 1 e 5)
$MC_{(1/3)}$	2 (posições 2 e 4)
$MC_{(1/2)}$	1 (posição 3)

Em que: $MC_{(1/6)}$ = amostras retiradas da superfície inferior e superior; $MC_{(1/3)}$ = amostras retiradas das posições intermediárias entre o centro e a superfície; $MC_{(1/2)}$ = amostra retirada do centro da peça.
Fonte: adaptado de Welling, 1994.

A Variação do Teor de Umidade (ΔMC) de cada amostra foi calculada através da diferença entre o teor de umidade no centro da mesma e o teor de umidade médio na superfície (adaptado de Sandland, 2001), a partir da Equação 16.

$$\Delta MC_{(C-S)} = MC_C - \left(\frac{MC_{Si} + MC_{Ss}}{2} \right) \quad (16)$$

$\Delta MC_{(C-S)}$: Gradiente de umidade entre a superfície e o centro (%);

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

MC_{Si} : Teor de umidade na superfície inferior da peça (%);

MC_{Ss} : Teor de umidade na superfície superior da peça (%).

Em seguida, a Variação do Teor de Umidade Médio (ΔMC) foi calculada por meio da Equação 17.

$$\Delta MC = \frac{\Sigma \Delta MC_i}{4} \quad (17)$$

ΔMC = Variação do teor de umidade médio (%);

ΔMC_i = Variação do teor de umidade em "i" amostras (%).

Complementarmente, elaboraram-se gráficos para visualizar o comportamento da curva do gradiente de umidade ao longo da espessura das peças, nas avaliações realizadas.

Por fim, o gradiente de umidade médio verificado para cada avaliação foi classificado de acordo com a Tabela 6, nas classes Standard (S), Quality (Q) e Exclusive (E).

Tabela 6. Gradiente de umidade admitido para cada classe de qualidade.

Classe de Qualidade	90% da diferença do gradiente entre $MC_{(1/2)}$ e $MC_{(1/6)}$ menor ou igual a:	Gradiente máximo admitido ($MC_D = 10\%$)
S	$TU_D \times 0,4$	4,0 %
Q	$TU_D \times 0,3$	3,0 %
E	$TU_D \times 0,2$	2,0 %

Em que: S = Classe 'Standard'; Q = Classe 'Quality'; E = Classe 'Exclusive'; $MC_{(1/2)}$ = amostra retirada do centro da peça; $MC_{(1/6)}$ = amostras retiradas da superfície inferior e superior; MC_D = Teor de umidade desejado (%); TU_D = Teor de umidade desejado (%).

Fonte: adaptado de Welling, 1994.

3.8 Avaliações do tempo e da qualidade da uniformização

A avaliação da etapa de uniformização foi realizada através de corpos de prova, utilizando os mesmos procedimentos metodológicos e critérios de classificação descritos no item 3.8.5. Complementando a classificação adotada para o gradiente de umidade durante a secagem, na avaliação da uniformização, classificaram-se as peças em função da amplitude do teor de umidade obtido para as amostras das posições intermediárias ($MC_{(1/3)}$), entre o centro e a superfície da amostra, em relação ao teor de umidade desejado (Tabela 7).

Tabela 7. Amplitude de $MC_{(1/3)}$ para as classes de qualidade em função do teor de umidade desejado.

Classe de Qualidade	90% de todas as $MC_{(1/3)}$	Intervalo das classes ($TU_D = 10\%$)
S	$TU_D \pm TU_D \times 0,3$	7,0 - 13,0
Q	$TU_D \pm TU_D \times 0,2$	8,0 - 12,0
E	$TU_D \pm TU_D \times 0,1$	9,0 - 11,0

Em que: S = Classe 'Standard'; Q = Classe 'Quality'; E = Classe 'Exclusive'; $MC_{(1/3)}$ = amostras retiradas da porção intermediária entre a superfície e o centro da peça; MC_D = Teor de umidade desejado (%); TU_D = Teor de umidade desejado (%).

Fonte: adaptado de Welling, 1994.

O intervalo entre as avaliações realizadas na uniformização foi de 6 horas, considerando-se a avaliação realizada ao final da secagem como testemunha para a avaliação do tempo de uniformização. O tempo total da etapa de uniformização foi de 30 horas, sendo este o tempo máximo possível de ser avaliado com intervalo de 6 horas entre as avaliações, em função da dimensão longitudinal das tábuas. Para não interferir na avaliação do tempo de uniformização, optou-se por não realizar a etapa de uniformização das peças após o término da secagem.

3.9 Análises estatísticas

No presente estudo, aplicaram-se a análise de variância, e nas situações em que a hipótese da nulidade (H_0) foi rejeitada, aplicou-se o teste de Tukey (5%) para diferenciação das médias. Para tal, considerou-se cada peça de cada um dos lotes como uma repetição. Nas situações em que se verificou a necessidade de análise de regressão para ilustrar a relação entre as variáveis envolvidas, os mesmos foram

desenvolvidos, tendo sido selecionado o modelo que apresentou melhor ajuste. Para as análises prévias e individuais, foi utilizado o software *Excel*[®], e as análises estatísticas foram processadas no software *Statgraphics*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliações prévias

A avaliação prévia de aspectos intrínsecos de cada espécie estudada forneceu informações importantes para a realização das etapas seguintes, especialmente pela evidência do comportamento da madeira durante a secagem convencional, bem como de seus defeitos.

4.1.1 Massa específica e teor de umidade inicial

Na Tabela 8 encontram-se as médias, para as três espécies, da massa específica básica (ρ_b), e aparente ao teor de umidade de 12% (ρ_a), teor de umidade inicial e do tempo necessário para que as amostras atingissem massa constante à temperatura de 100°C.

Tabela 8. Massa específica básica e aparente a 12%, teor de umidade inicial e tempo da secagem drástica.

Espécie	Teor de umidade inicial (%)	Tempo (horas)	ρ_a (g/cm ³)	ρ_b (g/cm ³)
<i>Corymbia citriodora</i>	50,64 a	92,10 c	1,07 a	0,82 a
<i>Eucalyptus robusta</i>	79,36 c	31,65 a	0,82 c	0,61 c
<i>Eucalyptus saligna</i>	64,70 b	45,20 b	0,89 b	0,69 b
F calculado	23,53*	571,40*	104,96*	43,39*

Médias seguidas de uma mesma letra, em uma mesma coluna, não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância; * significativo a 5%; ρ_a = massa específica aparente a 12%; ρ_b = massa específica básica.

A madeira de *E. robusta* apresentou o maior valor de teor de umidade inicial médio, no entanto, necessitou de um tempo inferior até atingir massa constante, comparada com as duas espécies. A situação oposta ocorreu com *C. citriodora*, que apresentou o menor teor de umidade, todavia, necessitou de praticamente três vezes mais tempo que o *E. robusta*. Em uma situação intermediária, o *E. saligna* apresentou valores médios intermediários para as duas variáveis. Verifica-se

diferença significativa entre as três espécies tanto para o teor de umidade inicial quanto para o tempo de duração da secagem drástica.

O teor de umidade inicial para a madeira de *C. citriodora* (50,64%) está de acordo com Carmo (1996), para quem a variação pode estar entre 46% e 80%. Todavia, o valor encontrado no presente estudo é inferior aos citados por Oliveira et al. (2005) e Stangerlin et al. (2010), que são de 62,6% e 60,02%, respectivamente.

O teor de umidade inicial de *E. saligna* (64,70%) é próximo ao encontrado por Klitzke e Batista (2010), de 63,49%, e um pouco inferior ao obtido por Stangerlin et al. (2010), 75,62%. Quanto ao teor de umidade inicial de *E. robusta*, que apresentou valor médio igual a 79,36%, está abaixo do valor médio verificado por Skolmen (1963), que é de aproximadamente 88%.

O comportamento do teor de umidade médio em relação ao tempo para as três espécies durante a aplicação da secagem drástica é apresentado na Figura 17.

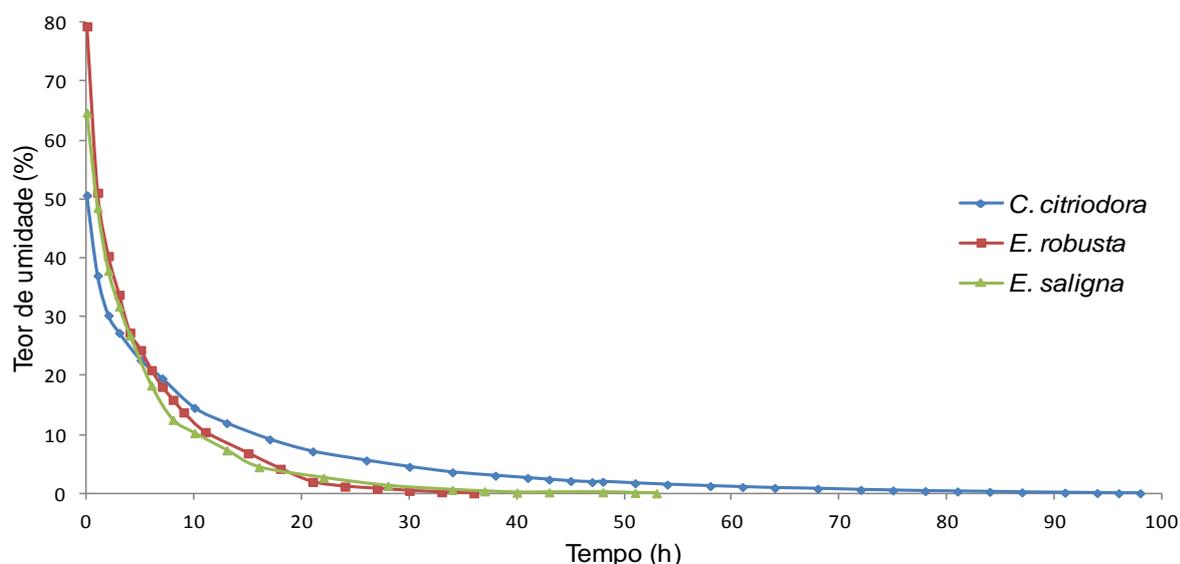


Figura 17: Curva de secagem com valores médios para as três espécies.

Fonte: o autor (2012).

Complementarmente, foram estimadas as regressões para cada espécie, relacionando o teor de umidade de cada uma das amostras utilizadas com o tempo de secagem. As curvas de secagem e o coeficiente de determinação (R^2) são apresentados nas Figuras 18, 19 e 20, correspondendo ao *Eucalyptus robusta*, ao *Eucalyptus saligna* e ao *Corymbia citriodora*, respectivamente.

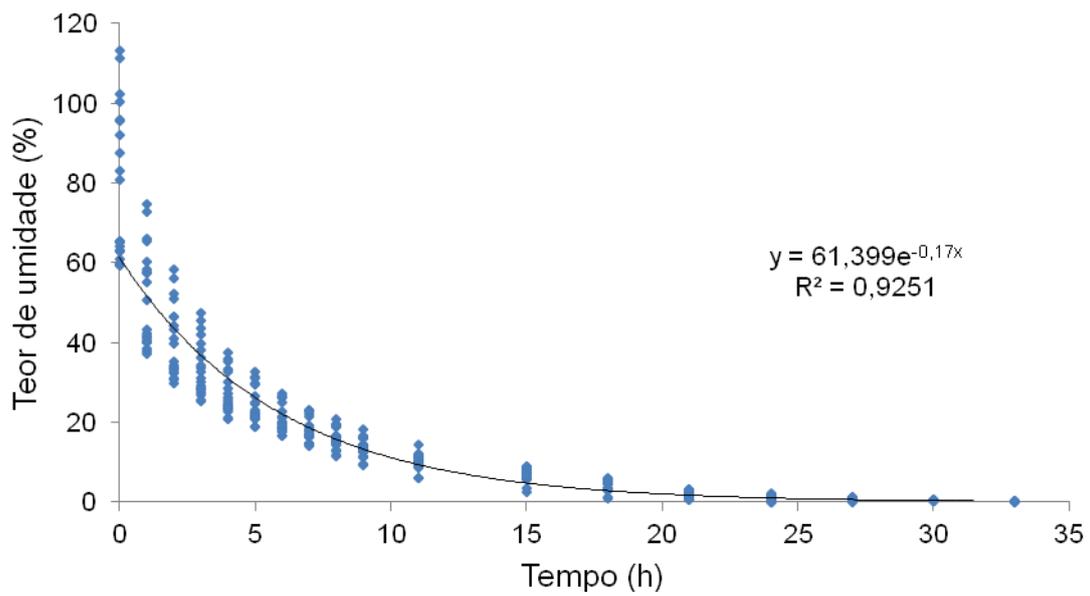


Figura 18: Regressão relacionando o teor de umidade com o tempo de secagem para a madeira de *Eucalyptus robusta*.

Fonte: o autor (2012).

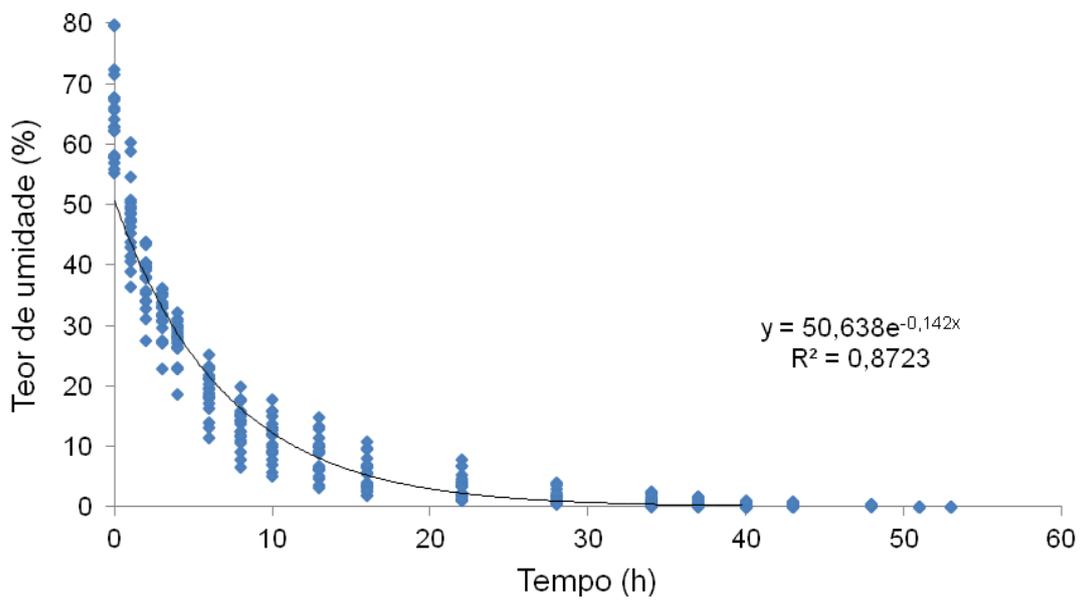


Figura 19: Regressão relacionando o teor de umidade com o tempo de secagem para a madeira de *Eucalyptus saligna*.

Fonte: o autor (2012).

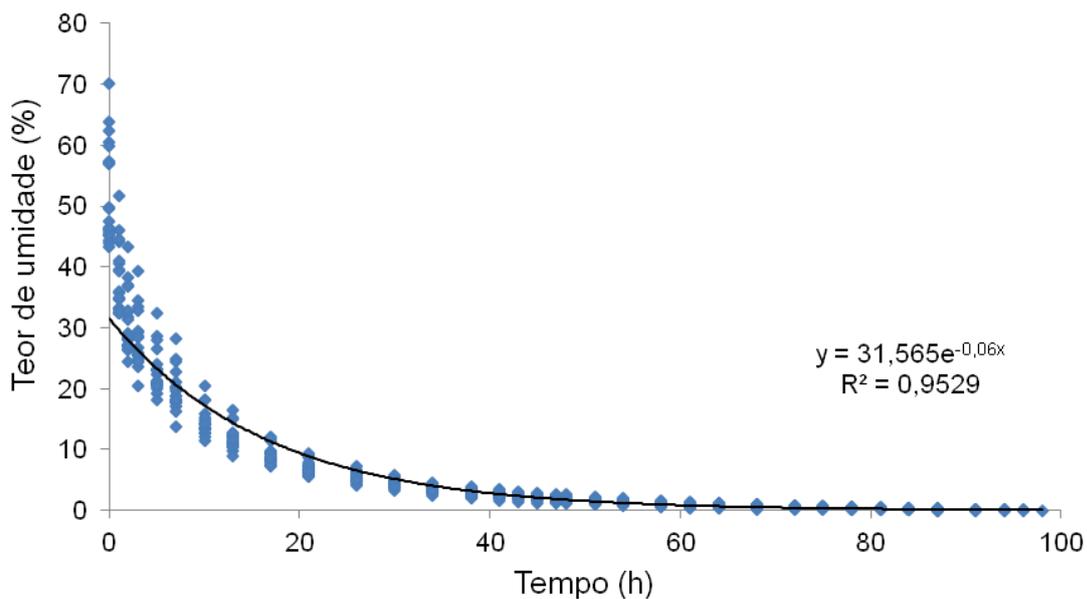


Figura 20: Regressão relacionando o teor de umidade com o tempo de secagem para a madeira de *Corymbia citriodora*.

Fonte: o autor (2012).

De modo geral, o teor de umidade da madeira do gênero *Eucalyptus* pode apresentar grande variação em função da espécie, idade, massa específica, aspectos anatômicos e das condições onde a espécie desenvolve-se.

Verificou-se significância na análise de variância tanto para a massa específica básica quanto para a aparente. O teste de médias evidenciou que as três espécies apresentaram diferença significativa para os valores médios de massa específica aparente e básica, verificando-se valores menores para a madeira de *Eucalyptus robusta*. A madeira de *Corymbia citriodora* apresentou os maiores valores médios, enquanto a de *Eucalyptus saligna* manteve-se intermediária entre as duas anteriores. Foi verificada diferença significativa entre as três espécies para as duas variáveis.

O valor médio observado para a massa específica de *C. citriodora* é superior ao encontrado na literatura (Sturion et al., 1987; Stangerlin et al., 2009; Lemos et al., 2012). O valor médio obtido para o *E. saligna* também foi superior comparado aos encontrados na literatura (Tomazello Filho, 1985; Sturion et al., 1987; Trugilho et al., 1996; Pereira et al., 2000; Stangerlin et al., 2009; Batista, 2009).

Para o *E. robusta*, o valor médio obtido está de acordo com os resultados encontrados por Youngs (1960) e Skolmen (1963), 0,60 e 0,66 g/cm³,

respectivamente. Mesmo que essas informações tenham sido obtidas há meio século e para plantios em condições distintas daquelas onde o material para este estudo foi coletado, a massa específica básica de *E. robusta* apresentou valor muito próximo aos obtidos pelos autores acima citados. Bootle (1983) obteve 0,80 g/cm³ para a massa específica aparente, a 12% de umidade, em experimento realizado na Austrália, que é um valor próximo ao verificado neste estudo.

Desse modo, as madeiras de *E. robusta* e *E. saligna* foram classificadas como de média massa específica (entre 0,50 e 0,72 g/cm³), enquanto o *C. citriodora* foi classificado como madeira de massa específica elevada (acima de 0,72 g/cm³). Essa classificação foi realizada com base na classificação proposta pelo IBAMA (1991).

Sinteticamente, observou-se que o *C. citriodora* cuja massa específica foi a mais elevada dentre as três espécies apresentou o menor teor de umidade inicial e necessitou o maior tempo secagem. Por outro lado, o *E. robusta* que apresentou a menor massa específica necessitou do menor tempo de secagem mesmo com o teor de umidade mais elevado dentre as espécies estudadas. Por fim, o *E. saligna* apresentou valores intermediários, permitindo afirmar que, para as três espécies estudadas, existe uma relação entre a massa específica, teor de umidade e o tempo necessário para a completa retirada da água.

Segundo Andrade (2000), quando determinada madeira apresenta maior massa específica comparada a outra, implica que a primeira possui maior espessura da parede celular e, conseqüentemente, menor volume do lume. Sendo assim, madeiras de maior massa específica possuem maior quantidade de água higroscópica, cuja movimentação é mais lenta, verificando-se assim a necessidade de um período maior de tempo para a retirada da água.

4.1.3 Taxa de secagem

Na Tabela 9, encontra-se a taxa de secagem média nas seguintes condições de teor de umidade: verde até 30% (TS_{V-30%}), verde até 5% (TS_{V-5%}), de 30% até 5% (TS_{30-5%}), de 30% até 0% (TS_{30-0%}), de 5% até 0% (TS_{5-0%}). Também se encontra a taxa de secagem média total (TS_{MÉDIA}).

Tabela 9. Taxas de secagem médias para a secagem drástica das três espécies

Espécie	Taxa de Secagem (g/cm ² .hora)					MÉDIA
	Verde-30%	Verde-5%	30%-5%	30%-0%	5%-0%	
<i>C. citriodora</i>	0,034603 a	0,010795 b	0,004941 b	0,001487 c	0,000327 b	0,004005 c
<i>E. robusta</i>	0,037504 a	0,014935 a	0,006650 a	0,004757 a	0,000891 a	0,012128 a
<i>E. saligna</i>	0,031023 b	0,014751 a	0,006431 a	0,003416 b	0,000466 b	0,010400 b
F calculado	12,47*	17,21*	18,32*	159,03*	49,69*	120,10*

Médias seguidas de uma mesma letra, em uma mesma coluna, não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância. *: significativo a 5%.

Para a taxa de secagem no intervalo entre a condição verde e 30% de umidade, a madeira de *E. robusta* apresentou o maior valor, seguido da *C. citriodora*, não sendo verificada diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade entre ambas. O *E. saligna* apresentou a menor taxa de secagem para essa variável analisada, diferindo, estatisticamente, das demais. Uma hipótese para o desempenho da *C. citriodora* ter sido superior ao da *E. saligna* nesta variável é a menor quantidade percentual de água livre que a primeira apresentou comparativamente a esta última, evidenciado pela diferença no teor de umidade inicial entre ambas. Essa hipótese fica mais evidenciada analisando as demais taxas de secagem, onde se verifica o menor valor para a *C. citriodora*, em comparação com as demais espécies.

De modo geral, as maiores taxas de secagem foram apresentadas pelo *E. robusta*, não diferindo do *E. saligna* para as variáveis $TS_{V-5\%}$ e $TS_{30-5\%}$, e do *C. Citriodora* para a variável $TS_{V-30\%}$. Por outro lado, a madeira de *C. citriodora* apresentou as menores taxas de secagem, não diferindo estatisticamente a 5% de probabilidade do *E. saligna* para a variável $TS_{5-0\%}$.

Em relação à taxa de secagem média, a madeira de *E. robusta* apresentou o maior valor, seguido do *E. saligna* e do *C. citriodora*, todos diferindo estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade. Os resultados obtidos para a taxa de secagem encontram-se em concordância com aqueles obtidos por Ciniglio (1998), Andrade et al. (2001), Barbosa et al. (2005) e Klitzke e Batista (2010).

De modo geral, o comportamento médio apresentado pelas três espécies para a taxa de secagem foi influenciado pelo teor de umidade inicial e pela massa específica. É possível inferir acerca da influência da permeabilidade da madeira das espécies utilizadas, mesmo que esta característica não tenha sido avaliada, visto

que a permeabilidade da madeira influencia diretamente na taxa de secagem da madeira, podendo-se assim estabelecer um paralelo entre tais variáveis. Analisando a taxa de secagem média das três espécies, observa-se que a maior taxa de secagem foi verificada para o *E. robusta* (0,012128 g/cm².h), que apresentou a menor massa específica, ao passo que a menor taxa de secagem foi verificada para o *C. citriodora* (0,004005 g/cm².h), espécie esta que apresentou o maior valor médio para a massa específica.

Porém, não é adequado afirmar que apenas a massa específica seja um indicador da taxa de secagem, visto que, para a taxa de secagem na faixa capilar, os valores médios verificados para o *C. citriodora* e para o *E. robusta* não diferiram estatisticamente, opondo-se ao possível efeito exercido pela diferença de massa específica entre as espécies. Observando os valores da taxa de secagem média, observa-se que existe uma relação aparente entre essa variável e a massa específica. No entanto a taxa de secagem pode estar sendo influenciada pela permeabilidade da madeira, visto que, de acordo com Andrade (2000), uma madeira que apresente maior massa específica possui maior espessura da parede celular e, conseqüentemente, menor volume do lume, tornando-a menos permeável. Isso também implica em maior quantidade de água higroscópica, cuja movimentação é mais lenta.

Para a taxa de secagem na faixa higroscópica (30% a 0%), o maior valor médio foi verificado para o *E. robusta* (0,004757 g/cm².h), que apresentou a menor massa específica básica (0,61 g/cm³), enquanto o menor valor foi verificado para o *C. citriodora* (0,001487 g/cm².h), espécie que apresentou a maior massa específica básica (0,82 g/cm³). O *E. saligna* mostrou valores intermediários tanto para a taxa de secagem (0,003416 g/cm².h) quanto para a massa específica básica (0,69 g/cm³). Esse comportamento confirma o relatado por Hart e Darwin Jr. (1971), de que maiores valores de massa específica dificultam a remoção da água abaixo do ponto de saturação das fibras.

Comportamento semelhante ao comentado acima foi observado e descrito por Batista (2009) para a taxa de secagem de três espécies de eucalipto, tendo o autor verificado a menor taxa de secagem na faixa higroscópica para a madeira de maior massa específica.

Com isso, pode-se afirmar que os resultados obtidos para a taxa de secagem indicam que a madeira de *E. robusta* apresentará menor dificuldade para a secagem

quanto ao tempo necessário para a mesma. Por outro lado, o *C. citriodora* apresentará a maior dificuldade, especialmente para teores de umidade abaixo do PSF, enquanto que o esperado para o *E. saligna* é que esta espécie apresente comportamento intermediário.

4.1.4 Retratabilidade

As retrações radial, tangencial, longitudinal e volumétrica, assim como o coeficiente de anisotropia para as três espécies na avaliação do teste prévio, são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Retratabilidade e coeficiente de anisotropia durante o teste prévio.

Espécie	Contração (%)				Coeficiente anisotrópico
	Tangencial	Radial	Longitudinal	Volumétrica	
<i>C. citriodora</i>	10,98 a	7,97 a	0,66 a	22,90 a	1,38
<i>E. robusta</i>	16,87 b	12,51 b	0,92 b	38,86 c	1,36
<i>E. saligna</i>	12,45 a	8,69 a	0,93 b	26,33 b	1,47
F calculado	47,45*	71,72*	5,52*	81,08*	1,07 ^{NS}

Médias seguidas de uma mesma letra, em uma mesma coluna, não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância. * significativo a 5%; ^{NS} não significativo a 5%.

A análise de variância mostrou significância em quatro das cinco variáveis testadas, não sendo verificada apenas para o coeficiente anisotrópico. As retrações tangencial e radial apresentam comportamento similar para as três espécies, verificando-se menores valores para o *C. citriodora* (10,98% e 7,97%), que não apresentou diferença significativa do *E. saligna* para ambas as variáveis (12,45% e 8,69%). Por sua vez, o *E. robusta* apresentou os maiores valores médios de contração tangencial e radial (16,87% e 12,51%), diferindo estatisticamente das demais espécies.

Na contração no plano longitudinal apresentou menor valor médio para o *C. citriodora* (0,66%), diferindo estatisticamente das demais espécies, que, por sua vez, não diferiram entre si, com valores médios de 0,92% para o *E. robusta* e 0,93% para o *E. saligna*. Tais valores estão acima de 0,3%, valor considerado adequado por Kollmann e Côté Jr. (1968). Os mesmos autores citam que a contração longitudinal é

inversamente relacionada com a massa específica, relação esta verificada neste estudo.

A contração volumétrica apresentou diferença significativa entre as três espécies, verificando-se o menor valor médio para o *C. citriodora* (22,90%), seguido pelo *E. saligna* (26,33%), com o *E. robusta* apresentando a maior contração volumétrica total, 38,86%. Todavia, o coeficiente anisotrópico não apresentou diferença significativa entre as espécies, verificando-se valores médios iguais a 1,36; 1,38 e 1,47 para *E. robusta*, *C. citriodora* e *E. saligna*, respectivamente.

Batista (2009) obteve para a contração radial e tangencial de *E. saligna* 5,03% e 9,82, respectivamente. O mesmo autor verificou contração volumétrica de 15,17% e coeficiente anisotrópico de 2,06. Os valores de contração radial, tangencial e volumétrica são inferiores aos verificados no presente estudo, no entanto, o coeficiente anisotrópico para este estudo foi inferior.

Lemos et al. (2012) verificaram contração volumétrica média para o *C. citriodora* de 15,51%. Oliveira (1998) obteve valores médios para a madeira de *C. citriodora* de 7,1%, 10,0%, 0,2% e 18,3%, respectivamente, para contração radial, tangencial, longitudinal e volumétrica, e coeficiente anisotrópico de 1,4. Os valores citados nos dois estudos são valores inferiores ao verificado no presente trabalho.

4.1.5 Avaliação de rachaduras de topo

As rachaduras de topo manifestadas durante a secagem drástica foram agrupadas em três momentos distintos, que correspondem aos teores de umidade de 30% ($R_{\text{verde-30}}$), 5% ($R_{\text{verde-5}}$) e do final da secagem (R_{total}). Na Tabela 11, tal defeito é apresentado em número médio por peça ($R_{\text{médio}}$) e quanto ao percentual de peças que apresentaram tal defeito. Para a madeira de *E. robusta*, não foi verificada a presença de rachaduras em nenhuma das peças durante a realização dessa etapa.

Tabela 11. Avaliação das rachaduras durante a secagem drástica.

Espécie	R _{verde-30}		R _{verde-5}		R _{total}	
	R _{médio}	% peças	R _{médio}	% peças	R _{médio}	% peças
<i>C. citriodora</i>	2,60	60	2,80	60	2,85	65
<i>E. saligna</i>	1,20	50	0,95	45	1,30	60

Para a avaliação de rachaduras no teste prévio, não foi aplicada a análise de variância em virtude do elevado coeficiente de variação dos dados. No entanto, observa-se maior incidência de rachaduras, bem como de peças que apresentaram tal defeito para a madeira de *C. citriodora*.

A maior incidência de rachaduras foi verificada até 30% de teor de umidade para ambas as espécies, sendo que houve um pequeno acréscimo no percentual de peças com rachaduras abaixo do PSF. Esse comportamento acima do PSF era esperado, visto que, de acordo com Simpson (1991) as rachaduras ocorrem no início da secagem quando as camadas mais externas da tabua estão tensionadas o suficiente para fraturar a madeira.

Complementarmente, de acordo com Melo (1999) as rachaduras surgem no decorrer da secagem sempre que exista um elevado gradiente de umidade entre a parte central e a superfície da madeira e se desenvolvam forças de tração, em virtude da contração abaixo do PSF, a que esta não consegue opor-se. O elevado gradiente de umidade verificado na avaliação durante a secagem convencional para o *C. citriodora* e *E. saligna* pode ser apontado como uma das razões para a verificação de rachaduras na secagem drástica.

A redução do número médio de rachaduras por peça ocorrida para o *E. saligna* após o PSF pode ser explicada pelas contrações ocorridas nas peças, que provocaram o desaparecimento de algumas rachaduras.

4.1.6 Avaliação do colapso

Dentre as três espécies utilizadas, apenas o *E. robusta* manifestou o desenvolvimento de colapso celular durante os testes prévios. Os resultados da ocorrência do colapso e a classificação do mesmo quanto a sua intensidade estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12. Ocorrência do colapso durante o teste prévio.

Classificação	Percentual de peças colapsadas		
	Umidade > 30%	Umidade > 20%	Final
Leve	40%	20%	15%
Moderado	40%	35%	40%
Severo	20%	45%	45%

A manifestação do colapso foi verificada nas primeiras horas da aplicação da secagem drástica, visto que foram necessárias, aproximadamente, três horas e meia para que fosse atingido o teor de umidade de 30%. Até esse momento, apenas 20% das peças apresentavam colapso mais severo, enquanto 40% ainda permaneciam livres de colapso. Ao atingir o teor de umidade de 20%, os valores praticamente se inverteram, sendo observado colapso severo em quase metade das peças, valores estes que foram mantidos praticamente inalterados até o final da secagem.

A tendência de manifestação mais intensa, até o intervalo entre os teores de umidade de 30 e 20%, evidencia que o colapso celular manifesta-se principalmente até o ponto de saturação das fibras (PSF).

Tal comportamento é explicado em virtude de que colapso ocorre durante a retirada da água capilar, estando diretamente relacionado com a permeabilidade da madeira, a qual é influenciada pela densidade, diâmetro dos capilares e obstruções dos capilares, tais como tiloses e pontoações aspiradas, dentre outros fatores (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985).

4.2 Elaboração dos programas de secagem

4.2.1 Variáveis para elaboração dos programas de secagem

Na Tabela 13, são apresentados os valores médios das variáveis obtidas através da aplicação da secagem drástica, os quais foram utilizados para elaborar os programas de secagem aplicados às três espécies.

Tabela 13. Valores médios das variáveis para elaborar os programas de secagem.

Espécie	T.U.i (%)	Variáveis								
		T1	T2	T3	V1	V2	V3	R1	R2	R3
<i>C. citriodora</i>	50,64	27,17	2,31	24,86	0,00856	0,04928	0,00503	2,80	2,60	2,85
<i>E. robusta</i>	79,36	16,93	3,52	13,41	0,01558	0,04952	0,00679	0,00	0,00	0,00
<i>E. saligna</i>	64,70	17,56	3,37	14,19	0,01584	0,04588	0,00835	0,95	1,20	0,95

Em que: T.U.i = teor de umidade inicial (%); T₁ = tempo de secagem da umidade inicial até 5% (h); T₂ = tempo de secagem da umidade inicial até 30% (h); T₃ = tempo de secagem de 30 a 5% de umidade (h); V₁ = velocidade de secagem da umidade inicial até 5% (g/h); V₂ = velocidade de secagem da umidade inicial até 30% (g/h); V₃ = velocidade de secagem de 30 a 5% de umidade (g/h); R1 = rachadura de topo até 5% (un.); R2 = rachadura de topo até 30% (un.); R3 = rachadura de topo de 30 a 5% (un.).

O comportamento da madeira de *E. robusta* deve ser destacado pelos menores valores de tempo de secagem, com exceção do tempo necessário desde o teor de umidade inicial até o de 30%, se comparado com o das demais espécies. Todavia, para a variável citada, é necessário considerar o teor de umidade inicial mais elevado, o que, naturalmente, demandaria mais tempo em relação às espécies que apresentam teor de umidade mais baixo. Além disso, o *E. robusta* apresentou valores de velocidade de secagem mais elevados comparados com as demais espécies, com exceção da velocidade para o *E. saligna* no intervalo de 30% a 5%, indicando que a espécie em questão apresentará menor taxa de secagem abaixo do PSF em relação ao *E. saligna*.

O aspecto mais interessante evidenciado durante a análise da Tabela 13 é a ausência de manifestação de rachaduras nas peças de *E. robusta* que foram submetidas à secagem drástica. Tal comportamento não é frequentemente verificado para madeiras do gênero *Eucalyptus*, quando submetidas a temperaturas tão elevadas. Desse modo, pode-se esperar que essa espécie apresentará uma baixa incidência de rachaduras durante a aplicação do programa de secagem em estufa convencional.

Barbosa et al (2005), adotando a mesma metodologia para elaborar programas de secagem para dez clones híbridos de *Eucalyptus* spp., com massa específica básica de 0,55 g/cm³ e 102,4 % de teor de umidade inicial médio, obtiveram valores médios de 14,31; 5,82 e 8,48 horas para as variáveis T1, T2 e T3, respectivamente. Santos (2002), em estudo com *Eucalyptus grandis*, encontrou valores de 12,72; 4,01 e 8,70 para as variáveis T1, T2 e T3, respectivamente.

Os valores verificados no presente estudo estão acima dos encontrados pelos autores citados para as variáveis T1 e T3, e abaixo dos encontrados para T2. Apesar do menor teor de umidade para as três espécies estudadas, o tempo de secagem, desde a madeira verde até 5% de umidade, bem como de 30% a 5%, pode ter sido superior em razão da maior massa específica e do fato de, possivelmente, essas espécies apresentarem menor permeabilidade. Tal constatação evidencia que, de modo geral, as três espécies apresentarão maior dificuldade quanto a sua secagem, especialmente quanto ao tempo, se comparados os resultados deste estudo ao trabalho daqueles autores.

A mesma tendência foi verificada para as variáveis de velocidade de secagem, com exceção da velocidade desde verde até 30% de teor de umidade. Santos (2002) obteve valores para V1, V2 e V3 iguais a 0,017; 0,0335 e 0,0091, respectivamente. Barbosa et al. (2005) obtiveram valores médios de 0,0187; 0,0337 e 0,0082, para V1, V2 e V3, respectivamente. No entanto, esses valores estão mais próximos do verificado no presente estudo, especialmente, para as madeiras de *E. saligna* e *E. robusta*.

Madeiras com maior massa específica necessitam de mais tempo para secar, se comparadas a madeiras de massa específica menor, pois esta variável é estreitamente relacionada com a permeabilidade, que é um dos fatores intrínsecos da madeira que mais influenciam na secagem (Martins, 1988). Apesar de essa afirmação ser questionável, a madeira de *C. citriodora*, que apresenta a maior massa específica, necessitou maior tempo de secagem e, de modo geral, menores taxas de secagem.

Todavia, segundo Andrade (2000), espécies de maior massa específica possuem maior espessura da parede celular e menor volume do lume. Dessa forma, madeiras de maior massa específica possuem maior quantidade de água higroscópica, cuja movimentação é mais lenta. O mesmo autor cita que, por outro lado, espécies de menor massa específica apresentam maior quantidade de água no estado líquido, cuja movimentação depende principalmente do raio dos capilares.

Quanto à manifestação de rachaduras, R1, R2 e R3, Barbosa et al. (2005) obtiveram valores médios de 1,36; 1,36 e 1,35, respectivamente, ao passo que Santos (2002) observou valores de 1,2; 1,2 e 1,1 para as mesmas variáveis. Os valores citados foram próximos aos verificados para o *E. saligna* e inferiores aos verificados para o *C. citriodora*.

Analisando comparativamente, pode-se aferir que a velocidade de secagem, a manifestação de rachaduras e o tempo de secagem (T1 e T3), nos ensaios prévios para a madeira de *E. saligna*, apresentaram valores próximos aos verificados por Barbosa et al. (2005), indicando que o comportamento dessa espécie durante a secagem poderá se assemelhar ao apresentado no trabalho realizado pelos autores acima citados.

Para fins de comparação, devido à inexistência de estudos com *C. citriodora* adotando a metodologia utilizada no presente estudo, optou-se por relacionar os resultados obtidos neste trabalho com os alcançados por Andrade (2000), para as madeiras de *Eucalyptus tereticornis* e Jutaí-cica (*Martiodendron* sp.). A comparação com a primeira espécie se deve às semelhanças entre as variáveis avaliadas, e com a segunda, à aplicação programa de secagem elaborado pelo autor citado acima. Com isso, utilizaram-se por base os resultados obtidos no estudo de Andrade (2000) para Jutaí-cica, para comparar com a madeira de *Corymbia citriodora* utilizada no presente estudo, principalmente após a secagem em estufa convencional. Os dados comparativos entre as espécies são apresentados na Tabela 14, para evidenciar a semelhança entre as mesmas.

Tabela 14. Comparação entre os valores médios de teor de umidade inicial, massa específica básica e variáveis do ensaio de secagem drástica.

Espécie	TUi (%)	ρ_b (g/cm ³)	T2	V1	V2	V3	R1	R2	R3
<i>E. Tereticornis</i>	48,30	0,80	2,8	0,0107	0,0283	0,0073	2,25	2,25	2,21
<i>Martiodendron sp</i>	52,60	0,78	2,5	0,0172	0,0403	0,0112	1,00	1,00	1,00
<i>C. citriodora</i>	50,64	0,82	2,3	0,0086	0,0493	0,0050	2,80	2,60	2,85

Em que: TUi = teor de umidade inicial (%); ρ_b = massa específica básica (g/cm³) T₂ = tempo de secagem da umidade inicial até 30% (h); V₁ = velocidade de secagem da umidade inicial até 5% (g/h); V₂ = velocidade de secagem da umidade inicial até 30% (g/h); V₃ = velocidade de secagem de 30 a 5% de umidade (g/h); R1 = rachadura de topo até 5% (un.); R2 = rachadura de topo até 30% (un.); R3 = rachadura de topo de 30 a 5% (un.).

As características do *C. citriodora* assemelham-se muito às do *E. tereticornis*, com exceção do tempo e da velocidade de secagem desde a condição verde até 30%, verificando-se valor bem superior para a primeira. Para as demais variáveis, as duas espécies apresentam valores muito próximos, possivelmente devido à combinação entre o teor de umidade baixo e a massa específica básica elevada de ambas. Comparativamente com o Jutaí-cica, os valores de teor de umidade inicial e massa específica também foram semelhantes, assim como o tempo e a velocidade

de secagem desde a condição verde até 30%. Para as demais variáveis, as duas espécies apresentaram valores distintos, apesar do teor de umidade e da massa específica próximos. Com isso, é evidente que apenas o teor de umidade inicial e a massa específica não são parâmetros confiáveis para empregar um programa de secagem elaborado para determinada espécie em outra, mesmo que com características semelhantes. Segundo Klitzke (2005), aspectos anatômicos e químicos, como o diâmetro dos vasos, espessura da parede celular e teor de extrativos, podem apresentar influência no comportamento da secagem de espécies que, aparentemente, possuem propriedades físicas semelhantes.

Na Tabela 15, são apresentados e comparados os valores médios do tempo de secagem na avaliação prévia para as três espécies para distintos intervalos de teor de umidade.

Tabela 15. Valores médios do tempo de secagem em diferentes intervalos.

Espécie	T1 (h)	T2 (h)	T3 (h)
<i>C. citriodora</i>	27,17 b	2,31 b	24,86 b
<i>E. robusta</i>	16,93 a	3,52 a	13,41 a
<i>E. saligna</i>	17,56 a	3,37 a	14,19 a
F calculado	57,33*	8,88*	77,14*

Em que: T_1 = tempo de secagem da umidade inicial até 5% (h); T_2 = tempo de secagem da umidade inicial até 30% (h); T_3 = tempo de secagem de 30 a 5% de umidade (h). Médias seguidas de uma mesma letra, em uma mesma coluna, não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância. *: significativo a 5%.

Analisando os dados, verificou-se que as espécies *E. robusta* e *E. saligna* apresentaram os menores valores, não diferindo entre si estatisticamente, enquanto que a de *C. citriodora* apresentou os maiores valores, diferindo das demais.

Os valores médios obtidos para a velocidade de secagem em distintos intervalos de teor de umidade na avaliação prévia das três espécies é apresentado na Tabela 16.

Tabela 16. Valores médios da velocidade de secagem em diferentes intervalos.

Espécie	V1 (g/h)	V2 (g/h)	V3 (g/h)
<i>C. citriodora</i>	0,00856 b	0,04928 a	0,00503 c
<i>E. robusta</i>	0,01558 a	0,04952 a	0,00679 b
<i>E. saligna</i>	0,01584 a	0,04588 a	0,00835 a
F calculado	35,18*	1,31 ^{NS}	25,88*

Em que: V_1 = velocidade de secagem da umidade inicial até 5% (g/h); V_2 = velocidade de secagem da umidade inicial até 30% (g/h); V_3 = velocidade de secagem de 30 a 5% de umidade (g/h); Médias seguidas de uma mesma letra, em uma mesma coluna, não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância. *: significativo a 5%; ^{NS}: não significativo a 5%.

Não foi verificada diferença estatística para os valores médios das três espécies, para a velocidade de secagem, no intervalo da condição verde até 30% de teor de umidade. Para as outras duas variáveis, verificou-se diferença, sendo que, para a velocidade desde a condição verde até 5%, o *C. citriodora* apresentou o menor valor, diferindo do *E. saligna* e do *E. robusta*, que não apresentaram diferença entre si. À velocidade verificada no intervalo de 30% a 5% de teor de umidade, as três espécies apresentaram diferença significativa entre si, com o *E. saligna* apresentando a maior média, seguido pelo *E. robusta*. Já o *C. citriodora* apresentou o menor valor médio.

A análise de tais valores evidencia que o comportamento verificado para as três espécies abaixo do PSF (30%) será observado na aplicação dos programas de secagem. Evidencia ainda que a velocidade de secagem no intervalo entre a madeira verde e o PSF será semelhante para as três espécies.

Quanto às rachaduras, não foi possível realizar a análise de variância em virtude da heterogeneidade dos dados. Isso pode ser observado pelo alto coeficiente de variação (acima de 100%). Além disso, e uma breve discussão acerca das rachaduras nos testes prévios foi realizada no item 4.2.5.

4.2.2 Parâmetros dos programas de secagem

Os programas de secagem foram desenvolvidos utilizando o pressuposto de que pequenas amostras de madeira submetidas à secagem drástica (100°C) apresentarão comportamento similar ao esperado na secagem convencional (Terasawa, 1965 citado por Brandão, 1989).

Para tal, foram utilizadas as variáveis elencadas no item anterior e inseridas nas equações de estimação dos parâmetros do programa de secagem (Tabela 4), cujos valores médios são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17. Parâmetros dos programas de secagem para as três espécies.

Espécie	TI (°C)	TF (°C)	PS
<i>C. citriodora</i>	38,8	68,5	2,08
<i>E. robusta</i>	37,2	67,0	1,92
<i>E. saligna</i>	39,7	67,2	2,07

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

Os parâmetros obtidos para as três espécies apresentam-se coerentes com os encontrados na literatura (Tabela 18).

Tabela 18. Parâmetros dos programas de secagem disponíveis na literatura para a madeira de eucalipto.

Espécie	Ti (°C)	Tf (°C)	P.S.	Autor
<i>E. grandis</i>	40,5	64,9	2,10	Ciniglio (1998)
<i>E. urophylla</i>	40,3	65,5	2,44	Ciniglio (1998)
<i>E. grandis</i>	41,7	65,7	2,17	Andrade et al. (2000)
<i>E. tereticornis</i>	39,0	62,7	2,01	Andrade et al. (2000)
<i>E. grandis</i>	40,0	65,0	2,00	Santos (2002)
<i>Eucalyptus</i> spp.	41,8-44,7	66,0-68,9	2,02-2,44	Barbosa et al. (2005)
<i>E. saligna</i> / <i>E. grandis</i> / <i>E. dunnii</i>	40,0	66,0	2,00	Batista (2009)
<i>E. saligna</i>	39,7	67,2	2,07	Presente estudo (2012)
<i>E. robusta</i>	37,2	67,0	1,92	Presente estudo (2012)
<i>Corymbia citriodora</i>	38,8	68,5	2,08	Presente estudo (2012)

Em que: Ti = Temperatura inicial; Tf = Temperatura final; P.S. = Potencial de Secagem.

Observam-se valores muito próximos entre os obtidos por Batista (2009) e os do presente estudo, para a madeira de *E. saligna*. Não foram encontrados, na literatura, programas de secagem para o *E. robusta* e para o *C. citriodora*, de modo que o primeiro apresentou temperatura inicial mais baixa do que o verificado para qualquer outra espécie de *Eucalyptus*, adotando esta metodologia. Para o *C. citriodora*, a temperatura inicial e o potencial de secagem próximos aos encontrados por Andrade et al. (2000) para *E. tereticornis*, com temperatura final superior.

4.2.3 Programas de secagem

Os programas de secagem desenvolvidos com fases e intervalo de teor de umidade similar para as espécies. Os programas de secagem elaborados e aplicados para *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus robusta* e *Eucalyptus saligna* são apresentados de modo detalhado nos Quadros 1, 2 e 3, respectivamente.

Quadro 1. Programa de secagem para a madeira de *Corymbia citriodora*.

Etapa	TU da madeira (%)	Tbs (°C)	Tbu (°C)	UR (%)	UE (%)	PS
Aquec.	-	39,0	38,5	97,0	-	-
Sec. 1	52%	39,0	38,5	97,0	23,7	2,2
Sec. 2	46%	39,0	38,0	94,0	21,6	2,1
Sec. 3	40%	39,0	37,0	88,0	18,4	2,2
Sec. 4	35%	39,0	36,0	83,0	16,2	2,2
Sec. 5	30%	39,0	35,0	77,0	14,2	2,1
Sec. 6	26%	45,0	40,0	73,0	12,8	2,0
Sec. 7	22%	51,0	44,0	65,0	10,4	2,1
Sec. 8	18%	57,0	48,0	58,0	8,8	2,0
Sec. 9	15%	61,0	48,0	48,0	6,9	2,2
Sec. 10	12%	65,0	49,0	42,0	5,6	2,1
Sec. 11	10%	68,0	49,0	36,0	4,9	2,0
Cond.	-	67,0	60,0	68,0	10,0	-
Resf.	-	40,0	34,0	67,0	11,5	-

Quadro 2. Programa de secagem para a madeira de *Eucalyptus robusta*.

Etapa	TU da madeira (%)	Tbs (°C)	Tbu (°C)	UR (%)	UE (%)	PS
Aquec.	-	37,0	36,5	94,0	21,7	-
Sec. 1	52%	37,0	36,0	94,0	22,6	2,3
Sec. 2	46%	37,0	35,5	90,0	20,9	2,2
Sec. 3	40%	37,0	35,0	88,0	19,0	2,1
Sec. 4	35%	37,0	34,5	84,0	17,5	2,0
Sec. 5	30%	37,0	34,0	82,0	15,8	1,9
Sec. 6	26%	44,0	40,0	77,0	13,7	1,9
Sec. 7	22%	50,0	44,0	70,0	11,6	1,9
Sec. 8	18%	56,0	48,0	62,0	9,5	1,9
Sec. 9	15%	60,0	49,0	54,0	7,9	1,9
Sec. 10	12%	64,0	49,0	44,0	6,3	1,9
Sec. 11	10%	67,0	49,0	38,0	5,3	1,9
Cond.	-	67,0	60,0	68,0	10,0	-
Resf.	-	40,0	34,0	67,0	11,5	-

Quadro 3. Programa de secagem para a madeira de *Eucalyptus saligna*.

Etapa	TU da madeira (%)	Tbs (°C)	Tbu (°C)	UR (%)	UE (%)	OS
Aquec.	-	40,0	39,0	94,0	21,6	-
Sec. 1	52%	40,0	39,0	94,0	21,6	2,4
Sec. 2	46%	40,0	38,5	91,0	19,8	2,3
Sec. 3	40%	40,0	38,0	88,0	18,3	2,2
Sec. 4	35%	40,0	37,0	83,0	16,2	2,2
Sec. 5	30%	40,0	36,0	77,0	14,1	2,1
Sec. 6	26%	46,0	40,5	71,0	12,1	2,1
Sec. 7	22%	52,0	45,0	65,0	10,3	2,1
Sec. 8	18%	56,0	46,5	56,0	8,4	2,1
Sec. 9	15%	60,0	47,5	48,0	7,1	2,1
Sec. 10	12%	64,0	47,5	40,0	5,7	2,1
Sec. 11	10%	67,0	47,0	34,0	4,9	2,0
Cond.	-	67,0	60,0	68,0	10,0	-
Resf.	-	40,0	34,0	67,0	11,5	-

Os programas de secagem foram desenvolvidos com o auxílio de cartas psicrométricas, e a temperatura inicial, definida através dos testes prévios, foi fixada para todas as etapas até atingir 30% de teor de umidade. Os programas de secagem foram elaborados com várias etapas visando promover aumentos pequenos e gradativos na temperatura. Essas etapas, além do intervalo do teor de umidade para cada uma delas, foram fixadas e utilizadas de modo idêntico para os três programas de secagem.

4.3 Avaliação dos programas de secagem

A avaliação dos programas de secagem, elaborados a partir da metodologia empregada neste estudo, baseou-se em cinco aspectos: taxa de secagem, manifestação de defeitos, retratibilidade e coeficiente de anisotropia, teor de umidade final entre as peças e gradientes de umidade durante a secagem.

4.3.1 Taxa de secagem

A taxa de secagem média (T.S.) para cada lote de cada espécie é apresentada na tabela 19, além do tempo da etapa de secagem (t) e do teor de umidade inicial (TU_i) e final (TU_f). O teor de umidade final que é apresentado na tabela abaixo se refere ao valor resultante da média das amostras de controle.

Tabela 19. Teor de umidade inicial e final, tempo e taxa de secagem média.

Espécie	Lote	TUi (%)	TUf (%)	t (h)	TS (%/h)	
<i>Corymbia</i>	01	55,34	9,94	664	0,0684	0,0632
<i>citriodora</i>	02	47,19	10,02	642	0,0579	
<i>Eucalyptus</i>	01	67,66	9,35	414	0,1408	0,1258
<i>robusta</i>	02	92,68	9,92	746	0,1109	
<i>Eucalyptus</i>	01	69,49	10,03	522	0,1139	0,1138
<i>saligna</i>	02	82,75	10,07	640	0,1136	

Em que: TUi = teor de umidade inicial (%); TUf = teor de umidade final (%); t = tempo (h); TS = Taxa de secagem (%/h).

A tendência apresentada na tabela acima para as três espécies, utilizando programas de secagem distintos para cada espécie, está de acordo com o verificado na avaliação preliminar adotando a secagem drástica. Apesar da variação no teor de umidade inicial médio e das características da secagem verificadas entre a avaliação prévia e a tabela cima, o comportamento apresentando pela taxa de secagem média foi similar entre as espécies. O menor valor foi observado para o *C. citriodora*, apesar dos valores também inferiores de teor de umidade inicial; enquanto que, para o *E. robusta* e *E. saligna*, os valores médios foram próximos, apesar das variações verificadas no teor de umidade inicial e do tempo de secagem entre os lotes.

A massa específica, aparentemente, apresentou maior influência na taxa de secagem média do que propriamente o teor de umidade inicial. Além disso, aspectos anatômicos singulares para cada espécie podem ter apresentado influencia na taxa de secagem, o que configuraria a necessidade de realizar avaliações destes aspectos para obter tais informações.

Os valores médios observados para o *E. robusta* e o *E. saligna* são próximos a 0,14 %/h, e 0,15%/h aos verificados para *Eucalyptus grandis* por Batista (2009) e Santos et al. (2003), respectivamente. Fazendo a devida conversão dos resultados obtidos por Andrade (2000) de %/dia para %/h, o autor obteve valores médios iguais a 0,071, 0,060, 0,099 e 0,071 %/h para as madeiras de Freijó (*Cordia goeldiana*), Imbuia (*Ocotea porosa*), Jutaí-cica (*Martiodendron* sp.) e Peroba-mica (*Aspidosperma* sp.), de modo respectivo. O resultado verificado pelo autor para a madeira de imbuia é semelhante ao observado para o *C. citriodora*, visto que a imbuia é uma espécie reconhecidamente de secagem difícil e lenta. Pode-se dizer que, quanto a taxa de secagem, a madeira de *C. citriodora* apresenta

comportamento semelhante à Imbuia, ou seja, apresenta taxa de secagem reduzida. Pelo fato dessas duas espécies apresentarem teor de umidade médio inicial e massa específica distintas, não é possível afirmar que essas duas variáveis influenciam de modo isolado a taxa de secagem.

Stangerlin et al. (2009) obtiveram valores médios de taxa de secagem para *Corymbia citriodora* iguais a 0,054 e 0,028 %/h, para a secagem em estufa solar e ao ar, respectivamente. Já que para o *Eucalyptus saligna*, os mesmos autores obtiveram valores médios de 0,112 e 0,069 %/h, na ordem devida para a secagem em estufa solar e ao ar. Os valores médios verificados no presente estudo, para as duas espécies, são superiores aos obtidos pelos autores para ambos os métodos de secagem, ressaltando-se que os valores para a secagem em estufa solar foram próximos ao verificado na secagem com estufa convencional.

Na tabela 20 são apresentados os valores médios da taxa de secagem acima e abaixo do PSF, para cada lote das três espécies estudadas, além da taxa de secagem média total. Para tal, considerou-se o PSF igual a 30% do teor de umidade para todas as situações e a taxa de secagem apresentada em g/cm².h.

Tabela 20. Taxa de secagem média acima e abaixo do PSF e total.

Espécie	Lote	TUi (%)	Taxa de Secagem (10 ⁻⁴ g/cm ² .hora)		
			Acima do PSF	Abaixo do PSF	Total
<i>Corymbia</i>	01	55,34	7,92	4,34	5,76
<i>citriodora</i>	02	47,19	6,11	4,33	5,00
<i>Eucalyptus</i>	01	92,68	17,3	8,74	14,7
<i>robusta</i>	02	67,66	8,79	4,88	7,27
<i>Eucalyptus</i>	01	69,49	9,92	6,59	8,53
<i>saligna</i>	02	82,75	8,61	5,46	7,39

A maior taxa de secagem foi verificada para o lote 01 de *E. robusta*, sendo a menor observada para o lote 02 de *C. citriodora*. Em termos médios por espécie, o *E. robusta* apresentou a maior taxa de secagem tanto acima quanto abaixo do PSF, e por consequência, maior taxa de secagem total. O *C. citriodora* apresentou menores valores médios para a taxa de secagem, enquanto que o *E. saligna* apresentou taxa de secagem intermediária dentre as três espécies.

A maior diferença média por espécie entre a taxa de secagem acima e abaixo do PSF foi observada para o *E. robusta* ($6,23 \times 10^{-4}$ g/cm².hora), seguido pelo *E. saligna* ($3,24 \times 10^{-4}$ g/cm².hora) e *C. citriodora* ($2,68 \times 10^{-4}$ g/cm².hora).

A taxa de secagem acima do PSF, abaixo e total foi de $17,3 \times 10^{-4}$, $8,74 \times 10^{-4}$ e $14,7 \times 10^{-4}$ g/cm².hora, respectivamente, para o lote 01 de *E. robusta*. Tais valores foram sensivelmente superiores aos observados para o lote 02, apresentando taxa de secagem de $8,79 \times 10^{-4}$, $4,88 \times 10^{-4}$ e $7,27 \times 10^{-4}$, respectivamente para a taxa de secagem acima do PSF, abaixo e total. Por alguma razão desconhecida, a taxa de secagem verificada para o lote 01 de *E. robusta* foi praticamente o dobro da observada para o lote 02 da mesma espécie.

Uma das prováveis razões para essa diferença entre a taxa de secagem dos lotes pode ser explicada pela maior quantidade no lote 01 de peças retiradas próximas a medula. Isso em virtude da espécie apresentar cerne quebradiço, e nessa porção conter maior quantidade de madeira proveniente de lenho juvenil, o que pode ter acelerado o processo de secagem nesse lote. Isso também pode ser atribuído ao comportamento distinto entre os valores médios do *E. robusta* e *E. saligna*.

O comportamento diferenciado entre o *E. robusta* e o *E. saligna* não era esperado, visto que, nos ensaios preliminares, as madeiras das duas espécies apresentaram taxas de secagem média próximas. O comportamento similar entre as espécies foi verificado comparando o lote 02 de *E. robusta* ao *E. saligna*.

A taxa de secagem observada acima do PSF para o *C. citriodora* foi aproximadamente 32% inferior a verificada para o *E. saligna*. Comparando as mesmas espécies quanto à taxa de secagem abaixo do PSF, a diferença é ainda maior, sendo que o *E. saligna* apresentou valor médio 42% superior ao *C. citriodora*. Para a taxa de secagem total, a diferença percentual entre ambas as espécies foi de aproximadamente 48%. Em termos práticos, isso significa que, para proceder a secagem de duas peças dessas espécies, com mesmas dimensões em um período igual de tempo, a peça de *E. saligna* perderá aproximadamente 50% a mais de umidade comparada a peça de *C. citriodora*.

Nas figuras 21 e 22 são apresentadas as curvas características de secagem para os lotes 01 e 02, respectivamente de *Corymbia citriodora*. Complementarmente, foi estimada uma regressão para o conjunto de dados observados através do melhor ajuste do modelo em relação ao comportamento dos dados no decorrer da secagem.

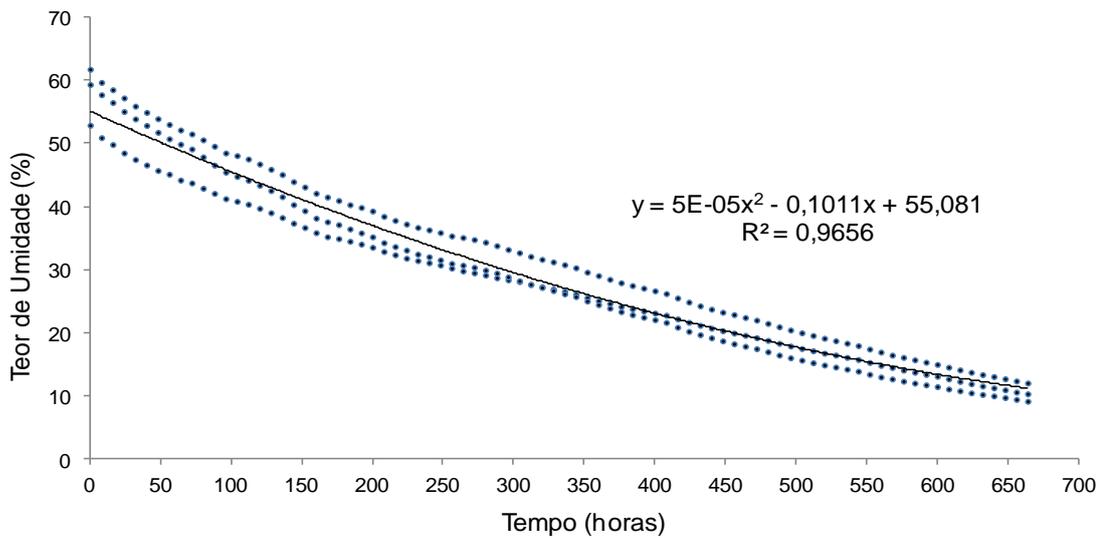


Figura 21: Curva de secagem para o lote 01 de *Corymbia citriodora*.

Fonte: o autor (2012).

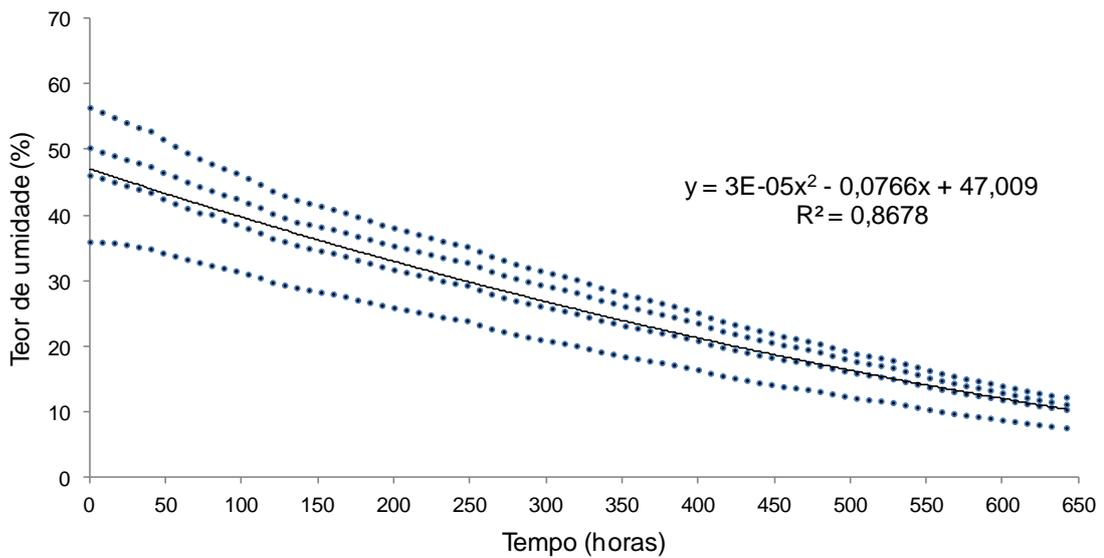


Figura 22: Curva de secagem para o lote 02 de *Corymbia citriodora*.

Fonte: o autor (2012).

Nas figuras 23 e 24 são apresentas as curvas características de secagem para os lotes 01 e 02, na ordem devida de *Eucalyptus robusta*. Complementarmente, foi estimada uma regressão para o conjunto de dados observados através do melhor ajuste do modelo em relação ao comportamento dos dados no decorrer da secagem.

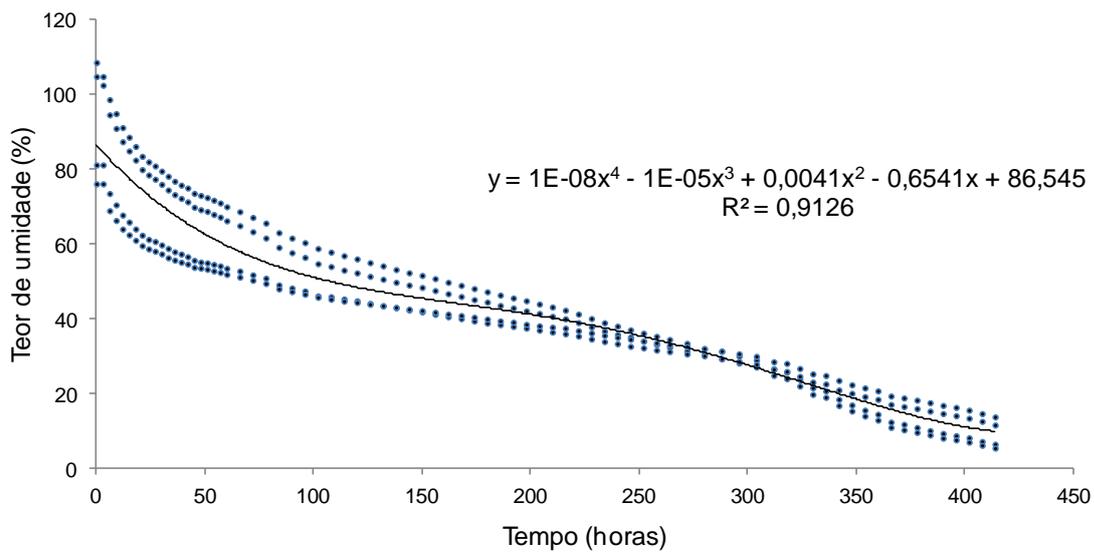


Figura 23: Curva de secagem para o lote 01 de *Eucalyptus robusta*.

Fonte: o autor (2012).

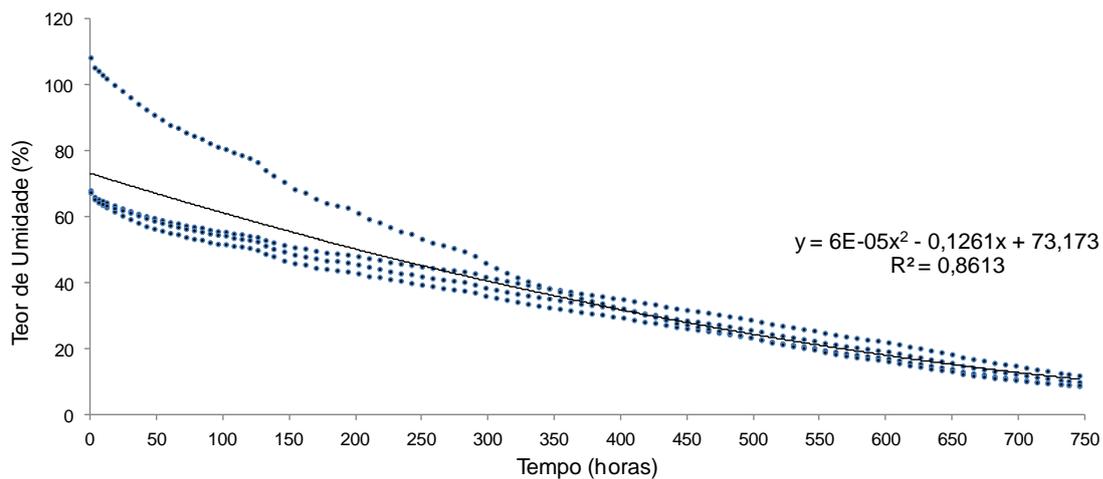


Figura 24: Curva de secagem para o lote 02 de *Eucalyptus robusta*.

Fonte: o autor (2012).

Nas figuras 25 e 26 são mostradas as curvas características de secagem para os lotes 01 e 02, respectivamente de *Eucalyptus saligna*. De forma complementar, foi estimada uma regressão para o conjunto de dados observados através do melhor ajuste do modelo em relação ao comportamento dos dados no decorrer da secagem.

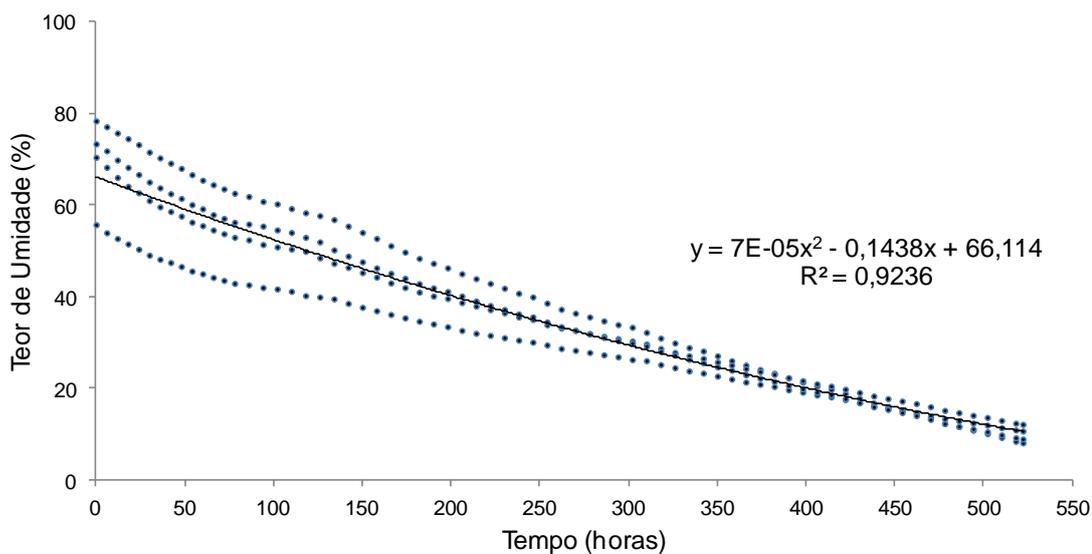


Figura 25: Curva de secagem para o lote 01 de *Eucalyptus saligna*.

Fonte: o autor (2012).

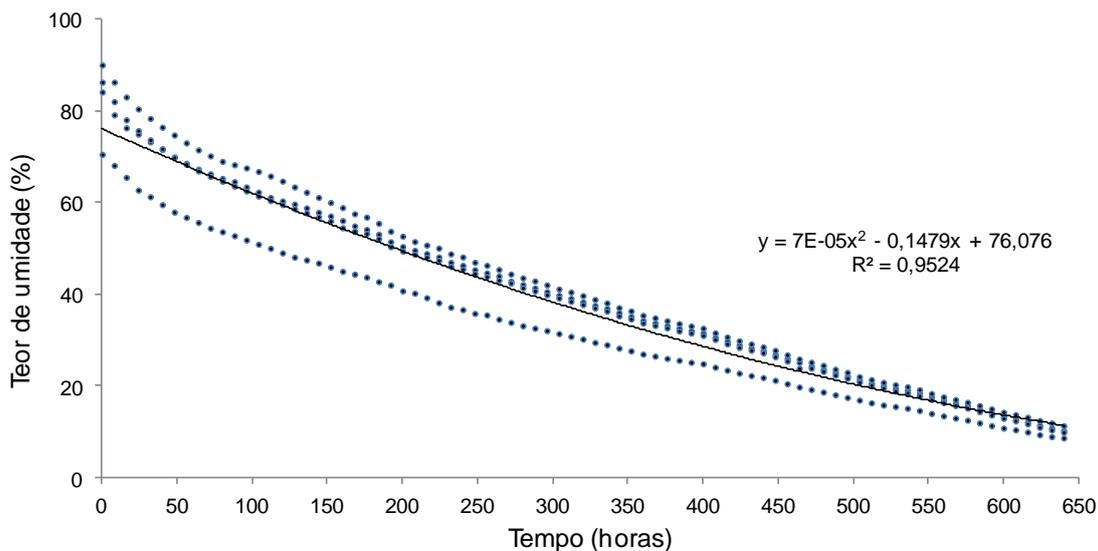


Figura 26: Curva de secagem para o lote 02 de *Eucalyptus saligna*.

Fonte: o autor (2012).

De modo geral, a curva de secagem para os dois lotes das três espécies apresentaram a tendência de redução mais acentuada no início da secagem, e por consequência, os teores de umidade mais elevados. Conforme o teor de umidade reduziu, o decréscimo do mesmo mostrou-se menos acentuado, de modo que, para o *C. citriodora*, essa redução abaixo do PSF ocorreu lentamente, necessitando de praticamente 24 horas para reduzir o teor de umidade em 1%, próximo ao final da secagem.

O lote 01 de *E. robusta* apresentou um comportamento distinto dos demais, observando-se uma redução do teor de umidade mais acentuada no início, reduzindo gradativamente até próximo ao PSF. Ao teor de umidade igual a 30%, em virtude do aumento da temperatura de bulbo seco, verificou-se que a redução na perda de água foi sensivelmente influenciada, elevando a taxa de secagem a partir desse momento, e reduzindo gradativamente até o final da secagem.

O comportamento distinto apresentado pelo lote 01 de *E. robusta* em relação as demais curvas poderia ser explicado pelo aumento da temperatura, que era 37°C até o teor de umidade igual a 30%, e foi elevada para 44°C, mantendo o potencial de secagem. Todavia, a curva de secagem do lote 02, submetido ao mesmo programa de secagem não apresentou o mesmo comportamento descrito para o lote 01.

Existe a possibilidade de durante a seleção casual das tábuas que iriam compor cada lote, um numero maior de peças com presença de cerne quebradiço ter sido selecionado para o lote 01. Valores mais altos em variáveis como taxa de secagem, percentual de rachaduras de topo e de peças com arqueamento no lote 01 comparado ao lote 02 da mesma espécie evidenciam que esta pode ter sido a razão para tal comportamento. Isto porque peças contendo o cerne quebradiço apresentam madeira mais próxima a medula e conseqüentemente mais jovem, o que aumenta a propensão a estes defeitos, bem como uma secagem mais rápida.

Os modelos selecionados foram aqueles que apresentaram melhor ajuste aos dados, não considerando apenas o valor do coeficiente de determinação dos modelos. Desse modo, obtiveram-se modelos matemáticos com alto coeficiente de determinação, adotando polinômios de 2º grau para todos os lotes, exceto para o lote 01 de *E. robusta*. Para esse lote, foi necessário utilizar um polinômio de 4º grau, pois apresentou maior conformidade com a tendência dos dados. Para todos os modelos estimados foi obtido coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,85, sendo que, para o *Eucalyptus saligna*, o R^2 foi superior a 0,92 para ambos os lotes.

4.3.2 Manifestação de defeitos

a) Rachaduras de superfície

As rachaduras de superfície foram avaliadas quanto a sua presença ou ausência antes e após a secagem, e os resultados obtidos para cada um dos dois lotes das três espécies utilizadas são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21. Avaliação das rachaduras de superfície por lote para as três espécies.

Espécie	Lote	Antes da secagem (% peças)	Após a secagem (% peças)	Resultantes da secagem (% peças)
<i>C. citriodora</i>	01	15,63	15,63	0,00
	02	15,63	9,38	-6,25
<i>E. robusta</i>	01	0,00	31,25	31,25
	02	0,00	31,25	31,25
<i>E. saligna</i>	01	9,38	18,75	9,38
	02	6,25	21,88	15,63

Para a madeira de *E. robusta* e *E. saligna*, observou-se uma tendência semelhante entre as espécies e entre os lotes de cada espécie. Para a primeira espécie, verificou-se que 31,25% das tábuas apresentaram rachaduras de superfície em pelo menos uma das faces. A provável explicação para o percentual de peças defeituosas verificadas está na maior retração, visto que esta espécie apresentou a menor massa específica, além de conter cerne quebradiço, material mais jovem, o que aumenta a suscetibilidade a ocorrer rachaduras de superfície. Outro aspecto é o elevado gradiente de umidade médio verificado quando o teor de umidade da madeira era de aproximadamente 40% e na facilidade que a espécie possui de perder água.

Complementarmente, deve ser considerado que a madeira de *E. robusta* apresenta grã irregular, enquanto as madeiras de *C. citriodora* e *E. saligna* apresentam grã regular ou paralela. De acordo com Klitzke (2005), uma madeira onde as fibras são paralelas ao eixo de orientação ou paralelas ao eixo longitudinal da peça serrada é considerada de grã reta, e seu comportamento durante a

secagem auxilia significativamente na redução de defeitos como empenamentos e rachaduras.

Galvão e Jankowsky (1985) complementam essa observação, afirmando que as rachaduras aparecem como consequências da diferença de contração nas direções radial e tangencial da madeira e de diferenças de umidade entre regiões contíguas de uma peça, durante o processo de secagem.

Com relação à manifestação de rachaduras de superfície, em razão da secagem da madeira, é possível citar que, em todas as tábuas de *E. robusta* que apresentaram tal defeito, ele foi decorrente da secagem. Para o *E. saligna*, verificou-se que, em média, 12,51% das peças apresentaram esse defeito em razão do processo de secagem, ao passo que, para o *C. citriodora*, verificou-se um decréscimo médio no percentual de peças com rachaduras de superfície.

Uma hipótese para a redução verificada na madeira de *C. citriodora* é a contração da madeira durante a secagem, ocasionando o desaparecimento das rachaduras. Além disso, a redução foi verificada para o lote 02, conseqüentemente, o segundo lote a ser submetido à secagem. Pode ter ocorrido uma redução do teor de umidade superficial ou até mesmo a reversão das tensões de secagem, nas peças que apresentaram rachaduras de superfície na avaliação antes da secagem, cessando, após a secagem, as fendas verificadas inicialmente.

O comportamento para cada espécie, nas avaliações prévia e sucessora à secagem, quanto à presença de rachaduras de superfície, é apresentado na Figura 27.

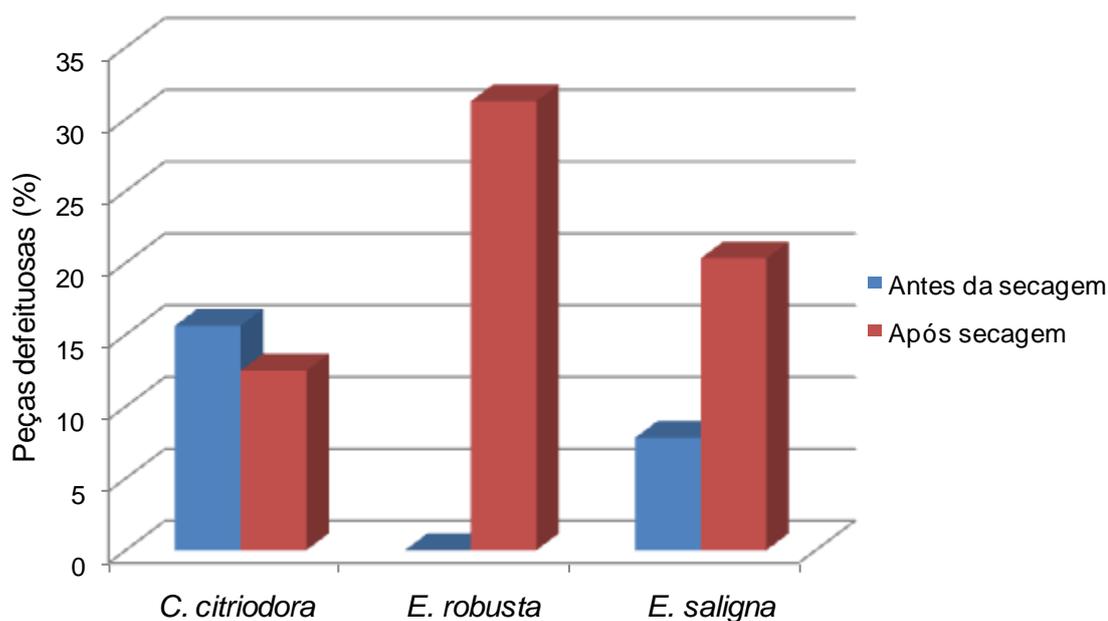


Figura 27: Rachaduras de superfície antes e após a secagem.

Fonte: o autor (2012).

O *E. robusta* apresentou a maior propensão (31,25% das peças) a desenvolver esse tipo de defeito após a secagem, dentre as três espécies utilizadas, seguido pelo *E. saligna* (20,32%) e pelo *C. citriodora* (12,51%). Rosso (2006), estudando secagem combinada (ar livre + convencional) de *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora*, verificou, nas duas espécies, elevados percentuais de peças com rachaduras de superfície após o final da secagem. Para o *C. citriodora*, a autora encontrou valores de 78,13% e 34,38% para a avaliação no verão e inverno, respectivamente, e para o *E. saligna*, de 46,88% e 34,88%, para as mesmas épocas do ano. Andrade (2000) verificou que 8% das peças de Jutaí-cica apresentaram rachaduras de superfície, índice inferior aos 12,51% verificados para o *C. citriodora*.

Skolmen (1963), avaliando a secagem ao ar de *Eucalyptus robusta*, verificou que as rachaduras de superfície ocorriam em pequena quantidade sobre as tábuas: em média 0,9 cm lineares por tábua. O mesmo autor verificou a manifestação de rachaduras de superfície em 7,7% das peças submetidas à secagem ao ar. No presente estudo, praticamente um terço das tábuas apresentaram rachaduras de superfície.

Stangerlin et al. (2009), realizando secagem ao ar livre e em estufa solar, verificou, após a secagem, para *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*, que

80,00% e 58,18%, 16,36% e 23,64%, respectivamente, das peças apresentaram rachaduras de superfície. Para a primeira espécie, o percentual de peças com rachaduras de superfície foi superior ao verificado no presente estudo, utilizando a secagem convencional. Para o *Eucalyptus saligna*, os valores encontrados, neste estudo, foram próximos aos verificados pelos autores citados acima.

Batista (2009), utilizando *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*, verificou 3,70%, 0% e 4,94%, respectivamente, para o percentual de peças que apresentaram rachaduras de superfície. Os valores encontrados pelo autor acima para o *E. saligna* são inferiores aos obtidos no presente estudo.

Apesar das dimensões lineares das rachaduras de superfície não terem sido avaliadas, as mesmas possuíam dimensões reduzidas. A presença de uma rachadura de pequena dimensão era considerada justificativa para classificar a peça como defeituosa para este aspecto.

As rachaduras de superfície não causaram grandes prejuízos na qualidade da madeira, em virtude das dimensões reduzidas das mesmas.

b) Índice de rachaduras de topo

As rachaduras de topo foram mensuradas, e cada peça foi classificada de acordo com a NBR 9487, considerando a pior face da mesma. Os resultados obtidos para o índice de rachadura de topo (IRT) antes, após e ocasionados pela secagem, para cada lote das três espécies, são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22. Índice de rachaduras de topo.

Espécie	Lote	IRT (%)		
		Antes da secagem	Após a secagem	Resultante da secagem
<i>C. citriodora</i>	01	2,49	4,14	1,65
	02	3,01	2,98	-0,03
<i>E. robusta</i>	01	0,78	2,40	1,62
	02	1,99	5,22	3,24
<i>E. saligna</i>	01	6,51	8,00	1,49
	02	7,78	8,82	0,84

A tendência apresentada para os dois lotes das três espécies foi de um leve acréscimo no valor do IRT, entre avaliações realizadas antes e após a secagem, com exceção do lote 02 de *C. citriodora*, que praticamente manteve-se estável. Além disso, o lote 02 de *E. robusta* apresentou maior incidência de rachaduras de topo que os demais lotes, em função da secagem. Isso pode ter ocorrido em razão da qualidade inferior das tábuas, visto que algumas destas foram retiradas da posição central das toras contendo a medula.

Na avaliação antes da secagem, observou-se, através da análise dos dois lotes de cada espécie, que a madeira de *E. saligna* apresentou a maior manifestação de rachaduras, seguida pela de *C. citriodora* e de *E. robusta*, com o menor IRT dentre as três. Esse comportamento era esperado em função dos resultados obtidos em testes prévios. No entanto, após a secagem, a incidência desse tipo de rachadura em *E. robusta* foi superior à nas demais espécies e acima do esperado, em virtude de, nos testes prévios, essa espécie não ter apresentado tal defeito de secagem.

A análise dos valores apresentados na Tabela 22 mostra que os programas de secagem para as três espécies foram adequadamente elaborados para esta variável. Um das maiores dificuldades durante a secagem de madeira de eucalipto é a incidência de rachaduras de topo, e a aplicação dos programas de secagem apresentou resultados satisfatórios.

Na Tabela 23, são apresentados os valores médios absolutos para o IRT das três espécies, nas avaliações antes e após a secagem, e ainda o IRT resultante da secagem.

Tabela 23. Valores médios do IRT para a madeira das três espécies.

Espécie	IRT médio (%)		
	Antes da secagem	Após a secagem	Resultante da secagem
<i>C. citriodora</i>	2,75 aA	3,56 aA	0,81 a
<i>E. robusta</i>	1,38 aA	3,81 aB	2,43 b
<i>E. saligna</i>	7,15 bA	8,31 bA	1,16 ab

Médias seguidas na vertical, por uma mesma letra minúscula ou na horizontal, por uma mesma letra maiúscula, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Não foi verificada diferença estatística entre os valores médios de IRT para as madeiras de *C. citriodora* e *E. robusta*, tanto antes quanto após a secagem. Porém,

o *E. saligna* diferiu estatisticamente das outras duas espécies para ambas as avaliações. Para a avaliação do IRT resultante da secagem, observou-se que o menor valor foi verificado para o *C. citriodora*, seguido pelo *E. saligna* e pelo *E. robusta*, sendo que este último diferiu estatisticamente do primeiro.

A tendência verificada para os valores de IRT das três espécies mostram que a massa específica da madeira não influenciou nesse parâmetro qualitativo. Malan (1995) afirma que madeiras de massa específica mais elevada apresentam maiores níveis de tensão de crescimento. Lima et al. (2004) complementam, expondo que a deformação residual longitudinal decorrente das tensões de crescimento está relacionada com a incidência de rachaduras de topo. Os mesmos autores explicam que o aumento da deformação residual longitudinal, na árvore em pé, ocasiona aumento na incidência de rachaduras na madeira serrada.

Stangerlin et al. (2009) encontraram valores de IRT, para a secagem em estufa solar, de 3,56% e 6,66%, para o *C. citriodora*, antes e após a secagem, respectivamente, e para secagem ao ar, de 4,99 e 8,37, respectivamente. O IRT resultante da secagem, encontrado pelo autor citado acima, foi de 3,11 e de 3,38, para a secagem em estufa solar e ao ar. Esses valores estão acima dos verificados no presente estudo, indicando que, além de uma menor incidência desse defeito antes da secagem, o método de secagem utilizado apresentou um menor acréscimo no IRT médio das tábuas.

Rosso (2006) obteve valores médios de IRT para *C. citriodora*, em secagem combinada, iguais a 14,83% e 2,9%, para os períodos de verão e inverno, respectivamente. No entanto, deve-se salientar que a autora obteve valores médios iguais a 5,30% e 0,84%, para o IRT antes da secagem nos períodos de verão e inverno, respectivamente. Os resultados obtidos no presente estudo são inferiores aos verificados pela autora para o período de verão, e semelhantes aos do inverno, porém, necessitando de menos tempo.

Para a madeira de *E. saligna*, Stangerlin et al. (2009) encontraram valores de IRT para a secagem em estufa solar de 2,90% e 4,49%, antes e após a secagem, respectivamente, e de 4,11 e 5,88 para a secagem ao ar, respectivamente. O IRT resultante da secagem apresentou valores de 1,60 e 1,70 para a secagem em estufa solar e ao ar. Os valores encontrados no presente estudo estão acima dos valores citados para as avaliações antes e após a secagem, contudo, para o IRT resultante da secagem, os valores foram inferiores, mesmo que um tanto próximos.

Rosso (2006) obteve valores médios de IRT em secagem combinada para *E. saligna* iguais a 1,9% e 3,1%, antes da secagem para o verão e o inverno, respectivamente, e a 6,5% e 4,6%, após a secagem para o período do verão e do inverno, respectivamente. Tais valores médios absolutos são inferiores aos verificados neste estudo. No entanto, é necessário salientar que a diferença entre o IRT, antes e após a secagem, no presente estudo, foi de 1,16%, contra 4,6% e 1,5% encontrados pela autora supracitada para os períodos de verão e inverno, respectivamente.

Para ilustrar o comportamento das três espécies, antes e após a secagem, quanto ao IRT, abaixo é apresentada a Figura 28.

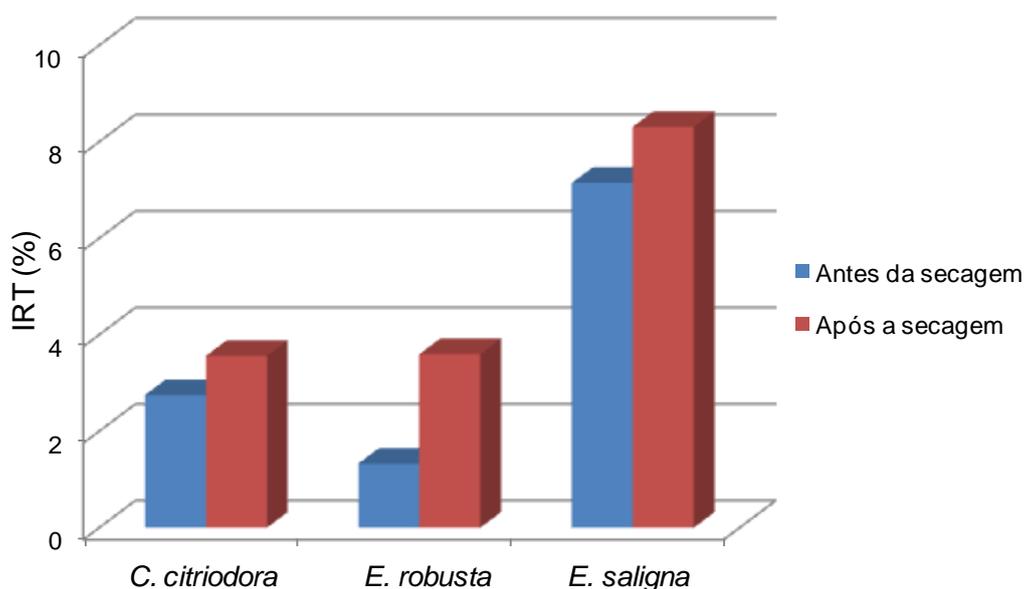


Figura 28: Índice de rachaduras de topo antes e após a secagem.

Fonte: o autor (2012).

Observando a figura acima e os aspectos citados anteriormente neste item, pode-se afirmar que os programas de secagem para as três espécies foram adequadamente elaborados para essa variável, visto que o acréscimo médio para as três espécies foi de 1,41. Uma das maiores dificuldades durante a secagem de madeira de eucalipto é a incidência de rachaduras de topo, e a aplicação dos programas de secagem apresentou resultados satisfatórios.

Na Tabela 24, são apresentados os resultados referentes à classificação das tábuas em função do IRT, de acordo com a NBR 9487. Para proceder à

classificação, as tábuas de ambos os lotes de cada espécie foram agrupadas. O percentual de peças em cada classe é apresentado na tabela abaixo. É necessário ressaltar que, para fazer a distinção entre as primeiras três classes, outros aspectos que não foram avaliados no presente estudo devem ser considerados.

Tabela 24. Classificação das tábuas quanto ao IRT por espécie (%).

Espécie	Avaliação	Classes		
		1 ^a , 2 ^a e 3 ^a	4 ^a	Desclassificada
<i>C. citriodora</i>	Antes da secagem	90,62%	9,38%	0,00%
	Após a secagem	89,06%	10,94%	0,00%
<i>E. robusta</i>	Antes da secagem	98,38%	1,62%	0,00%
	Após a secagem	84,70%	15,30%	0,00%
<i>E. saligna</i>	Antes da secagem	75,00%	23,44%	1,56%
	Após a secagem	67,19%	31,25%	1,56%

Na avaliação antes da secagem, a madeira de *E. robusta* apresentou a melhor qualidade neste aspecto, com 98,38% das peças classificadas como de 1^a, 2^a ou 3^a classes, seguido pelo *C. citriodora* (90,62%) e pelo *E. saligna*, com 75%. As demais peças integraram a 4^a classe, exceto para uma peça de *E. saligna* que foi desclassificada. Após a secagem, houve uma redução no percentual de peças nas classes de maior exigência (1^a, 2^a ou 3^a), assim como um aumento de mesma ordem na 4^a classe. Esse comportamento possui estreita relação com o IRT médio (Tabela 23), onde o *E. robusta* apresentou o maior percentual de mudança de classe em razão da secagem, seguido pelo *E. saligna* e *C. citriodora*, que apresentou o maior percentual de peças com a melhor classificação possível para esse parâmetro de qualidade da madeira.

Ao comparar o percentual de peças defeituosas com os resultados obtidos por outros autores, observaram-se os critérios utilizados em cada trabalho para evitar análises e conclusões equivocadas. Rosso (2006) e Stangerlin et al. (2009) utilizaram como critério a 4^a classe da Norma para Classificação de Madeira Serrada de Folhosas do IBDF (1983), cujo critério é o mesmo adotado para a 4^a classe da Norma NBR-9487 (ABNT, 1986). Já outros autores, como Skolmen (1963) e Batista (2009), utilizaram o percentual de peças que apresentaram rachaduras de topo. Para fins de comparação de resultados com esses dois últimos autores, foi obtido o

mesmo parâmetro para as espécies *E. robusta* e *E. saligna*. É necessário ressaltar que, no trabalho desenvolvido por Batista (2009), as peças possuíam dimensão de 74,5 cm de comprimento, enquanto, no presente trabalho, as tábuas possuíam dimensão média de 2,70 m.

Rosso (2006) verificou que 21,88% e 3,13% das tábuas de *C. citriodora* foram consideradas defeituosas para os períodos de verão e inverno, respectivamente. Stangerlin et al. (2009) verificaram, para a mesma espécie, peças defeituosas apenas após a secagem em estufa solar (5,36%), não verificando na secagem ao ar. No presente estudo, nenhuma peça dessa espécie apresentou defeito acima do permitido. Para o *E. saligna*, Rosso (2006) obteve 9,38% (valor este já verificado na avaliação antes da secagem) e 3,12% de peças defeituosas para a secagem nos períodos de verão e inverno. Já Stangerlin et al. (2009) encontraram 3,12% de peças defeituosas para a secagem em estufa solar, não verificando peças com esse defeito acima do permitido na secagem ao ar. A tendência de um percentual muito pequeno de tábuas desclassificadas dessa espécie em virtude da secagem também foi verificada neste estudo.

Na Figura 29, observam-se, comparativamente, os resultados obtidos para as três espécies quanto ao percentual de peças que apresentaram rachaduras de topo, independente do tamanho das mesmas.

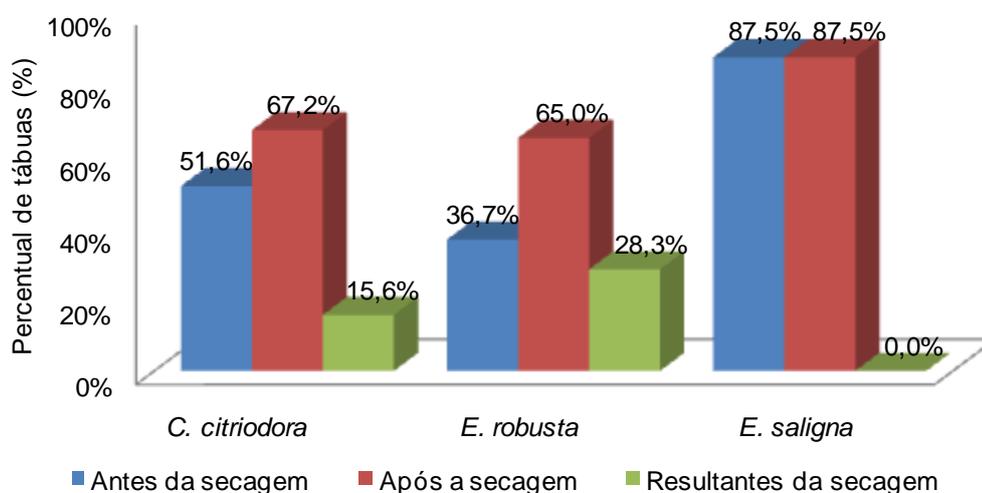


Figura 29: Percentual de tábuas com rachaduras de topo por espécie.

Fonte: o autor (2012).

Skolmen (1963) avaliou a secagem ao ar de *E. robusta* e verificou que 36,1% das tábuas apresentaram rachaduras de topo ao final da secagem. No presente estudo, considerando-se o percentual de tábuas que apresentaram tal defeito após a secagem, o valor foi superior ao obtido por aquele autor. No entanto, considerando o percentual de peças que apresentaram rachaduras de topo em decorrência da secagem, foi verificado um acréscimo de 28,3%.

Batista (2009), realizando secagem convencional de *E. saligna*, obteve 4,94% de peças com rachaduras de topo após a secagem. O percentual de peças com rachaduras foi de 87,5%, antes e após a secagem, o que resultou na ausência de tábuas com manifestação desse defeito atribuído ao processo de secagem.

No entanto, ambos os autores não especificam se os resultados obtidos referem-se à avaliação apenas após a secagem, desconsiderando eventuais defeitos que a madeira apresentou antes do procedimento, bem como se os defeitos são aqueles verificados em decorrência da secagem. Em função disso, não foi possível avaliar se os resultados obtidos, neste estudo, foram melhores ou não em relação aos dois trabalhos citados acima.

De modo geral, a secagem provocou uma pequena redução na qualidade das tábuas avaliadas, porém, não inviabilizou a comercialização e o uso de nenhuma das peças. Considerando-se que as espécies em estudo são tidas como madeiras refratárias, os resultados obtidos são satisfatórios.

c) Índice de perda por rachaduras de topo

O índice de perda por rachaduras de topo (IPRT) médio, para cada uma das três espécies, nas avaliações antes, após a secagem e decorrentes da mesma, é apresentado na Tabela 25.

Tabela 25. Avaliação do índice médio de perda por rachadura de topo.

Espécie	IPRT (%)		
	Antes da secagem	Após a secagem	Decorrente da secagem ^{NS}
<i>C. citriodora</i>	2,13 a ^{NS}	2,85 a ^{NS}	0,72
<i>E. robusta</i>	1,57 a A	2,79 a B	1,22
<i>E. saligna</i>	4,99 b ^{NS}	5,68 b ^{NS}	0,69

Médias seguidas na vertical por uma mesma letra minúscula ou na horizontal por uma mesma letra maiúscula, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade; ^{NS} = não significativo a 5% de probabilidade.

O menor índice de perda por rachadura de topo, antes e após a secagem a secagem, foi verificado para o *E. robusta*, que não diferiu estatisticamente do *C. citriodora*. Por sua vez, assim como na avaliação do IRT, a madeira de *E. saligna* apresentou os maiores valores para as duas avaliações, diferindo das outras duas espécies.

A análise de variância não verificou significância para o IPRT de *Corymbia citriodora* e de *Eucalyptus saligna*, nas avaliações antes e após a secagem. Para as peças de *Eucalyptus robusta*, verificou-se diferença significativa entre a avaliação antes e após a secagem, indicando que a secagem promoveu um aumento dessa variável para a espécie em questão.

O comportamento descrito acima é idêntico ao verificado na avaliação do IRT, indicando que a avaliação deste poderia ser substituída pelo IPRT, visto que este é mais prático que aquele, especialmente quanto à facilidade de ser mensurado. Além disso, o IPRT apresenta uma maior conformidade com o real aproveitamento da madeira em função da perda ocasionada pelas rachaduras de topo, bem como das limitações impostas quanto à utilização das peças por tais defeitos.

Os dados obtidos para as avaliações do IRT e IPRT, para as três espécies, são apresentados nas Figuras 30 e 31, respectivamente, antes e depois da secagem.

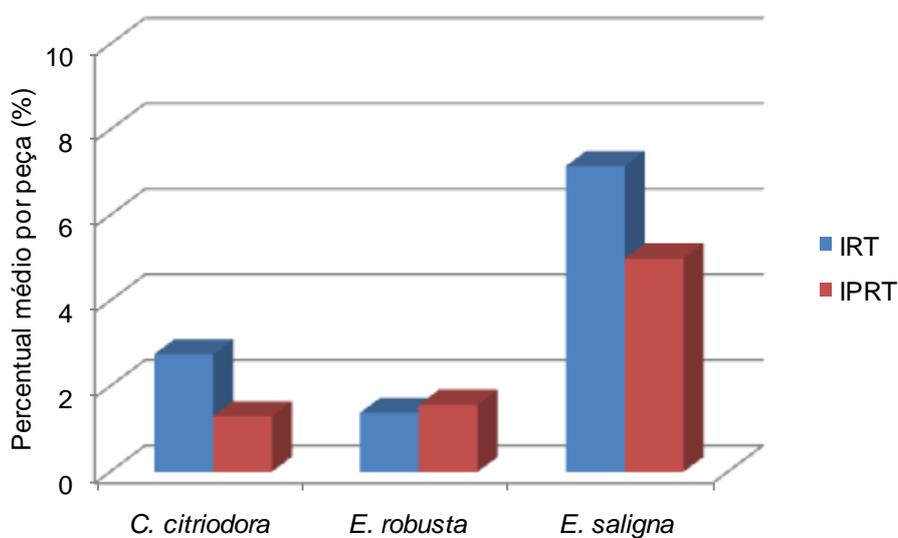


Figura 30: Avaliação do Índice de Rachadura de Topo (IRT) e Índice de Perda por Rachadura de Topo (IPRT) antes da secagem.

Fonte: o autor (2012).

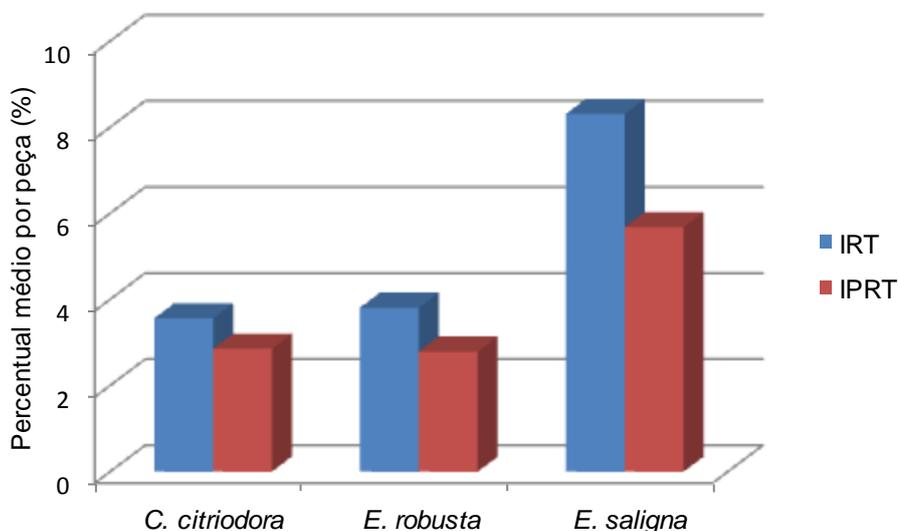


Figura 31: Avaliação do IRT e IPRT após a secagem.

Fonte: o autor (2012).

Com os resultados obtidos no presente estudo, é possível verificar claramente a diferença entre os dois índices. Em situações onde determinada peça apresenta um número maior de rachaduras em um mesmo topo, a diferença entre os mesmos é ainda mais evidente. Tal diferença ocorre porque o IRT é calculado com base no somatório de todas as rachaduras de topo que determinada peça apresenta em ambos os topos de cada face, sendo considerada a pior face. Já o IPRT é calculado

considerando a maior rachadura de topo de cada topo, independente da face em que aquela estiver situada, somando-se o comprimento das mesmas.

Complementarmente, as peças foram classificadas quanto ao IPRT, de modo semelhante ao realizado no item anterior, porém, adotou-se a Tabela 3 para realizar tal classificação. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 26, para as avaliações antes e após a secagem das três espécies.

Tabela 26. Classificação das tábuas quanto ao IPRT.

Espécie	Avaliação	Classes				
		A	B	C	D	E
<i>C. citriodora</i>	Antes da secagem	81,25%	18,75%	0,00%	0,00%	0,00%
	Após a secagem	75,00%	21,87%	3,13%	0,00%	0,00%
<i>E. robusta</i>	Antes da secagem	86,43%	11,96%	1,61%	0,00%	0,00%
	Após a secagem	74,70%	21,96%	3,34%	0,00%	0,00%
<i>E. saligna</i>	Antes da secagem	52,25%	29,69%	14,06%	0,00%	0,00%
	Após a secagem	51,56%	31,25%	15,63%	1,56%	0,00%

A classificação das peças pelo valor do IPRT mostrou que, após a secagem, o *C. citriodora* apresentou a maior percentagem de peças com a melhor classe de qualidade, seguido pelo *E. robusta*, com valores praticamente iguais. O *E. saligna* apresentou o menor percentual de peças na classe A. Comparativamente, o processo de secagem reduziu a quantidade de peças com classificação A, aumentando os percentuais de peças que foram inclusas nas classes B e C. Apenas 1,50% das peças de *E. saligna* foram classificadas como “D” após a secagem, não sendo verificadas peças consideradas inadequadas (classe E).

A maior redução em função da secagem para a classificação na melhor classe foi verificada para o *E. robusta*, com redução de 11,73%, seguido pelo *C. citriodora*, que apresentou uma redução de 6,25%. O *E. saligna* apresentou redução de 0,69% de peças na classe A. O mesmo comportamento foi verificado para as classes B e C, contudo, com acréscimo das mesmas em ordem inversamente proporcional ao verificado para a classe A.

d) Arqueamento

O arqueamento, segundo Martins (1988), é caracterizado por uma curvatura ao longo do comprimento da peça, na extremidade da mesma, e é causado pela diferença de contração longitudinal entre as porções laterais da tábuca. Stangerlin (2009) afirma que a presença de diferentes lenhos em uma mesma peça torna a madeira mais suscetível ao desenvolvimento desse defeito de secagem.

A flecha de arqueamento médio para os lotes das três espécies nas avaliações antes e após a secagem, assim como resultante da secagem, é apresentada, de modo geral, na Tabela 27.

Tabela 27. Flecha média de arqueamento para cada lote.

Espécie	Lote	Flecha média de arqueamento (mm/m)		
		Antes da secagem	Após a secagem	Resultante da secagem
<i>C. citriodora</i>	01	1,48	2,20	0,72
	02	1,40	2,01	0,62
<i>E. robusta</i>	01	2,14	3,97	1,83
	02	2,23	3,35	1,12
<i>E. saligna</i>	01	1,82	2,35	0,52
	02	2,84	3,35	0,51

De modo geral, as três espécies apresentaram tendência similar entre os lotes quanto acréscimo na flecha de arqueamento resultante da secagem. O maior acréscimo foi verificado para o *E. robusta*, seguido pelo *C. citriodora*. O *E. saligna* apresentou o menor acréscimo. Entre os lotes de cada espécie, apenas o *E. robusta* não apresentou valores próximos para a flecha de arqueamento resultante da secagem.

Valores médios da flecha de arqueamento para as três espécies (Tabela 28).

Tabela 28. Flecha média de arqueamento para as três espécies.

Espécie	Flecha média de arqueamento (mm/m)		
	Antes da secagem	Após a secagem	Decorrente da secagem
<i>C. citriodora</i>	1,44 aA	2,11 aB	0,67 a
<i>E. robusta</i>	2,18 bA	3,66 bB	1,47 b
<i>E. saligna</i>	2,33 bA	2,85 aA	0,52 a

Médias seguidas na vertical por uma mesma letra minúscula ou na horizontal por uma mesma letra maiúscula, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

As peças de *C. citriodora* apresentaram o menor valor para a flecha média de arqueamento na avaliação antes da secagem, diferindo estatisticamente do *E. robusta* e do *E. saligna*. Esses dois últimos, por sua vez, não apresentaram diferença significativa entre si. Na avaliação após a secagem, novamente, o *C. citriodora* apresentou a menor flecha média, não diferindo do *E. saligna*, enquanto o *E. robusta* apresentou o maior valor médio, diferindo das outras duas espécies. Ao analisar como a secagem influenciou na acentuação desse defeito, observa-se que a espécie que apresentou o menor acréscimo foi o *E. saligna*, não diferindo do *C. citriodora*. O *E. robusta* apresentou o maior acréscimo da flecha média de arqueamento em virtude da secagem, diferindo das outras duas.

Analisando as flechas médias, verifica-se que a secagem ocasionou um acréscimo significativo ao nível de 5% para as madeiras de *C. citriodora* e *E. robusta*, enquanto, para o *E. saligna*, não foi verificada diferença significativa em função do processo de secagem para essa variável.

Severo (1998) avaliou três programas de secagem com intensidades variadas, para *Eucalyptus grandis*, e não verificou peças com arqueamento acima de 5 mm/m para o programa mais suave. Para os dois programas mais severos, o mesmo autor verificou 5 e 7,5% de peças defeituosas. Os valores verificados no presente estudo foram superiores aos encontrados pelo autor citado acima, sendo que apenas o *C. citriodora* apresentou valores próximos para este defeito, com 4,69% de peças defeituosas após a secagem.

Para o *C. citriodora*, Stangerlin (2009) obteve um acréscimo na flecha de arqueamento de 0,22 e 0,19 mm/m para a secagem ao ar e estufa solar, respectivamente, ao passo que Rosso (2006) verificou 0,2 e 0,62 mm/m de acréscimo resultante da secagem no verão e inverno, respectivamente. Os resultados obtidos, neste estudo, estão acima dos verificados pelos autores acima mencionados. No entanto, os valores da flecha de tal defeito após a secagem foram inferiores aos verificados pelos autores referenciados.

Rosso (2006) observou, para o *E. saligna*, flecha de arqueamento igual a 4,09 e 4,69 mm/m após a secagem, para o verão e inverno, com acréscimo em virtude da secagem de 1,11 para o inverno e valores estáveis para o verão. Stangerlin et al. (2009) constataram um acréscimo na flecha média de arqueamento igual a 0,21 e 0,41 mm/m, para secagem ao ar e em estufa solar, respectivamente, e flecha média de 3,08 e 3,67 mm/m, após a secagem. Os valores verificados, no presente estudo,

estão abaixo dos obtidos pelos autores para a flecha média de arqueamento após a secagem (2,85 mm/m) e ligeiramente acima, para a flecha resultante da secagem, dos verificados por Stangerlin et al. (2009).

A classificação das peças quanto ao arqueamento foi realizada de acordo com as recomendações da NBR 9487 (ABNT, 1986) e consistiu na avaliação da flecha verificada antes e após a secagem, para cada tábua, e no percentual de peças adequadas e defeituosas, por lote e espécie, além do percentual de tábuas adequadas por espécie (Tabela 29).

Tabela 29. Classificação das tábuas quanto ao arqueamento, em percentual.

Espécie	Lote	Avaliação	% de tábuas		
			Adequadas	Defeituosas	PTAE
<i>C. citriodora</i>	01	Antes	100%	0%	95,31%
		Após	93,75%	6,25%	
	02	Antes	100%	0%	
		Após	96,87%	3,13%	
<i>E. robusta</i>	01	Antes	100%	0%	76,56%
		Após	65,62%	34,38%	
	02	Antes	96,87%	3,13%	
		Após	87,50%	12,50%	
<i>E. saligna</i>	01	Antes	96,87%	3,13%	89,06%
		Após	93,75%	6,25%	
	02	Antes	90,62%	9,38%	
		Após	84,37%	15,63%	

PTAE: Percentual de tábuas adequadas por espécie.

Com a avaliação realizada antes da secagem, verificou-se que os lotes de *C. citriodora* e o lote 01 de *E. robusta* não apresentavam peças defeituosas, enquanto o lote 02 de *E. robusta* e o lote 01 de *E. saligna* apresentaram 3,13% de peças defeituosas e o lote 02 da última espécie apresentou 9,38% de peças defeituosas. Após a secagem, nenhum lote apresentou 100% de peças adequadas, ou seja, com arqueamento igual ou inferior a 5,0 mm/m. Ambos os lotes de *C. citriodora* apresentaram baixa incidência de peças com este defeito acima do admitido, assim como o lote 01 de *E. saligna*. Os lotes 02 de *E. robusta* e *E. saligna* apresentaram um nível intermediário de peças defeituosas em relação aos demais, com 12,5% e

15,63%, respectivamente. Já o lote 01 de *E. robusta* apresentou a maior incidência, sendo verificado 34,38% de peças defeituosas após a secagem, sendo que, na avaliação prévia, não foram verificadas peças defeituosas neste lote.

Após a secagem, apenas o lote 02 de *C. citriodora* poderia ser classificado na 1ª classe da NBR 9487. Os demais são classificados como 4ª classe, enquanto que, para as espécies, apenas o *C. citriodora* alcançou a melhor classe quanto a esse defeito, com 95,31% de peças adequadas. O *E. saligna* apresentou 89,06%, e o *E. robusta* apresentou o menor percentual com 76,56%.

Stangerlin et al. (2009) verificaram, na secagem ao ar e em estufa solar, 10,91% e 25,45%, respectivamente, de peças defeituosas após a secagem para a madeira de *C. citriodora*. Já Rosso (2006) obteve percentuais de 15,63% para a época de verão, realizando secagem combinada. Esses valores estão acima dos verificados no presente estudo para a mesma espécie.

Skolmen (1963), estudando a secagem ao ar de *E. robusta*, constatou que 18,6% das peças apresentavam empenamento. Porém, o mesmo autor não especifica, em seu trabalho, o tipo de empenamento avaliado, nem se esse percentual refere-se ao somatório de todos os empenamentos verificados.

Para o *E. saligna*, Rosso (2006) constatou que 37,5% das peças apresentaram arqueamento acima do admitido para as duas estações do ano estudadas. Por sua vez, Stangerlin et al. (2010) obtiveram 23,64% e 30,91% de peças defeituosas para a secagem ao ar e em estufa solar, respectivamente. Os percentuais de peças defeituosas verificados no presente estudo são inferiores aos obtidos pelos autores acima citados, para a mesma espécie.

Andrade (2000), adotando a mesma metodologia pra elaborar programas de secagem para Freijó, Jutaí-cica, Peroba-mica e Imbuia, não verificou peças com arqueamento para as três primeiras espécies, enquanto que a última apresentou 10% de peças com tal defeito. Os mesmos resultados foram verificados pelo autor para o encurvamento e encanoamento.

De forma a ilustrar de modo mais contundente o comportamento das três espécies quanto às peças em que o arqueamento verificado foi acima do admitido pela norma, elaborou-se a figura abaixo, mostrando graficamente as peças defeituosas antes e após a secagem (Figura 32).

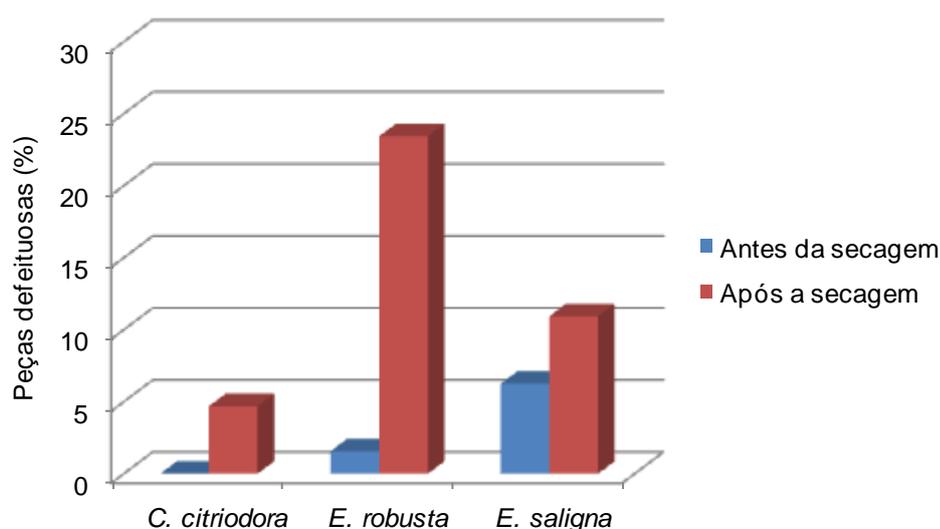


Figura 32: Peças com flecha de arqueamento acima do admitido.

Fonte: o autor (2012).

De acordo com Lima (2005), o arqueamento pode ser reduzido na secagem ao evitar-se o desdobro de toras que apresentem excentricidade na medula. O mesmo autor salienta a importância de ter cuidado quanto à execução de cortes assimétricos, devido ao posicionamento inadequado da tora no carrinho. Além disso, uma das principais causas de arqueamento são peças contendo diferentes lenhos, como juvenil e adulto, visto que os mesmos apresentam comportamentos distintos quanto a contrações durante a secagem.

A madeira de *E. robusta* que possuía peças com presença de lenho juvenil e adulto em maior proporção do que as demais, apresentou o maior percentual de peças com esse defeito de secagem. Apesar da quantidade de peças com lenho adulto e juvenil não ter sido quantificada, pode-se inferir tal afirmação pela presença de aproximadamente um terço das peças com cerne quebradiço no lote 01 da mesma espécie.

e) Encurvamento

O encurvamento ocorre devido a diferentes retrações verificadas em razão da secagem mais acelerada em uma face frente à outra. A presença de lenhos anormais e peças orientadas tangencialmente favorecem o encurvamento da madeira (BRANDÃO, 1989).

Na Tabela 30, é apresentada a flecha de encurvamento médio para os lotes das três espécies, nas avaliações antes, após a secagem e resultantes da secagem.

Tabela 30. Flecha média de encurvamento para cada lote.

Espécie	Lote	Flecha média de encurvamento (mm/m)		
		Antes da secagem	Após a secagem	Resultante da secagem
<i>C. citriodora</i>	01	1,12	0,72	(0,41)
	02	0,78	1,78	1,00
<i>E. robusta</i>	01	1,25	0,36	(0,89)
	02	0,85	1,66	0,81
<i>E. saligna</i>	01	1,53	1,50	(0,03)
	02	2,00	0,90	(1,10)

Observa-se que, para três dos seis lotes submetidos à secagem, ocorreu uma redução na flecha média de encurvamento, sendo que tal comportamento foi verificado em um lote de cada espécie. Essa redução pode ser atribuída ao fato de que, no momento de realizar o empilhamento das tábuas, teve-se o cuidado de posicionar as peças com encurvamento na posição inferior da pilha e com a face encurvada voltada para baixo. Para os demais lotes, verificou-se um aumento na flecha média do encurvamento (lotes 02 do *C. citriodora* e *E. robusta*), enquanto, para o outro lote (lote 01 do *E. saligna*), os valores verificados nas avaliações antes e após a secagem foram praticamente iguais.

Os valores médios da flecha de encurvamento para as três espécies nas avaliações antes e após a secagem, além da flecha média resultante do processo de secagem, são apresentados na Tabela 31.

Tabela 31. Flecha média de encurvamento para as três espécies.

Espécie	Flecha média de encurvamento (mm/m)		
	Antes da secagem	Após a secagem	Decorrente da secagem
<i>C. citriodora</i>	0,95 a ^{NS}	1,07 ^{NS NS}	0,12 b
<i>E. robusta</i>	1,05 a ^{NS}	1,25 ^{NS NS}	0,20 b
<i>E. saligna</i>	1,76 b B	1,20 ^{NS} A	(0,56) a

Médias seguidas na vertical por uma mesma letra minúscula ou na horizontal por uma mesma letra maiúscula, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.
^{NS} = não significativo a 5% de probabilidade.

Rosso (2006) constatou uma redução média na flecha de encurvamento de 1,25 mm/m após a secagem, para o *C. citriodora*, e de 1,39 mm/m, para o *E. saligna*, comparando os valores antes e após a secagem. A flecha média de encurvamento verificada pela autora, para o *C. citriodora* e o *E. saligna*, após a secagem, foi de 0,24 e 0,41. Tais valores são mais satisfatórios se comparados aos verificados no presente estudo. Todavia, há de se mencionar que os valores médios obtidos após a secagem são baixos para as três espécies, na casa de 1,0 mm/m, e que a secagem resultou em um pequeno aumento no encurvamento para o *C. citriodora* e para o *E. robusta*, ao passo que, para o *E. saligna*, esse defeito apresentou redução.

Stangerlin et al. (2009) verificaram que a flecha de encurvamento após a secagem reduziu para o *C. citriodora*, em estufa solar (0,31), e para o *E. saligna*, na secagem ao ar (0,15), enquanto, para os outros dois casos, os valores mantiveram-se praticamente estáveis. Os valores médios de encurvamento para a primeira espécie são próximos aos verificados neste estudo e inferiores para a segunda espécie. No entanto, a flecha média obtida pelos autores, após a secagem, para o *C. citriodora* (1,9 mm/m) e *E. saligna* (1,6 mm/m), são superiores ao verificado no presente estudo para as mesmas espécies.

Avaliando três programas de secagem com níveis de intensidade distintos para *Eucalyptus grandis*, Severo (1998) verificou que 2,5% das peças apresentaram encurvamento acima de 5 mm/m, para o programa mais suave, e 5 e 10% de peças defeituosas para os outros dois programas avaliados. No presente estudo, não foram verificadas peças defeituosas para esse parâmetro qualitativo avaliado.

Para a classificação das peças quanto ao encurvamento, foi adotado o mesmo procedimento descrito para o arqueamento. O percentual de peças adequadas e defeituosas por lote e espécie, além do percentual de tábuas adequadas por espécie, são apresentados Tabela 32.

Tabela 32. Classificação das tábuas quanto ao encurvamento, em percentual.

Espécie	Lote	Avaliação	% de tábuas		
			Adequadas	Defeituosas	PTAE
<i>C. citriodora</i>	01	Antes	100%	0%	100%
		Após	100%	0%	
	02	Antes	100%	0%	
		Após	100%	0%	
<i>E. robusta</i>	01	Antes	100%	0%	100%
		Após	100%	0%	
	02	Antes	100%	0%	
		Após	100%	0%	
<i>E. saligna</i>	01	Antes	100%	0%	100%
		Após	100%	0%	
	02	Antes	96,87%	3,13%	
		Após	100%	0%	

PTAE: Percentual de tábuas adequadas por espécie.

Todos os lotes das três espécies utilizadas não apresentaram peças com flecha de encurvamento acima do admitido após a secagem. Apenas uma peça do lote 02 de *E. saligna* apresentou encurvamento acima de 5mm/m antes da secagem, porém, o mesmo reduziu, obtendo-se, assim, peças livres de encurvamento após a secagem de modo integral.

Rosso (2006) praticamente não verificou peças com encurvamento acima do admitido para as madeiras de *E. grandis*, *C. citriodora* e *E. saligna*, em secagem combinada em duas estações do ano (verão e inverno). Stangerlin et al. (2009) obtiveram resultados semelhantes quanto à incidência de peças com encurvamento após a secagem, para as madeiras de *C. citriodora*, *E. saligna* e *E. tereticornis*, tanto na secagem ao ar quanto em estufa solar. Tais tendências foram verificadas neste estudo, não sendo verificada nenhuma peça com encurvamento acima do admitido para as três espécies estudadas após a secagem.

Alguns autores, como Simpson (1991) e Denig et al. (2000), citam que o encurvamento não é um dos defeitos mais problemáticos na madeira, visto que o mesmo pode ser eliminado através do empilhamento da madeira. O encurvamento é influenciado mais pelo empilhamento em si do que propriamente pelo processo de secagem. Para Bekele (1995) e Ciniglio (1998), a adição de pesos sobre a pilha e/ou

a colocação das peças defeituosas na parte inferior da pilha possibilitam reduzir significativamente o encurvamento.

f) Encanoamento

O encanoamento pode ser resultante da diferença entre as contrações transversais e da exposição de apenas uma face da tábua à secagem (GALVAO e JANKOWSKY, 1985). De modo geral, quanto maior a diferença entre as contrações radial e tangencial, maior o grau do encanoamento (SIMPSON, 1991).

A flecha média de encanoamento para os lotes das três espécies, nas avaliações antes, após e resultantes da secagem, é apresentada na Tabela 33.

Tabela 33. Flecha média de encanoamento para cada lote.

Espécie	Lote	Flecha média de encanoamento (mm)		
		Antes da secagem	Após a secagem	Resultante da secagem
<i>C. citriodora</i>	01	0,0	0,6	0,6
	02	0,0	0,9	0,9
<i>E. robusta</i>	01	0,0	0,7	0,7
	02	0,0	1,5	1,5
<i>E. saligna</i>	01	0,0	1,5	1,5
	02	0,0	1,6	1,6

Conforme esperado, não foi verificada a presença de encanoamento antes da secagem. As três espécies apresentaram tal defeito após a secagem, sendo que os menores valores médios foram verificados para o lote 01 de *C. citriodora* e *E. robusta*, 0,6 e 0,7 mm, respectivamente. Já os maiores valores foram verificados para o lote 02 de *E. robusta* e para os dois lotes de *E. saligna*, com valores médios em torno de 1,5 mm.

Os valores médios da flecha de encanoamento para as três espécies, nas avaliações antes e após a secagem, além da flecha média resultante do processo de secagem, são apresentados na Tabela 34.

Tabela 34. Flecha média de encanoamento para as três espécies.

Espécie	Flecha média de encanoamento (mm)		
	Antes da secagem	Após a secagem	Decorrente da secagem
<i>C. citriodora</i>	0,00 A	0,75 ^{NS} B	0,75
<i>E. robusta</i>	0,00 A	1,11 ^{NS} B	1,11
<i>E. saligna</i>	0,00 A	0,75 ^{NS} B	0,75

Médias seguidas na vertical por uma mesma letra minúscula ou na horizontal por uma mesma letra maiúscula, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. ^{NS} = não significativo a 5% de probabilidade.

Em virtude de todas as tábuas não terem apresentado encanoamento na avaliação antes da secagem, foi realizada apenas a análise de variância após a secagem, não sendo verificada diferença significativa entre as três espécies. A análise do verificado antes e após a secagem foi significativa para as três espécies, o que já era esperado em função de não ter sido verificado tal defeito antes da secagem, mas sim após a secagem.

Os valores médios de encurvamento foram relativamente reduzidos, sendo que o maior valor médio foi observado para o *E. robusta*, com 1,11 mm. As madeiras de *C. citriodora* e *E. saligna* apresentaram valores médios iguais a 0,75 mm. É necessário destacar que o valor máximo admitido pela NBR 9487 para este defeito é de 4 mm, limite este que foi superado apenas por quatro tábuas de *E. robusta*, o que corresponde a 6,25% das peças dessa espécie (Tabela 35).

Rosso (2006) e Stangerlin et al (2006) não verificaram peças com encanoamento superior a 4 mm para *C. citriodora* e *E. saligna*, assim como não verificaram-se no presente estudo.

Severo (1998) avaliou três programas de secagem, com intensidades variadas, para *Eucalyptus grandis*, e verificou que 15% das peças apresentaram encanoamento acima de 4 mm para o programa mais suave, constatando 30 e 42,5% de peças defeituosas para os outros dois programas avaliados. Os valores verificados no presente estudo são inferiores aos encontrados pelo autor citado acima.

Batista (2009) obteve um percentual de peças que apresentaram encanoamento igual a 67,90%, 60,49% e 74,07% para madeiras de *E. saligna*, *E. grandis* e *E. dunnii*, respectivamente. O mesmo autor considerou que essas madeiras apresentaram grande tendência a manifestar esse tipo de defeito de

secagem. No presente estudo, obtiveram-se percentuais de 45,31%, 39,06% e 45,31%, para as madeiras de *C. citriodora*, *E. robusta* e *E. saligna*, respectivamente, adotando a mesma metodologia para a elaboração dos programas de secagem. Todavia, o autor citado acima não especifica a magnitude do defeito, sendo que, desse modo, considera todas as peças que apresentaram esse defeito, sem mencionar a intensidade do encanoamento.

Analisando os percentuais de peças que apresentaram encanoamento por espécie, observa-se que o *E. robusta* apresentou o menor valor percentual, todavia, essa espécie apresentou o maior valor médio. Desse modo, pode-se concluir que, no que se refere ao encanoamento, apesar de ter se manifestado em um menor número de peças, a severidade foi maior nessa espécie, comparativamente com as duas demais.

Na Tabela 35, são apresentados os percentuais de peças adequadas e defeituosas quanto ao encanoamento para cada lote, assim como o percentual de tábuas adequadas por espécie.

Tabela 35. Classificação das tábuas quanto ao encanoamento, em percentual.

Espécie	Lote	Avaliação	% de tábuas		
			Adequadas	Defeituosas	PTAE
<i>C. citriodora</i>	01	Antes	100%	0%	100%
		Após	100%	0%	
	02	Antes	100%	0%	
		Após	100%	0%	
<i>E. robusta</i>	01	Antes	100%	0%	93,75%
		Após	93,75%	6,25%	
	02	Antes	100%	0%	
		Após	93,75%	6,25%	
<i>E. saligna</i>	01	Antes	100%	0%	100%
		Após	100%	0%	
	02	Antes	100%	0%	
		Após	100%	0%	

PTAE: Percentual de tábuas adequadas por espécie.

De acordo com Boone et al. (1992), peças com dimensões fora do padrão prejudicam o empilhamento, fazendo com que algumas fiquem livres para trabalharem, o que pode ocasionar a manifestação de empenamentos.

No Apêndice 01, verifica-se que as tábuas de *E. robusta* apresentam maior variação na espessura, se comparadas às de outras duas espécies. Essa pode ser a explicação para a manifestação mais severa de encanoamento em peças de *E. robusta*.

g) Colapso

A avaliação do colapso foi realizada para as três espécies, porém, o mesmo foi verificado apenas na madeira de *E. robusta*. Essa tendência foi observada nas avaliações prévias, nas quais apenas a espécie em questão apresentou a manifestação de tal defeito. Apesar das condições adversas da secagem drástica (100°C e sem controle da umidade relativa) comparadas com as condições em que a secagem convencional foi conduzida, aquela apresentou conformidade quanto à manifestação de tal defeito de secagem.

A percentagem de peças que apresentaram colapso, nível do colapso e a deformação média, para dos dois lotes de *E. robusta* submetidos à secagem convencional, é apresentada na Tabela 36.

Tabela 36. Percentagem de peças defeituosas e nível do colapso para a madeira de *E. robusta*.

	Peças com colapso (%)	Nível de colapso (%)			d _c (mm)
		Leve	Moderado	Severo	
Lote 01	59,38	46,88	12,50	0,00	1,48
Lote 02	56,25	37,50	18,75	0,00	1,47

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

Aproximadamente, 58% das tábuas submetidas à secagem apresentaram colapso celular. Do total de peças utilizadas de *E. robusta*, em média, 42,19% apresentaram colapso leve e 16,65% colapso moderado, não sendo verificada nenhuma tábua com colapso severo. Campbell e Hartley (1988) afirmam que, de

modo geral, madeiras refratárias à secagem, como madeiras do gênero *Eucalyptus*, apresentam tendência a manifestarem colapso.

Mellado (1993) verificou que 41,7% e 36,1% das peças de *Eucalyptus grandis* apresentaram colapso na avaliação de dois programas de secagem. Ciniglio (1998) avaliou a secagem de *Eucalyptus grandis*, onde 8,3% das peças apresentaram tal defeito. Severo (1998) avaliou três programas de secagem e verificou que a manifestação de colapso ocorreu em 37,5%, 67,5% e 87,5% das tábuas de *Eucalyptus dunnii*. Batista (2009) verificou que, 28,40%, 35,80% e 55,56% das peças de *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*, respectivamente, apresentaram colapso após a secagem.

Apesar da baixa temperatura empregada até a remoção completa da água capilar, aliada à elevada umidade relativa, o *Eucalyptus robusta* apresentou alta suscetibilidade à manifestação de tal defeito. Considerando o potencial de secagem utilizado de 1,92 e a temperatura inicial de 37°C, adotar temperatura e potencial de secagem mais baixos para essa situação, como diversos autores recomendam (Pratt, 1974; Northway, 1996; Ciniglio, 1998; Vermaas, 1998; Martins et al., 1999; Keey et al., 2000 e Andrade 2000), aparentemente, não seria uma alternativa viável, visto que reduzir ainda mais a temperatura e o potencial de secagem elevaria consideravelmente o tempo desta etapa, podendo torná-la inviável.

Desse modo, deve-se considerar a inclusão de uma etapa de tratamento de vaporização na tentativa de recuperar o colapso, caso não tenha ocorrido o rompimento da parede celular. Blumhm e Kauman (1965) recomendam que essa etapa seja realizada quando a madeira se encontrar no intervalo entre 15% e 20%, preferencialmente, ao teor de umidade de 17%.

A adoção de sobremedida de corte nas tábuas, no momento do desdobro, apresenta-se também como uma alternativa, admitindo a perda de um determinado percentual das mesmas em razão do colapso celular. Essa alternativa poderia ser utilizada, visto que, de modo geral, o nível de colapso verificado foi leve, apresentando uma deformação média de aproximadamente 1,5 mm.

Pode-se, ainda, adotar a recomendação de Blumhm e Kauman (1965), iniciando a secagem ao ar livre, até atingir teor de umidade em torno de 30%, e finalizando a mesma em estufa. Esse procedimento é mais economicamente viável que os anteriores, especialmente por a madeira permanecer por um tempo inferior dentro da estufa de secagem convencional, não ocasionando perdas de material.

De acordo com Kauman (1960), a contração excessiva e irregular, que é gerada com a formação de um colapso forte, ocorre em um número muito limitado de espécies, geralmente, de massa específica intermediária. Ponce (1995) corrobora com o autor acima, afirmando que madeiras de eucalipto apresentam maior tendência a colapso em espécies de média densidade e menor tendência naquelas de baixa e alta densidade.

Blumhm e Kauman (1965) citam que a manifestação do colapso é mais forte no plano que tange os anéis de crescimento comparado ao plano perpendicular aos anéis de crescimento, e de mesmo modo, no lenho inicial, comparado ao tardio. Desse modo, segundo os autores acima, o colapso se manifesta de modo mais intenso em tábuas orientadas radialmente, se comparadas àquelas orientadas tangencialmente. Essa tendência foi verificada no presente estudo através da identificação da orientação das tábuas utilizadas. Essa variável foi relacionada com a ocorrência de colapso, e os resultados são apresentados na Tabela 37.

Tabela 37. Colapso em *E. robusta*, em função da orientação das tábuas.

	Tangencial		Radial		Sem orientação	
	N (%)	C (%)	N (%)	C (%)	N (%)	C (%)
Lote 01	15,63	0,00	21,88	21,88	62,50	37,50
Lote 02	18,75	0,00	18,75	18,75	62,50	37,50
TOTAL	17,19	0,00	20,31	20,31	62,50	37,50

Em que: N = número de tábuas em relação ao total utilizando na secagem, em %; C = número de tábuas que apresentaram colapso em relação ao número total de tábuas com determinada orientação, em %.

Verificou-se que todas as peças orientadas radialmente (13) apresentaram colapso, enquanto as tábuas tangenciais (11) não apresentaram colapso. Quanto às peças que não apresentavam orientação definida (40), observou-se que, em 60% das peças, ocorreu a manifestação de tal defeito. Tais resultados estão de acordo com Blumhm e Kauman (1965).

Ainda com relação à orientação das peças e ao colapso verificado, 70% das peças que apresentaram colapso moderado possuíam orientação radial. Nas peças sem orientação definida, foi constatado que, em 79% daquelas que demonstraram colapso celular, este foi classificado como leve.

h) Avaliação do colapso após 45 dias

A avaliação do colapso após 45 dias do término da secagem foi realizada com o objetivo de verificar se a madeira de *E. robusta* apresentaria uma redução do nível médio desse defeito após esse período. Na Tabela 38, são apresentados os resultados obtidos da quantificação do colapso celular após 45 dias.

Tabela 38. Valores médios do colapso após a secagem e após 45 dias.

	d_c após a secagem (mm)	d_c após 45 dias (mm)	Δd_c (mm)
Lote 01	1,48	0,87	0,61
Lote 02	1,47	1,26	0,21
Média	1,475	1,07	0,41

Em que: d_c = deformação média ocasionada pelo colapso e Δd_c = diferença entre a deformação verificada após a secagem e após 45 dias.

Verificou-se uma redução de 0,41 mm na deformação média das peças que apresentaram colapso celular. Não foi possível proceder à análise de variância em razão da heterogeneidade dos dados, no entanto, observou-se uma pequena redução na deformação do colapso pela manutenção das tábuas em um ambiente com condições climáticas estáveis. Possivelmente, essa redução ocorreu em função da elevação do teor de umidade das peças até que as mesmas atingissem o teor de umidade de equilíbrio. Isso pode indicar que o colapso observado na madeira de *E. robusta* seria passível de ser revertido através de algum tratamento para recuperação de tal defeito.

4.3.3 Retratibilidade e Coeficiente de Anisotropia

A retratibilidade e o coeficiente de anisotropia, verificados durante a secagem, foram avaliados utilizando 12 tábuas tangenciais e/ou radiais de cada espécie, cujos resultados são apresentados na Tabela 39.

Tabela 39. Contrações radiais, tangenciais e coeficiente de anisotropia.

Espécie	Contração (%)		Coeficiente anisotrópico
	Tangencial	Radial	
<i>Corymbia citriodora</i>	8,82 a	5,54 a	1,60 ^{NS}
<i>Eucalyptus robusta</i>	12,83 b	7,92 b	1,60 ^{NS}
<i>Eucalyptus saligna</i>	9,65 a	5,74 a	1,68 ^{NS}

Médias seguidas na vertical por uma mesma letra minúscula ou na horizontal por uma mesma letra maiúscula, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. ^{NS} = não significativo a 5% de probabilidade.

O *C. citriodora* apresentou os menores valores dentre as três espécies para a contração radial (5,54%) e tangencial (8,82%), não diferindo estatisticamente dos valores médios verificados para o *E. saligna*, 5,74% e 9,65%, nos planos radial e tangencial, respectivamente. O *E. robusta* apresentou contração radial de 7,92% e tangencial de 12,83%, diferindo das outras duas espécies para ambas as variáveis. Youngs (1960) obteve contração radial e tangencial para *E. robusta*, em secagem ao ar, de 6,1% e 10,7%, respectivamente, valores inferiores aos verificados no presente estudo. O coeficiente de anisotropia não apresentou diferença significativa entre as três espécies, tendo sido o maior valor absoluto verificado para o *E. saligna*.

O comportamento apresentado pelas três espécies na avaliação da retratibilidade durante a secagem é similar ao verificado nos testes prévios. Conforme esperado, as contrações durante a secagem foram inferiores às verificadas no teste prévio, e a explicação para tal é o teor de umidade final, visto que, na avaliação preliminar, a madeira foi submetida à secagem até a total retirada da água e na secagem o teor de umidade final foi igual a 10%.

A tendência entre as espécies para o coeficiente anisotrópico, durante a secagem, foi a mesma verificada para tal variável nos testes prévios, apresentando valores inferiores na avaliação preliminar comparado à secagem. Um aspecto a ser destacado é o fato de que o coeficiente anisotrópico no teste prévio para o *C. citriodora*, *E. robusta* e *E. saligna* foi de 1,38; 1,36 e 1,47, respectivamente, enquanto, na secagem, verificou-se 1,60; 1,60 e 1,68, respectivamente. Apesar de os valores inferiores de retração radial e tangencial durante a secagem, o coeficiente de anisotropia foi superior comparado ao verificado nos testes prévios.

4.3.4 Teor de umidade final entre as peças

Os resultados obtidos da avaliação do teor de umidade final médio das peças, para cada lote das três espécies, são apresentados na Tabela 40, além dos valores máximo e mínimo, desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 40. Teor de umidade final (%) das tábuas submetidas à secagem.

Espécie	<i>Corymbia citriodora</i>		<i>Eucalyptus robusta</i>		<i>Eucalyptus saligna</i>	
	Lote 01	Lote 02	Lote 01	Lote 02	Lote 01	Lote 02
Médio	9,00	8,15	9,15	8,79	11,23	11,12
Máximo	10,35	9,62	12,05	14,57	14,15	14,23
Mínimo	8,31	7,63	6,65	7,71	8,14	9,44
Des. Pad.	0,41	0,42	1,55	1,26	1,52	1,23
C.V. (%)	4,60	5,20	16,88	14,35	13,50	11,03

O teor de umidade final médio verificado foi de 8,58%, 8,97% e 11,18% para o *C. citriodora*, *E. robusta* e *E. saligna*, respectivamente, próximos ao teor de umidade final desejado igual a 10%. A variação no teor de umidade final médio entre os lotes de cada uma das espécies foi inferior a 1% para as três espécies, o que evidencia a eficiência da utilização e da disposição das amostras de controle utilizadas.

O lote 02 de *C. citriodora* apresentou o menor teor de umidade final, com 8,15%, enquanto o lote 01 de *E. saligna* apresentou o maior valor médio, 11,23%. Os dois lotes de *E. robusta* e *C. citriodora* apresentaram teor de umidade final médio um pouco inferior ao desejado, ao passo que, para o *E. saligna*, foram obtidos valores médios ligeiramente superiores ao desejado.

Os menores coeficientes de variação foram apresentados para os dois lotes de *C. citriodora*, seguidos pelos de *E. saligna* e, por sua vez, o *E. robusta* apresentou os maiores valores. Esses resultados quanto à homogeneidade dos dados de teor de umidade final, expressos pelo coeficiente de variação, especialmente para o *C. citriodora*, não eram esperados. Isso porque madeiras que apresentam maior dificuldade para secagem tendem a ser menos uniformes quanto à distribuição do teor de umidade final entre as peças. Essa uniformidade na distribuição do teor de umidade entre as peças evidencia que a etapa de

uniformização aplicada após o final da secagem possivelmente tenha contribuído para reduzir a variação no teor de umidade entre as peças.

A dispersão do teor de umidade final das tábuas dos lotes 01 e 02 de *C. citriodora* (Figura 33), *E. robusta* (Figura 34) e *E. saligna* (Figura 35) é apresentada abaixo.

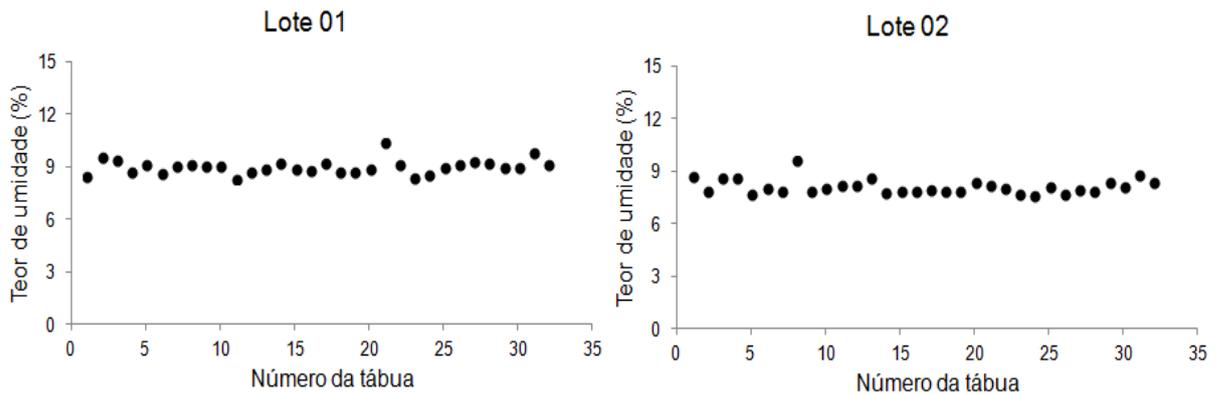


Figura 33: Dispersão do teor de umidade das tábuas dos lotes 01 e 02 de *Corymbia citriodora*.

Fonte: o autor (2012).

O *C. citriodora* apresentou a maior homogeneidade do teor de umidade final, com valor médio para a espécie de 8,58% e coeficiente de variação igual a 4,9%. Os valores máximo e mínimo verificados para a espécie foram de 10,35% e 7,63%, respectivamente.

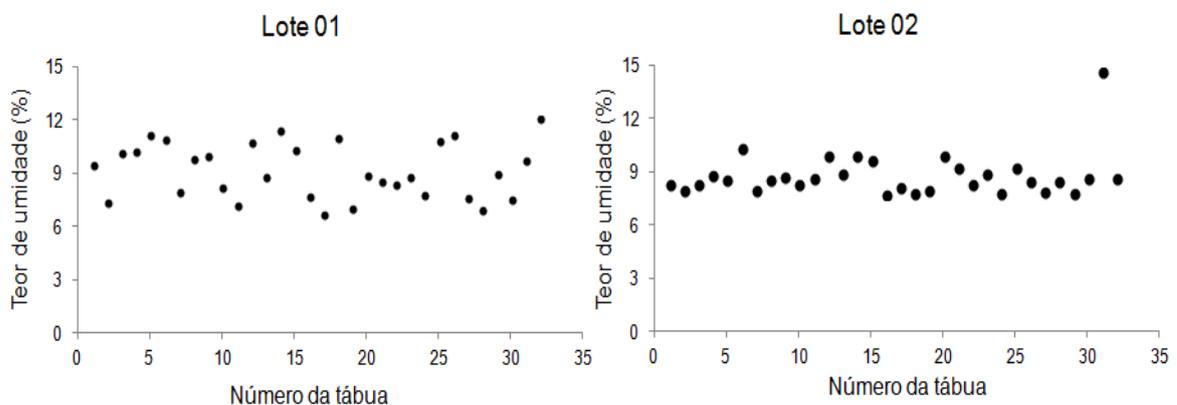


Figura 34: Dispersão do teor de umidade das tábuas dos lotes 01 e 02 de *Eucalyptus robusta*.

Fonte: o autor (2012).

Para a madeira de *E. robusta*, o valor médio do teor de umidade final foi de 8,19%, apresentando um coeficiente de variação médio igual a 15,62%. Os valores máximo e mínimo verificados para a espécie foram 14,57% e 6,65%, respectivamente. Observa-se que o lote 01 apresentou maior heterogeneidade dos dados, enquanto o lote 02 apresentou dados menos dispersos.

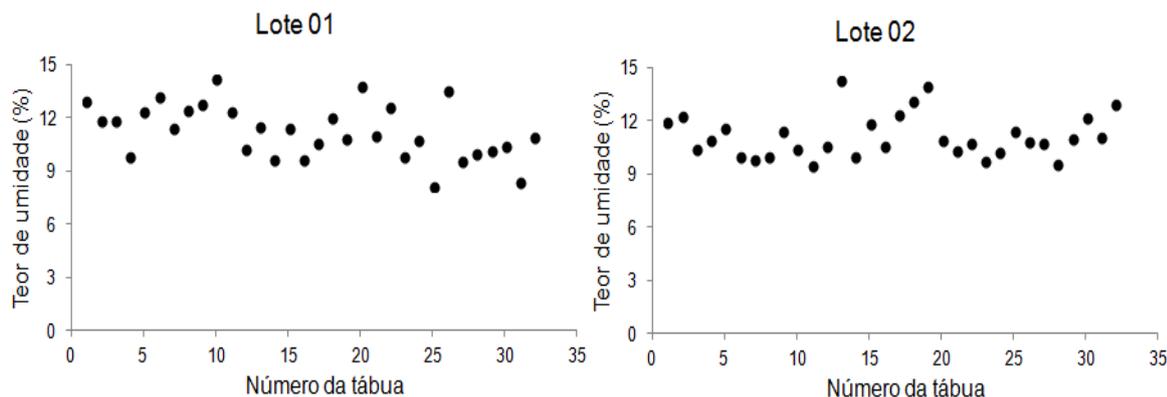


Figura 35: Dispersão do teor de umidade das tábuas dos lotes 01 e 02 de *Eucalyptus saligna*.

Fonte: o autor (2012).

Para a madeira de *E. saligna*, observou-se valor médio de 11,18% para o teor de umidade final, com coeficiente de variação médio igual a 12,26%. Os valores máximo e mínimo verificados para a espécie foram de 14,23% e 8,14%, respectivamente, apresentando a maior heterogeneidade dos dados, apesar do coeficiente de variação ter sido inferior ao verificado para o *E. robusta*.

Batista (2009) obteve teores de umidade médios de 10,08%, 9,96% e 11,45%, para as madeiras de *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*, respectivamente. Apesar de o autor ter encontrado valores médios mais próximos ao teor de umidade desejado, em comparação aos verificados no presente estudo, o coeficiente de variação para aquelas três espécies foi de 9,59%, 10,84% e 17,07%. Faz-se necessário destacar, também, que as características distintas entre os materiais amostrados influenciam na dispersão do teor de umidade final. A massa específica das espécies utilizadas apresentam valores médios superiores aos verificados pelo autor citado acima, implicando, assim, maior dificuldade em reduzir a diferença no teor de umidade final entre as peças e dentro das peças.

4.3.5 Gradientes de umidade durante a secagem

Foram realizadas cinco avaliações para os gradientes de umidade durante a secagem, quando o teor de umidade médio da madeira atingiu 40%, 30%, 20%, 10%, e após a uniformização (final). Os mesmos foram analisados e apresentados de forma individual por espécie, considerando os dois lotes de cada uma delas.

a) *Corymbia citriodora*

Os gradientes de umidade verificados durante a secagem de *C. citriodora* para os lotes 01 e 02, são apresentados nas Figuras 36 e 37, respectivamente. No eixo horizontal, a posição refere-se ao local de retirada da amostra, sendo a posição 1 a superfície superior, a posição 3 corresponde à amostra retirada da porção central da peça e a posição 5 à superfície inferior da mesma.

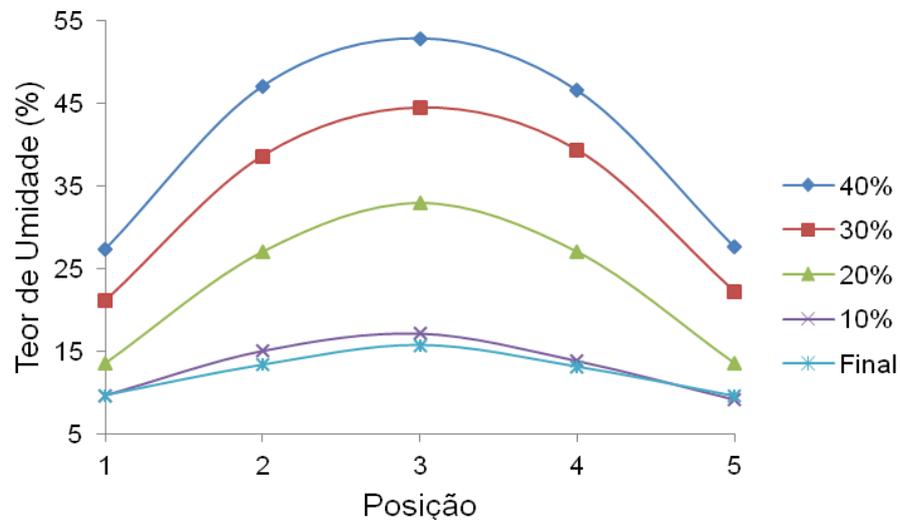


Figura 36: Gradientes de umidade durante a secagem do lote 01 de *C. citriodora*.

Fonte: o autor (2012).

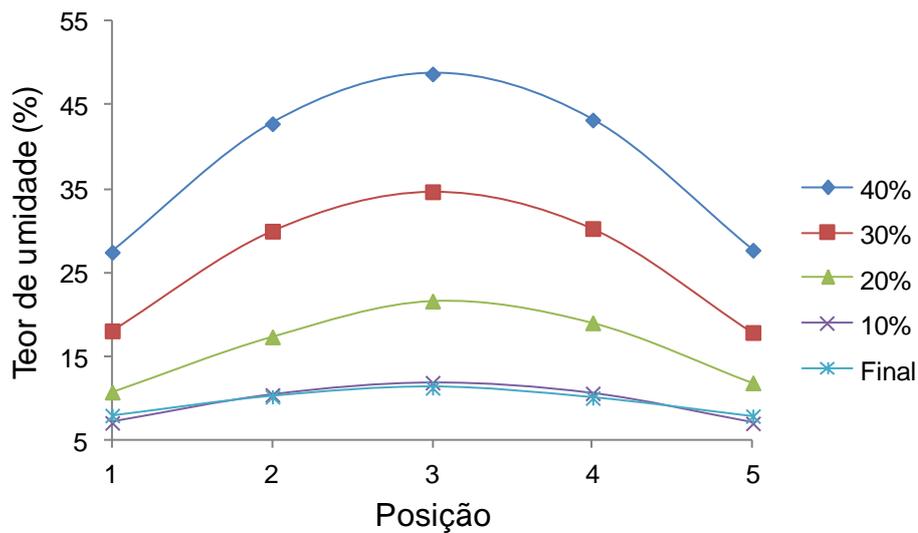


Figura 37: Gradientes de umidade durante a secagem do lote 02 de *C. citriodora*.

Fonte: o autor (2012).

Através da avaliação visual do gráfico, observa-se que o gradiente de umidade, no lote 01, apresentou-se de forma mais intensa na avaliação ao teor de umidade de 40%, se comparado ao do lote 02. Essa tendência manteve-se para as duas avaliações seguintes (a 30% e 20% de teor de umidade). No início da secagem, os gradientes de umidade verificados são elevados, apresentando redução considerável em função da redução do teor de umidade.

Para as outras duas avaliações, a 10% e após a uniformização, os lotes apresentaram comportamentos semelhantes. Nessas duas últimas avaliações, observa-se que o lote 01 apresentou redução no teor de umidade das amostras nas posições internas e, conseqüentemente, uma redução no gradiente de umidade entre as avaliações ao final da secagem e após a uniformização. Para o lote 02, o teor de umidade das amostras nas posições 1 e 5 (superfície da peça) apresentou leve aumento, enquanto as posições centrais apresentaram redução no teor de umidade, propiciando uma redução no gradiente de umidade após a uniformização.

Na Tabela 41, é apresentado o gradiente de umidade para as cinco avaliações realizadas para ambos os lotes de *C. citriodora*, além dos valores médios verificados para a espécie.

Tabela 41. Gradientes de umidade durante a secagem para o *C. citriodora*.

	40%	30%	20%	10%	Final
Lote 01	25,42	22,85	19,46	7,76	6,14
Lote 02	21,97	16,69	10,30	4,82	3,34
Média	23,70	19,77	14,88	6,29	4,74

O lote 01 apresentou maiores valores médio em todas as avaliações, comparadas às do lote 02. Verificou-se uma redução gradual do gradiente de umidade com o decorrer da secagem, em que a maior redução média foi observada entre as avaliações a 20% e 10% de teor de umidade.

A uniformização apresentou uma redução significativa do gradiente de umidade, todavia, o tempo da etapa de uniformização não foi suficiente para que fosse verificada uma redução desejável para essa espécie. Faz-se necessário mencionar que a uniformização reduziu o gradiente de umidade em 1,5%, de 6,29% para 4,74%.

De acordo com a classificação sugerida por Welling (1994), o gradiente de umidade verificado para o *Corymbia citriodora* não atingiu a classe S de qualidade de secagem (classe “Standart”), mesmo após as 30 horas de uniformização. Essa classe admite um gradiente de umidade máximo de 4,0%, entre a superfície e o centro da amostra, para o teor de umidade final desejado igual a 10%.

b) *Eucalyptus robusta*

Os gradientes de umidade durante a secagem de *E. robusta*, para os lotes 01 e 02, são apresentados nas Figuras 38 e 39, respectivamente. No eixo horizontal, a posição refere-se ao local de retirada da amostra, sendo a posição 1 a superfície superior, a posição 3 correspondente à porção central da peça e a posição 5, à superfície inferior.

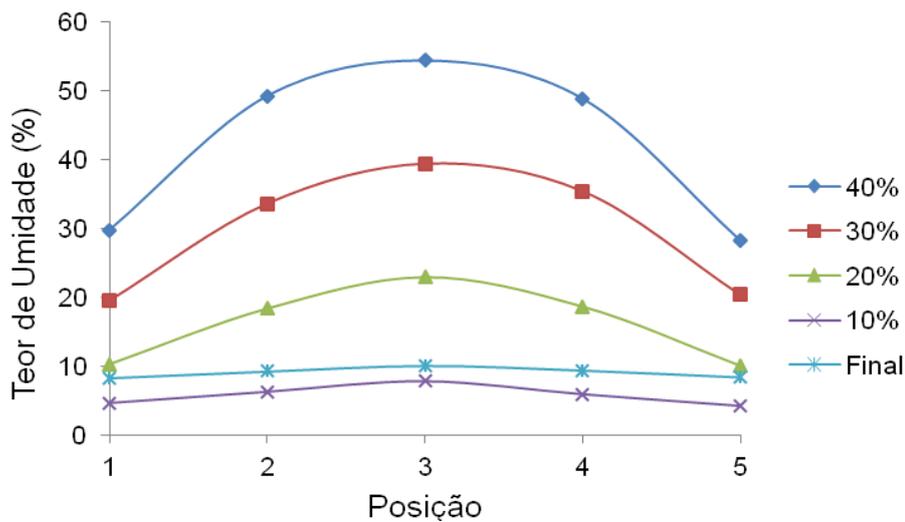


Figura 38: Gradientes de umidade durante a secagem do lote 01 de *E. robusta*.

Fonte: o autor (2012).

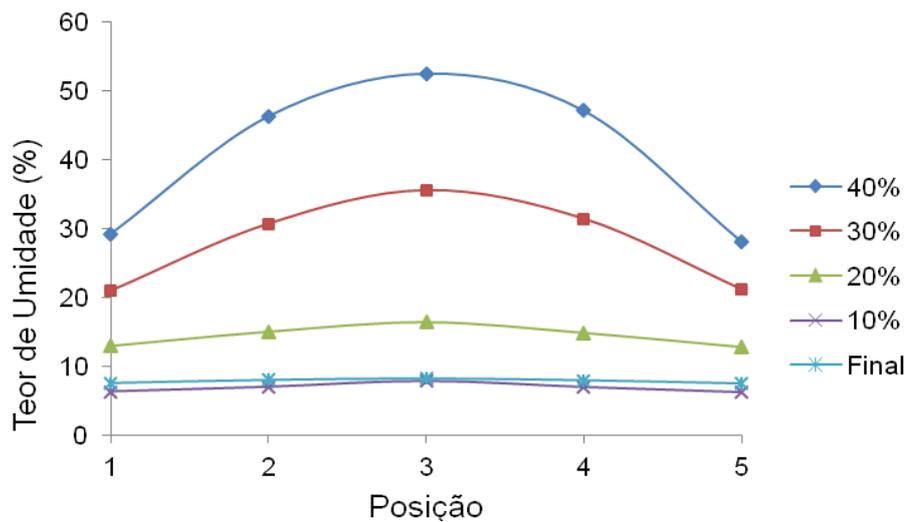


Figura 39: Gradientes de umidade durante a secagem do lote 02 de *E. robusta*.

Fonte: o autor (2012).

O gradiente de umidade no lote 01 apresentou-se de forma mais intensa na avaliação ao teor de umidade de 40%, comparado ao lote 02, variando de, aproximadamente, 25% a 55%, no primeiro, e 25% a 50%, no segundo. Essa tendência manteve-se para a avaliação a 30% de teor de umidade. Na avaliação a 30% de teor de umidade, observa-se uma suavização na curva do gradiente médio do lote 02. Para o lote 01, essa tendência foi verificada na avaliação a 20% de teor

de umidade, enquanto, para o lote 02, nessa mesma avaliação, o gradiente de umidade apresentava um valor relativamente baixo.

Verificou-se uma redução do gradiente de umidade durante a secagem mais acentuada para ambos os lotes de *E. robusta*, comparada à redução observada para o *C. citriodora*. A distinção entre as espécies pode estar associada à permeabilidade das duas espécies, sugerindo que a madeira de *C. citriodora* pode apresentar menor permeabilidade em relação à de *E. robusta*. Essa hipótese pode ser válida, visto que a diferença entre o teor de umidade da superfície e do centro da amostra reduziu de modo mais acentuado para a segunda espécie, e o gradiente de umidade na primeira apresentou maiores valores médios comparativamente aos da segunda.

Observa-se, em ambos os lotes, que, ao final da secagem, o teor de umidade das peças estava abaixo da umidade final desejada, bem como que a uniformização propiciou um acréscimo no teor de umidade médio, reduzindo o gradiente de umidade. Tal comportamento é nítido para o lote 01, onde a redução no gradiente de umidade é visível pela suavização da curva nas avaliações antes e após a etapa de uniformização, a 10% de teor de umidade e final, respectivamente.

O gradiente de umidade para as cinco avaliações realizadas, para ambos os lotes de *E. robusta*, além dos valores médios verificados para a espécie, é apresentado na Tabela 42.

Tabela 42. Gradientes de umidade durante a secagem para o *E. robusta*.

	40%	30%	20%	10%	Final
Lote 01	27,02	18,90	15,31	3,31	1,77
Lote 02	24,40	14,51	6,94	1,70	0,74
Média	25,71%	16,71	11,12	2,51	1,26

O lote 02 de *E. robusta* apresentou menores valores médios de gradiente de umidade ao longo da espessura das peças, comparado ao lote 01, para todas as avaliações. Assim como para o *C. citriodora*, verificou-se também que a redução no gradiente de umidade ocorreu de modo mais incisivo entre as avaliações, ao teor de umidade de 20% e 10%. Entre essas duas avaliações, o gradiente de umidade reduziu de 15,31% a 3,31%, para o lote 01, e de 6,94% a 1,70, para o lote 2.

A uniformização reduziu à metade o gradiente de umidade médio para a espécie em questão, de 2,51% para 1,26%. De acordo com a classificação sugerida

por Welling (1994), o gradiente de umidade verificado para o *Eucalyptus robusta* atingiu a classe intermediária (classe Q – “Quality dried”), após a secagem, e alcançou a mais alta classe de qualidade de secagem (classe E – “Exclusive”), após a uniformização (30 horas). Essas classes admitem variação máxima no gradiente de umidade de 2,0% e 1,0%, para o teor de umidade final desejado igual a 10%, respectivamente.

c) *Eucalyptus saligna*

Os gradientes de umidade durante a secagem de *Eucalyptus saligna*, para os lotes 01 e 02, são apresentados nas Figuras 40 e 41, respectivamente. A posição refere-se ao local de retirada da amostra, sendo as posições 1, 3 e 5 a superfície superior, a porção central e a superfície inferior, respectivamente.

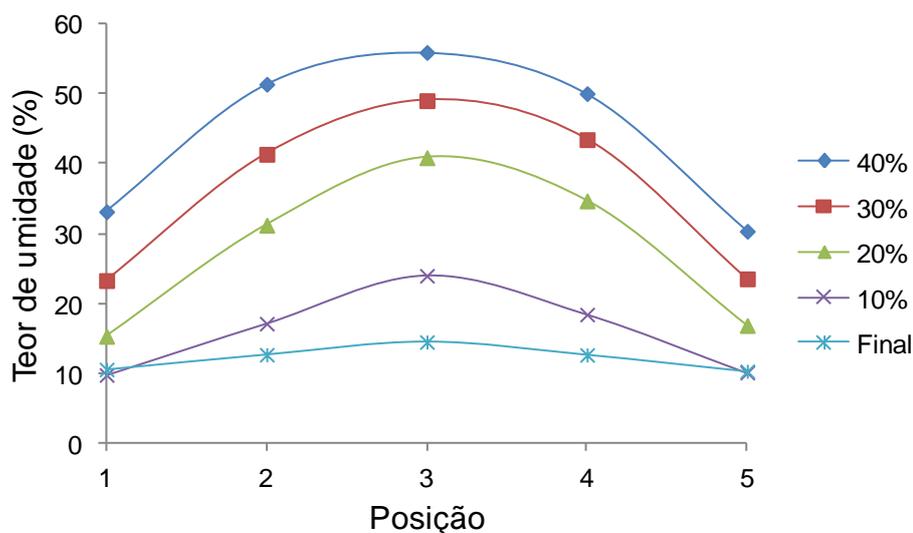


Figura 40: Gradientes de umidade durante a secagem do lote 01 de *E. saligna*.

Fonte: o autor (2012).

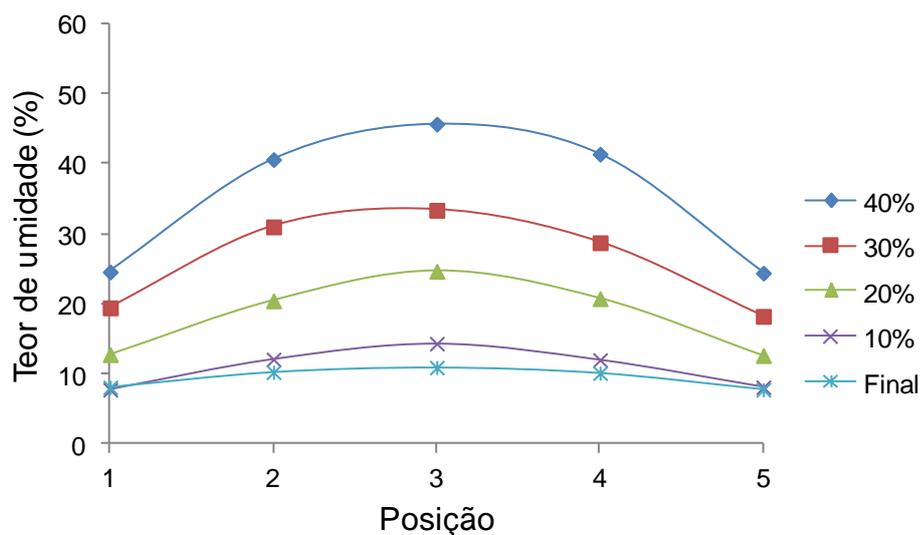


Figura 41: Gradientes de umidade durante a secagem do lote 02 de *E. saligna*.

Fonte: o autor (2012).

Analisando os dois lotes de *E. saligna*, observa-se comportamentos distintos entre os mesmos, especialmente, quanto ao teor de umidade. No lote 01, o teor de umidade apresentou-se mais elevado para todas as avaliações, se comparado ao lote 02, mesmo que o gradiente de umidade na avaliação ao teor de umidade de 40% tenha sido semelhante. Para as avaliações seguintes, o gradiente de umidade médio, no lote 01, apresentou leve queda, onde a mesma se mostrou mais intensa na avaliação ao final da secagem (10% de teor de umidade). Enquanto isso, o lote 02 apresentou um comportamento dentro do esperado, com redução gradual do gradiente de umidade em função da diminuição do teor de umidade médio.

Dentre os seis lotes avaliados para as três espécies, o lote 01 de *E. saligna* foi aquele que apresentou o maior gradiente de umidade, ao final da etapa de secagem. Para esse lote, o efeito da etapa de uniformização foi mais visível, proporcionando uma considerável redução no gradiente de umidade. A homogeneização do teor de umidade, ao longo da espessura das peças, foi verificada para ambos os lotes de *E. saligna*, onde o teor de umidade nas superfícies manteve-se praticamente constante. Em contrapartida, o teor de umidade das amostras centrais apresentou redução e, por consequência, diminuiu o gradiente de umidade ao final da uniformização.

O gradiente de umidade para as cinco avaliações realizadas, para ambos os lotes de *E. saligna*, além dos valores médios verificados para a espécie, é apresentado na Tabela 43.

Tabela 43. Gradientes de umidade durante a secagem para o *E. saligna*.

	40%	30%	20%	10%	Final
Lote 01	24,19	25,62	24,79	14,02	4,06
Lote 02	21,18	14,53	11,95	6,39	4,25
Média	22,68	20,08	18,37	10,20	4,16

O lote 02 de *E. saligna* apresentou menores valores médios de gradiente de umidade, ao longo da espessura das peças, se comparado ao lote 01, para todas as avaliações, com exceção da avaliação após a uniformização. Do mesmo modo que o verificado para as duas espécies anteriores, a maior redução no gradiente de umidade ocorreu entre as avaliações ao teor de umidade de 20% e 10%. Entre essas duas avaliações, o gradiente de umidade médio reduziu de 24,79% a 14,02%, para o lote 01, e de 11,95% a 6,39%, para o lote 2. A tendência verificada para a maioria dos lotes foi de redução em maior ou menor nível entre as avaliações, sendo que, para o lote 01 do *E. saligna*, o gradiente de umidade manteve-se constante nas três primeiras avaliações.

A etapa de uniformização reduziu o gradiente de umidade médio, para a espécie em questão, de 10,20% para 4,16%. Essa foi a redução mais acentuada dentre as três espécies estudadas, evidenciando a importância dessa etapa para a obtenção de produtos de maior qualidade ao final da secagem, especialmente, se a matéria-prima em questão for seccionada em peças de menores dimensões. De acordo com a classificação sugerida por Welling (1994), o gradiente de umidade verificado para o *Eucalyptus saligna* não atingiu a classe mais baixa de qualidade de secagem (classe S), mesmo após as 30 horas em que o material foi submetido à uniformização. Possivelmente, a adoção de um período mais longo de uniformização proporcionaria uma redução no gradiente de umidade, de modo que a madeira obtivesse uma classificação desejada. O tempo de uniformização aplicado reduziu o gradiente de umidade da madeira, no entanto, foi insuficiente para obter um percentual máximo desejado (abaixo de 4%), alcançando valores médios próximos.

4.4 Avaliações da etapa de uniformização

A análise e a discussão dos dados das avaliações realizadas na etapa de uniformização da madeira foram separados por espécie, elaborando-se gráficos para cada lote de madeira. De todo modo, buscando evidenciar o comportamento das espécies durante a uniformização para as duas variáveis qualitativas avaliadas, elaborou-se gráficos com os valores médios.

O gradiente de umidade médio entre o centro e a superfície da peça, para as três espécies em função do tempo de uniformização da madeira, é apresentado na figura 42.

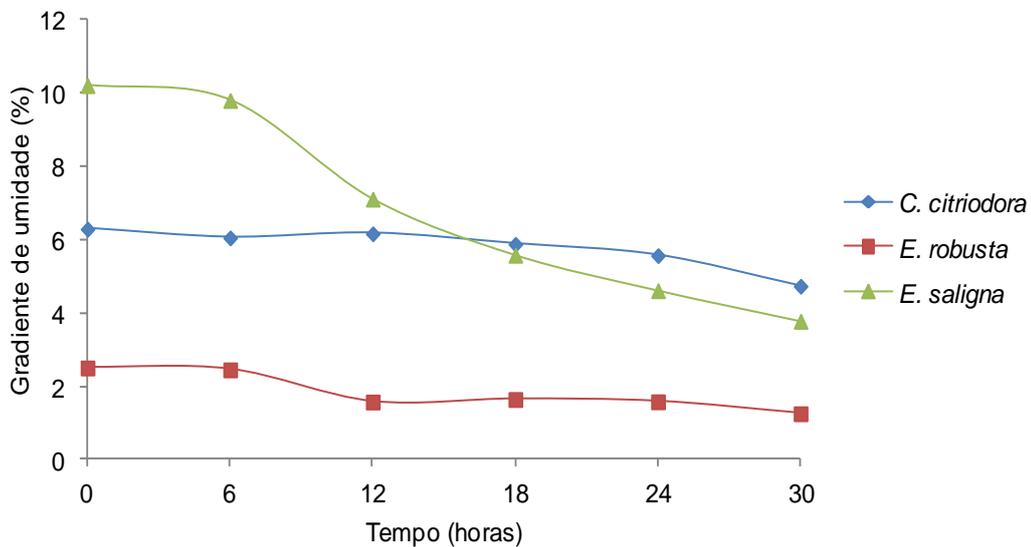


Figura 42: Gradientes de umidade durante a uniformização da madeira.

Fonte: o autor (2012).

O gradiente de umidade verificado para as três ao final da uniformização mostrou-se satisfatório para o *E. robusta* e *E. saligna*, visto que o *C. citriodora* não atingiu valor médio para o gradiente de umidade inferior a 4%. Possivelmente, pela análise da tendência das curvas, essa última espécie atingiria esse nível se o tempo de uniformização fosse superior ao aplicado.

A redução mais acentuada no gradiente de umidade foi verificada para o *E. saligna*, que apresentou valor médio de aproximadamente 10% no início da uniformização, reduzindo pela metade esse valor ao final dessa etapa.

O comportamento do teor de umidade médio nas camadas intermediárias entre a superfície e o centro da peça ($MC_{1/3}$) para as três espécies em função do tempo de uniformização, é apresentado na figura 43.

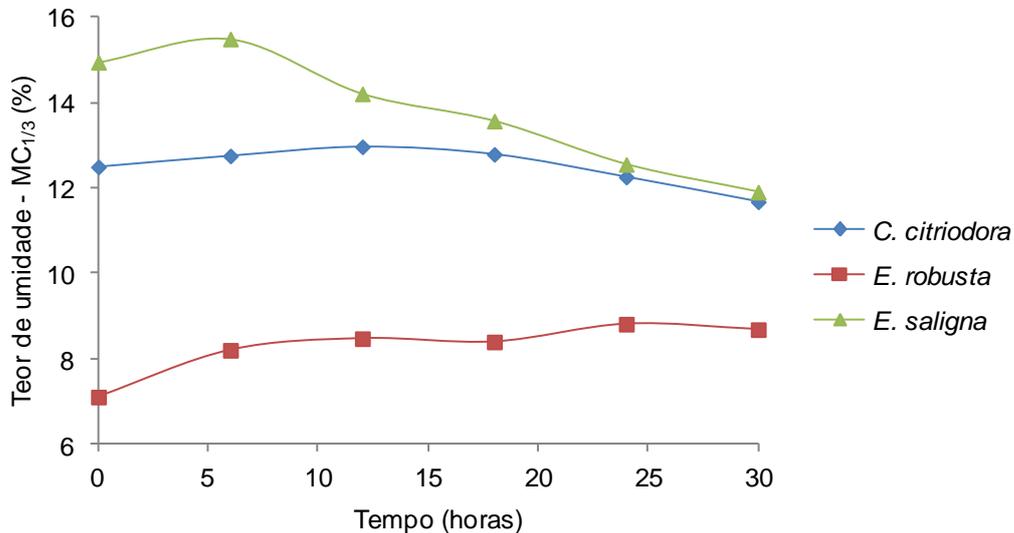


Figura 43: Gradientes de umidade durante a uniformização da madeira.

Fonte: o autor (2012).

A madeira de *C. citriodora* apresentou a menor redução no teor de umidade das camadas intermediárias ($MC_{1/3}$) durante a uniformização, reduzindo pouco menos de 1%, de 12,5% para 11,7%. A menor redução verificada para aquela espécie pode ter sido ocasionada pela elevada massa específica, o que dificulta o deslocamento da água ao longo da espessura da peça, necessitando assim de um período maior de uniformização. Por outro lado, o *E. saligna* apresentou a maior redução no valor médio, reduzindo de aproximadamente 15% para 12%. Diferentemente das duas espécies citadas acima, o *E. robusta* apresentou valores inferiores ao desejado, situação que igualmente não é interessante nesse caso. Porém, a uniformização elevou o $MC_{1/3}$ para a madeira de *E. robusta*, de aproximadamente 7% para quase 9%. Para as três espécies estudadas, a uniformização reduziu a diferença entre o $MC_{1/3}$ e o teor de umidade desejado.

4.4.1 Gradiente de umidade durante a uniformização

Nas figuras 44 e 45, é apresentado o gradiente de umidade médio nas avaliações da etapa de uniformização da madeira para os lotes 01 e 02 de *C. citriodora*, respectivamente.

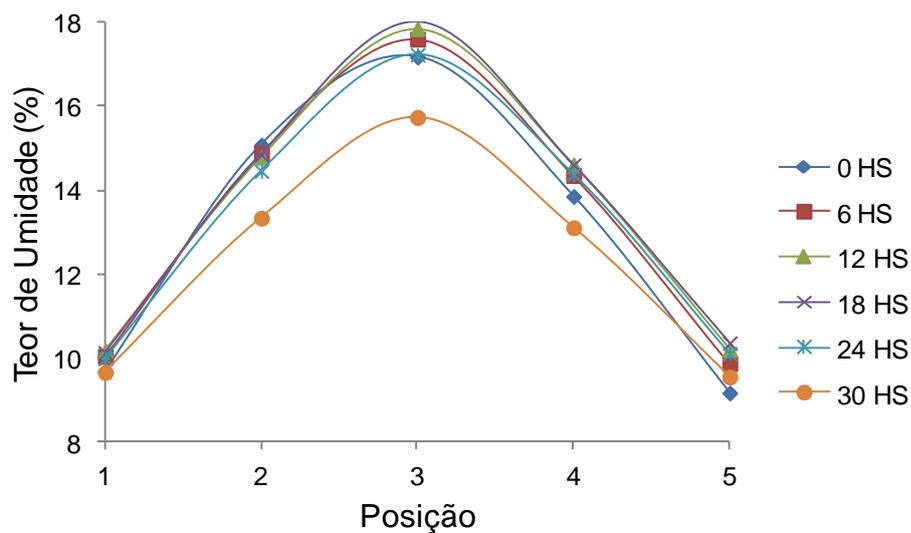


Figura 44: Gradientes de umidade durante a uniformização do lote 01 de *C. citriodora*.

Fonte: o autor (2012).

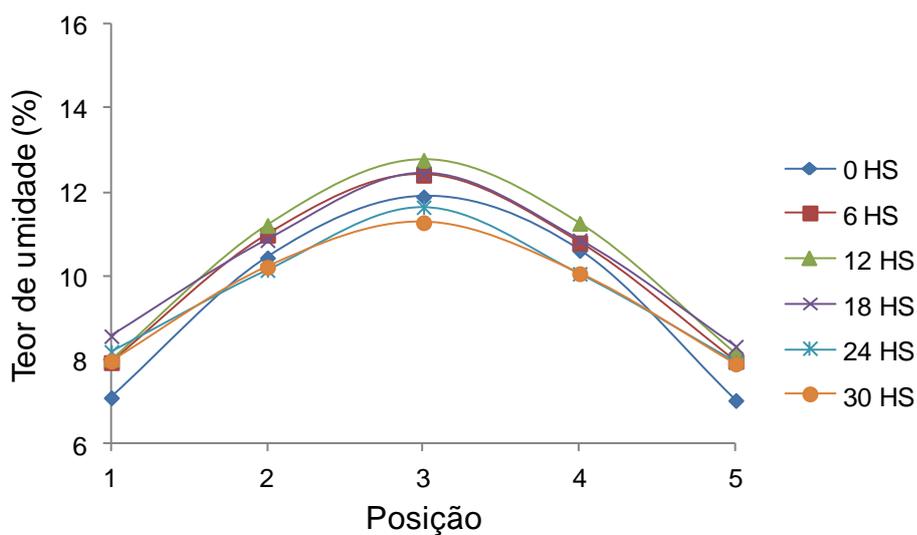


Figura 45: Gradientes de umidade durante a uniformização do lote 02 de *C. citriodora*.

Fonte: o autor (2012).

A redução no gradiente de umidade durante a etapa de uniformização para o *C. citriodora* foi a menor verificada dentre as três espécies estudadas. Para o lote 01, observou-se uma redução no teor de umidade na porção central da peça e uma manutenção no teor de umidade na superfície em torno de 10%. Por sua vez, o lote 02 apresentou teor de umidade na superfície inferior a 10%, com um pequeno aumento durante a uniformização, e com uma redução no teor de umidade na camada central da peça.

A efetiva redução no gradiente de umidade foi observada na avaliação após 24 horas de uniformização, indicando que a espécie apresenta dificuldade quanto a redução dos gradientes de umidade. Desse modo é possível afirmar que a madeira de *Corymbia citriodora* necessita de um período maior para essa etapa, comparado com as demais espécies estudadas.

O gradiente de umidade médio, nas avaliações da etapa de uniformização da madeira para os dois lotes de *E. robusta*, são apresentados nas figuras 46 e 47, respectivamente.

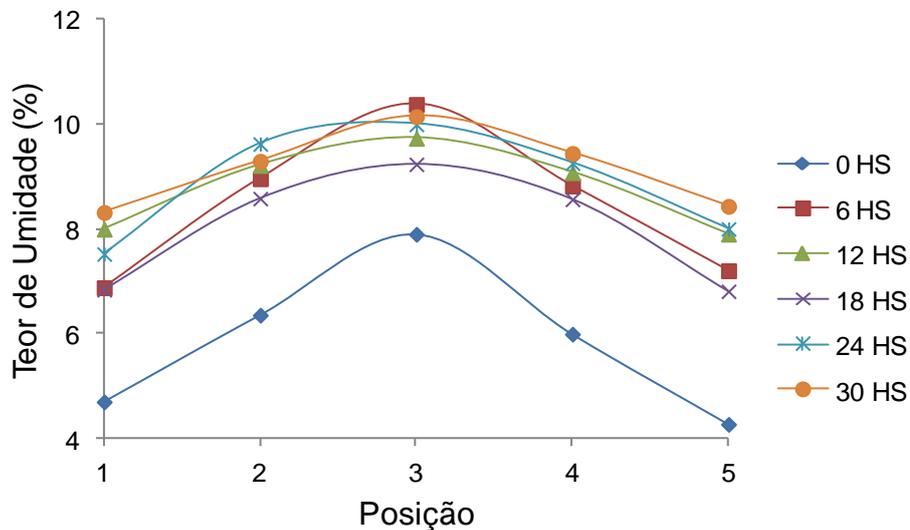


Figura 46: Gradientes de umidade durante a uniformização do lote 01 de *E. robusta*.

Fonte: o autor (2012).

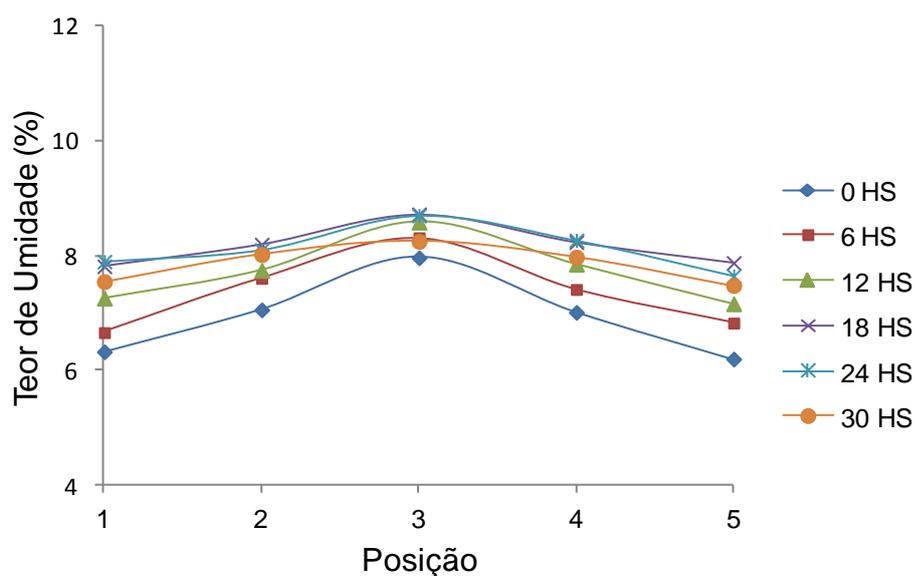


Figura 47: Gradientes de umidade durante a uniformização do lote 02 de *E. robusta*.
Fonte: o autor (2012).

Diferentemente das outras duas espécies, o *E. robusta* apresentou um teor de umidade médio abaixo do desejado na avaliação antes da uniformização. Desse modo, para as madeiras de *E. saligna* e *C. citriodora*, o objetivo era reduzir o teor de umidade das camadas centrais, enquanto que, para o *E. robusta*, a intenção era elevar o teor de umidade na superfície. Assim, o gradiente de umidade é reduzido, obtendo um teor de umidade mais próximo do desejado.

Para ambos os lotes verificou-se um gradiente de umidade de menor intensidade comparado às outras espécies. O gradiente de umidade apresentou redução durante a uniformização; no entanto, o tempo utilizado mostrou-se além do necessário para a redução do gradiente de umidade a níveis plenamente satisfatórios. Para o lote 01, na avaliação após 12 horas de uniformização, as amostras apresentavam baixo gradiente de umidade (1,78%), enquanto que para o lote 02 após o final da secagem, o gradiente verificado era de 1,70%. Desse modo, para o lote 02 de *E. robusta* não haveria a necessidade de realizar a etapa de uniformização, fazendo-se necessária a uniformização para reduzir a diferença no teor de umidade entre as peças.

O gradiente de umidade durante a etapa de uniformização da madeira para os dois lotes de *E. saligna* são apresentados nas figuras 48 e 49, respectivamente.

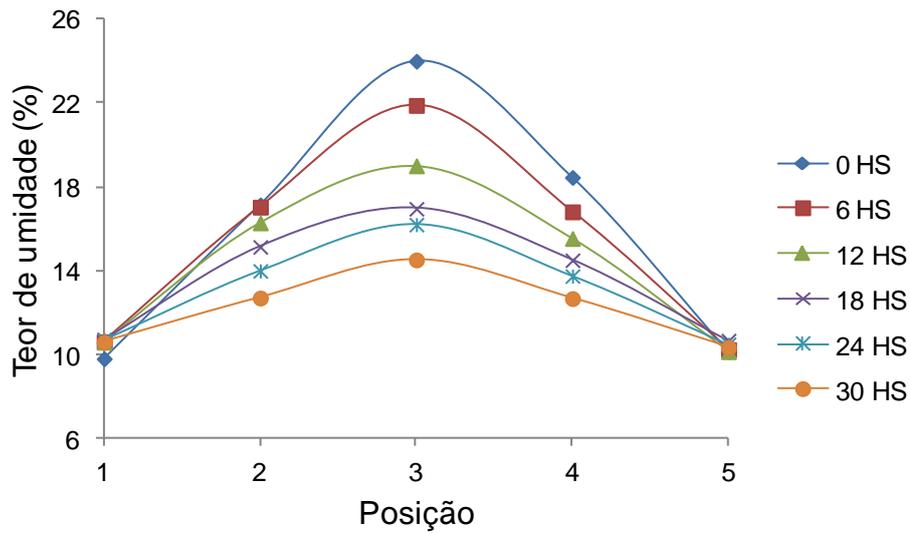


Figura 48: Gradientes de umidade durante a uniformização do lote 01 de *E. saligna*.

Fonte: o autor (2012).

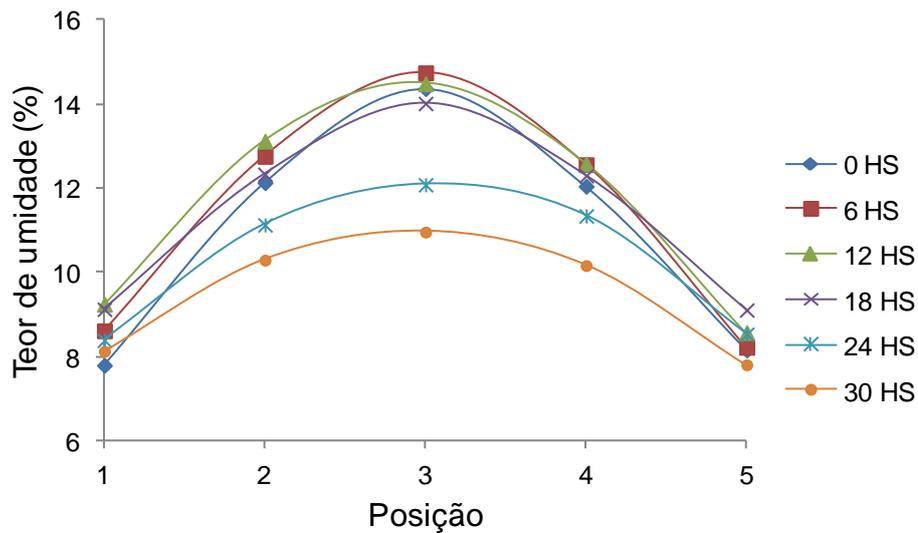


Figura 49: Gradientes de umidade durante a uniformização do lote 02 de *E. saligna*.

Fonte: o autor (2012).

Dentre os seis lotes utilizados das três espécies, os dois lotes de *E. saligna* foram aqueles que apresentaram maior valor médio de gradiente de umidade antes da etapa de uniformização, 14% e 6,4% para os lotes 01 e 02, respectivamente. As figuras acima mostram a suavização na curva de distribuição do gradiente de umidade ao longo da espessura das peças nas avaliações temporais realizadas durante a uniformização. Para ambos os lotes, o teor de umidade das camadas superficiais manteve-se praticamente constante durante a uniformização,

verificando-se uma redução gradativa do teor de umidade na porção central da peça. Ao final da uniformização, o lote 01 apresentou gradiente de umidade médio de 4,06%, enquanto o lote 02 atingiu valor médio de 3,5%.

Desse modo, classificou-se a qualidade da madeira quanto ao gradiente de umidade após a uniformização como insuficiente para o lote 01. Apesar disso, o valor verificado esteve muito próximo do considerado adequado para que a madeira fosse classificada como classe S. Já o lote 02 alcançou a classe S após a uniformização.

Analisando de modo geral os gráficos acima, pode-se concluir que a uniformização além de proporcionar uma redução no gradiente de umidade para as três espécies, elevou o teor de umidade médio das peças de *E. robusta* e reduziu o teor de umidade para o *C. citriodora* e *E. saligna*. Desse modo, a etapa de uniformização colaborou para a redução da variação do teor de umidade entre as peças.

Na tabela 44 são apresentados os gradientes de umidade médio antes e após a uniformização para cada lote, além da média por espécie e a classificação obtida para os lotes e as espécies.

Tabela 44. Classificação da qualidade da uniformização quanto ao gradiente de umidade.

Espécie – Lote	Antes da uniformização		Após a uniformização	
	G.U. (%)	Classe	G.U. (%)	Classe
<i>C. citriodora</i> - Lote 01	7,76	-	6,14	-
<i>C. citriodora</i> - Lote 02	4,82	-	3,34	S
Média	6,29	-	4,74	-
<i>E. robusta</i> - Lote 01	3,31	S	1,77	E
<i>E. robusta</i> - Lote 02	1,70	E	0,74	E
Média	2,50	Q	1,26	E
<i>E. saligna</i> - Lote 01	14,02	-	4,06	-
<i>E. saligna</i> - Lote 02	6,39	-	3,50	S
Média	10,21	-	3,78	S

Analisando a tabela acima, a madeira de *Corymbia citriodora* não conseguiu obter classificação mesmo após a uniformização, apesar da redução no gradiente. A

uniformização proporcionou a madeira de *Eucalyptus saligna* uma redução significativa no gradiente de umidade, que apesar do elevado valor verificado após a secagem, alcançou a classe "Standard". Já o *Eucalyptus robusta*, que apresentou os menores valores médios de gradiente de umidade após a secagem, sendo classificado como "Quality", obteve uma redução pela metade após a uniformização, se classificando como "Exclusive", a mais elevada classe de qualidade.

4.4.2 Teor de umidade médio na camada intermediária

Na tabela 45 são apresentados valores médios do teor de umidade nas camadas intermediárias nas avaliações antes e após a uniformização para cada lote, além da média por espécie e a classificação obtida para os lotes e as espécies.

Tabela 45. Classificação da qualidade da uniformização quanto ao teor de umidade nas camadas intermediárias.

Espécie – Lote	Antes da uniformização		Após a uniformização	
	MC _{1/3} (%)	Classe	MC _{1/3} (%)	Classe
<i>C. citriodora</i> - Lote 01	14,47	-	13,22	-
<i>C. citriodora</i> - Lote 02	10,52	E	10,13	E
Média	12,49	S	11,68	Q
<i>E. robusta</i> - Lote 01	7,18	S	9,37	E
<i>E. robusta</i> - Lote 02	7,04	S	8,00	Q
Média	7,11	S	8,68	Q
<i>E. saligna</i> - Lote 01	17,80	-	12,69	S
<i>E. saligna</i> - Lote 02	12,09	S	11,12	Q
Média	14,94	-	11,90	Q

O *C. citriodora* apresentou pequena redução no teor de umidade das camadas intermediárias durante a uniformização, assim como o verificado para o gradiente de umidade. A maior redução ocorreu para o lote 01 que apresentou maiores valores médios; no entanto, não conseguiu atingir a classe de qualidade mais baixa. Por sua vez, o lote 02 manteve a classificação obtida antes da

uniformização e apresentou pequena redução no teor de umidade, verificando-se valor médio próximo a 10%.

Ambos os lotes de *E. robusta* apresentaram valores abaixo do desejado, próximos a 7%, obtendo assim antes da uniformização a classificação S. O lote 01 apresentou um aumento mais significativo comparado ao lote 02, com valores médios de 9,37% e 8,00%, de modo respectivo. Desse modo, o lote 01 e 02 alcançaram as classes E e Q, respectivamente.

Assim como para o gradiente de umidade, o lote 01 de *E. saligna* apresentou o maior teor de umidade médio (17,80%) na camada intermediária entre a superfície e o centro da peça. Após as 30 horas de uniformização, o teor de umidade médio verificado foi igual a 12,69%, o que permitiu enquadrar o lote como classe S. Já o lote 02 da mesma espécie apresentou valor médio igual a 12,09% ao final da secagem, reduzindo para 11,12% após a uniformização. Com isto, o lote 02 foi classificado como classe Q, mesma classificação obtida pela espécie, considerando-se os valores médios de cada lote.

Utilizando os valores médios de ambos os lotes para as três espécies, na avaliação após a uniformização, as três espécies estudadas obtiveram a classificação “Quality”, ou intermediária.

5 CONCLUSÕES

1. A metodologia utilizada para elaborar os programas de secagem e as demais avaliações preliminares foi suficiente para fornecer informações referentes ao comportamento das espécies na secagem convencional;

2. Para as três espécies verificou-se comportamento proporcional quanto à taxa de secagem e defeitos apresentados na secagem drástica e na secagem convencional, especialmente em relação à taxa de secagem e ao colapso celular;

3. De modo geral, as três espécies apresentaram baixa perda em virtude de rachaduras de topo ocasionadas em função da secagem, além do teor de umidade final médio verificado estar próximo ao desejado;

4. Verificou-se acréscimo na flecha média de arqueamento e redução na de encurvamento após a secagem para as três espécies, enquanto que no encanoamento, verificou-se pequena incidência decorrente da secagem;

5. A metodologia empregada para determinar os gradientes de umidade mostrou-se eficiente e adequada, fornecendo resultados confiáveis e que permitiram avaliar os gradientes de umidade durante a secagem e a uniformização, colaborando para o desenvolvimento de um aspecto até o momento pouco explorado para madeiras de *Eucalyptus*;

6. A uniformização mostrou-se eficaz para reduzir os gradientes de umidade, porém o tempo utilizado de 30 horas não foi suficiente para as madeiras de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*;

7. Os programas de secagem foram adequados, sendo necessários ajustes e estudos mais avançados, especialmente, buscando reduzir o tempo de secagem para as madeiras de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna* e realizar tratamento de recuperação do colapso da madeira de *Eucalyptus robusta*, em virtude do colapso verificado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

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

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

BAKER, W. J. **How wood dries**. Madison: Forest Products Laboratory, 1956. 9p. (Report, 1642).

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

BATISTA, D. C. **Qualidade da secagem convencional conjunta da madeira de nove clones do gênero *Eucalyptus***. 2009. 105p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

BEKELE, T. Degradation of boards of *Eucalyptus globulus* Labill. And *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. during air drying. **Holz Roh Werkst**, v. 53 n. 6, p. 407-412, 1995.

BERTOLA, A. Eucalipto - 100 anos de Brasil, “falem mal, mas continuem falando de mim!”. 2004. Disponível em < <http://www.celso-foelkel.com.br/>> acesso em 30 de out. 2011.

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

BOONE, R. S.; MILOTA, M. R.; DANIELSON, J. D.; HUBER, D. W. **Quality drying of hardwood lumber**. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1992, 58 p.

BOOTLE, K. R. **Wood in Australia types, properties and uses**. Sydney, 1983.

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

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

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

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

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.

ELLWOOD, E. L.; ECKLAND, B. A.; ZAVARIN, E. Collapse in Wood. Exploratory experiments in it's prevention. **Forest Products Journal**. v. 10, 1960. p. 8-21

ELLWOOD, E. L.; GOTTSTEIN, J. W.; KAUMAN, W. G. A laboratory study on vapour drying process. C.S.I.R.O. Div. For. Prod., **Technical paper nº14**, 1961.

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

FERREIRA, M. Escolha de espécies de eucalipto. **Circular Técnica IPEF**, v.47, p.1-30, 1979.

FORESTRY AND TIMBER BUREAU. **Forest trees of Australia**. Department of National Development, Canberra. 230p. 1962.

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

GOLFARI, L.; PINHEIRO NETO, F. A. Escolha de espécies de eucalipto potencialmente aptas para diferentes regiões do Brasil. **Brasil Florestal**, Rio de Janeiro, 1(3): 1-25, 1970.

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

HART, C. A.. **The drying of wood**. Raleigh, North Carolina Agriculture Extension Service, 24p. 1968.

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**. Germany, 1970.

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Normas de procedimentos em estados de anatomia de madeira. **Série Técnica nº 15**. Brasília, 1991, 19p.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTUDOS FLORESTAIS - IPEF. **Indicações para escolha de espécies de *Eucalyptus***. Piracicaba, 2004. 3 p. (impresso).

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

JANKOWSKY, I. P. Equipamentos e processos para secagem de madeiras. In: Seminário internacional de utilização da madeira de eucalipto para serraria, 1995, São Paulo. **Anais...** Piracicaba: IPEF/IPT, 1995. 109-118p.

JANKOWSKY, I. P.; SANTOS, G. R. V.; ANDRADE, A. Secagem da madeira serrada de eucalipto. **Circular Técnica do IPEF**, Piracicaba, n.199, p.1-14, 2003.

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

KAUMAN, W. G. Contribution to the theory of cell collapse in wood, investigations with *Eucalyptus regnans*. **Australian Journal Appl. Sci.** n. 11 p. 122-145. 1960.

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

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

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

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

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

LEMO, A. L. F.; GARCIA, R. A.; LOPES, J. O.; CARVALHO, A. M.; LATORRACA, J. V. F. Madeira de *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson sob aspectos físicos e anatômicos como fatores qualitativos. **Floresta e Ambiente**. v. 19 n. 1 p. 1-8. jan./mar. 2012.

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.

LITTLE JR. E. L.; SKOLMEN R. G.. **Common Forest Trees of Hawaii**. Agriculture Handbook nº 679, Forest Service, U.S. Department of Agriculture. 3p. 1989.

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. p.1-19.

MARCHIORI, J. N., SOBRAL, M. **Dendrologia das angiospermas: Myrtales**. Santa Maria: Editora UFSM. 1997. 304p.

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

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

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

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

MILIĆ G., KOLIN B. Moisture content distribution across thickness of kiln dried oak and beech lumber during conditioning phase. **Holz Roh Werkst**, v.66, n.2: p 83-87. 2008.

NAHUZ, M. A. **Informações técnicas**. São Paulo, SP: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, 1998.

NORTHWAY, R. L. Drying strategies for plantation-grown eucalypts In: Internacional IUFRO wood drying conference, 5, Quebec, 1996, Proceeding. Quebec: IUFRO, 1996. p. 289-296.

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

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

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMEISTER, J. C.; SIMÕES, J. W.; FILHO, T. M. Caracterização da madeira de sete espécies de eucaliptos para a construção civil: 1-avaliações dendrométricas. **Scientia Forestalis**. Piracicaba – SP, n. 56, p. 113-124, 1999.

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

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

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

PERELYGIN, L. M. **Science of wood**. Moscow: Higher School Publishing House, 1965. 200p.

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

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

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

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

ROSADO, A.M. **Produção de óleo essencial de *Eucalyptus* sp.** Viçosa: DEF/UFV, 31p. (Monografia), 1996.

SANDLAND, K. M. Prediction of required duration of the conditioning process to reduce the casehardening level in LT-dried sawn timber – Initial experiments. **Holz Roh Werkst** v.59 p.183–189, 2001.

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

SANTINI, E. J. Métodos 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.

SANTOS, G. R. V. dos. **Otimização da secagem da madeira de *Eucalyptus grandis* (Hillebrand)**. 2002. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, Piracicaba.

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

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

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

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

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

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

SKOLMEN, R. G. **Processing Hawaii-grown *Eucalyptus robusta* from logs into furniture**. United States Department Commerce, Economy Developed Administration. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station - Berkeley, California. 15 p. 1971.

SKOLMEN, R. G. **Characteristics and amount of brittleheart in Hawaii-grown *Eucalyptus robusta***. Wood Science. 6 (1). p. 22-29, 1973.

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

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

STURION, J. A.; PEREIRA, J. C. D.; ALBINO, J. C.; MORITA, M. Variação da densidade básica de doze espécies de *Eucalyptus* plantadas em Uberaba, MG. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n.14, p.28-38, jun. 1987.

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

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

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

TRUGILHO, P. F., LIMA, J. T., MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, Lavras, v. 2, n. 1, 1996.

VERMAAS, H. F. Drying Eucalypts for quality: Material characteristics, pre-drying treatments, drying methods, schedules and optimization of drying quality. In: Seminário internacional de utilização de madeira de eucalipto para serraria, 1., São Paulo, 1995. **Anais**. São Paulo: IPEF;IPT, 1995. p. 119-132.

VERMAAS, H. F. Interaction of wood, water and stresses during drying: a review. **Southern African Forestry Journal**, n.181, p.25-32, Mar. 1998.

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

YOUNGS, R. L. **Physical, mechanical, and other properties of five Hawaiian woods**. U.S. Forest Serv. Forest Products Lab. Rpt. 2191, 34 p. 1960.