

## USO DE ESTUFA SOLAR PARA SECAGEM DE MADEIRA SERRADA<sup>1</sup>

### USE OF SOLAR KILN FOR THE DRYING OF SAWN WOOD

Diego Martins Stangerlin<sup>2</sup> Elio José Santini<sup>3</sup> Felipe Susin<sup>4</sup>  
Rafael Rodolfo de Melo<sup>2</sup> Darci Alberto Gatto<sup>5</sup> Clovis Roberto Haselein<sup>3</sup>

#### RESUMO

O objetivo desse estudo foi avaliar o uso da estufa solar para secagem das madeiras de *Eucalyptus tereticornis*, *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora*, bem como comparar essa metodologia com a secagem ao ar livre. Para tanto, foi desenvolvido um secador solar constituído por estruturas de madeira, cobertura com dupla camada de plástico PVC (policloreto de vinila), sistema coletor interno de energia solar e sistema de circulação do ar aquecido. A eficiência do secador solar foi comparada com a secagem ao ar livre quanto ao tempo de secagem e qualidade da madeira. Cada espécie foi submetida, no mesmo período, aos dois métodos de secagem, sendo utilizadas cargas com 55 tábuas em cada método. Os resultados obtidos indicaram que a estufa solar foi mais eficiente apresentando tempo de secagem de duas a cinco vezes menores que a secagem ao ar livre e com teor de umidade final mais baixo. A madeira seca, tanto na estufa solar quanto ao ar livre, apresentou boa qualidade, não sendo verificada a incidência de defeitos como encanoamento e colapso. Além disso, o correto empilhamento e a tecnologia de secagem utilizados proporcionaram poucos empenos do tipo encurvamento. A incidência de arqueamentos, rachaduras de superfície e de topo não apresentaram diferença significativa entre a secagem em estufa solar e ao ar livre para as três madeiras estudadas.

**Palavras-chave:** secagem solar; qualidade da madeira; taxa de secagem; madeiras refratárias.

#### ABSTRACT

This study aimed at evaluating the use of a solar kiln for the drying of woods of *Eucalyptus tereticornis*, *Eucalyptus saligna* and *Corymbia citriodora*, as well as comparing such a methodology to the air seasoning practice. In order to do so, it was built a solar kiln composed basically of wood structures, roofing with a double layer of PVC, sunlight internal collector and hot air circulation systems. The efficiency of the solar kiln was compared to the air seasoning in drying time and wood quality. In the same drying schedule, each species was submitted to the two drying approaches using a load of 55 boards in each method. Results indicated that the solar kiln was more efficient in drying time, around 2 to 5 times faster and final moisture content lower than the air drying. Adequate wood quality was observed in both drying methods, and no defects such as cup or collapse were observed. Furthermore, the correct piling up and drying process provided minimization of defects such as bow. The incidence of crook, end and surface checks were not significantly distinct between solar drying and air seasoning for the three woods studied.

**Keywords:** solar drying; wood quality; drying rate; refractory wood.

#### INTRODUÇÃO

A secagem em estufa solar é um dos métodos de secagem à baixa temperatura (< 50°C), sendo um processo intermediário entre a secagem ao ar livre, em que as principais variáveis não são controladas, e a secagem em estufa convencional em que as variáveis são controladas e o processo é dotado de aquecimento artificial (VITAL e COLLOM, 1974). Além disso, a secagem em estufa solar vem sendo recomendada por diversos autores (BAUER, 2003; SANTINI, 1981; HAQUE, 2002) como alternativa de substituição dos

1. Parte da Dissertação do primeiro autor apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP: 97105-900, Santa Maria (RS).
2. Engenheiro Florestal, MSc., Doutorando em Ciências Florestais, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, SQS 406, Bloco A, Ap. 306, Asa Sul, CEP: 70255-010, Brasília (DF). [diego\\_stangerlin@yahoo.com.br](mailto:diego_stangerlin@yahoo.com.br)
3. Engenheiro Florestal, Dr., Professor Associado do Departamento de Ciências Florestais, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP: 97105-900, Santa Maria (RS).
4. Acadêmico do Curso de Engenharia Florestal, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP: 97105-900, Santa Maria (RS).
5. Engenheiro Florestal, Dr., Professor Adjunto do Curso de Engenharia Industrial Madeireira, Universidade Federal de Pelotas, Caixa Postal 354, CEP: 96019-900 Pelotas (RS).

Recebido para publicação em 20/04/2009 e aceito em 5/10/2009.

métodos que apresentam elevados custos de investimento, manutenção e consumo energético.

Segundo Troxell e Mueller (1968), os primeiros estudos a respeito do emprego de secadores solares para redução do conteúdo de umidade da madeira surgiram entre o final da década de 50 e início da década de 60.

Para operação da estufa solar, necessita-se, basicamente, de um sistema de coleta da energia para o aquecimento do ar e um de distribuição do ar aquecido (BANKS, 1969). O sistema de coleta é composto pelo material absorvente (coletor) e a cobertura transparente (VIEHBECK, 1999). A circulação do ar aquecido é realizada por ventiladores (LUMLEY e CHOONG, 1981).

Os secadores solares podem dividir-se em dois tipos básicos: modelos com coletor solar incluído na estrutura e modelos em que o coletor se encontra no lado de fora da câmara de secagem (BAUER, 2003).

Os secadores dotados de coletores internos são denominados na literatura, em geral, de câmaras do tipo “greenhouse”. Esse modelo de secador é o mais comumente utilizado, e tem como características principais o baixo custo e a facilidade de construção (PLUMPTRE, 1967).

O secador do tipo “greenhouse” consiste de uma estrutura, em geral de madeira ou chapa compensada tratada, com cobertura e paredes revestidas de material transparente ou translúcido, de forma a permitir a incidência da energia solar irradiada (SANTINI, 1981).

Com finalidade de maximizar o aumento da temperatura interna do secador, materiais como alumínio, aço, cobre e madeira, pintados de preto, são utilizados como coletor solar interno (VIEHBECK, 1999; SANTINI, 1981). Adicionalmente, o restante das estruturas sólidas internas devem ser pintadas de preto, em razão de que pinturas enegrecidas apresentam melhores qualidades de absorção da radiação solar (MALDONADO e PECK, 1962; CHUDNOFF *et al.*, 1966).

Pesquisadores como Read *et al.* (1974), Tschernitz e Simpson (1979), Sattar (1987) e Bois (1977) citam que o tempo de secagem em estufa solar é sempre inferior ao processo realizado ao ar livre. Por mais simples que seja a construção do secador solar, as condições internas são sempre superiores às verificadas em ambiente externo e, até mesmo, durante a noite, se conservam mais elevadas, propiciando uma secagem mais rápida.

Com relação à qualidade da madeira seca em estufa solar, os estudos realizados por Chen e Rosen (1979), Bauer (2003) e Sattar (1987) demonstram uma menor incidência de defeitos na secagem em estufa solar em relação ao processo realizado ao ar livre. No entanto, poucos estudos apresentam uma abordagem ampla da qualidade da madeira, quanto aos diversos tipos de defeitos, bem como do tempo de secagem.

Dessa forma, objetivou-se no presente estudo avaliar o uso da estufa solar, quanto ao tempo de secagem e qualidade da madeira, para secagem de *Eucalyptus tereticornis* Sm., *Eucalyptus saligna* Sm. e *Corymbia citriodora* Hill & Johnson, bem como comparar a metodologia com a secagem ao ar livre.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Coleta e preparo do material

De modo aleatório, foram selecionadas árvores adultas, com aproximadamente 25 anos, de *Eucalyptus tereticornis*, *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora*, com bom fuste, grã reta e diâmetro à altura do peito (DAP) de aproximadamente 35 cm. De cada espécie, foram utilizadas 12 árvores, das quais foram retiradas as duas primeiras toras, com 2,8 m de comprimento.

A madeira foi desdobrada por meio de uma serra-de-fita, sendo adotado o sistema de cortes tangenciais para a retirada das tábuas. As tábuas apresentaram dimensões nominais de 2,5 x 15,0 x 280 cm (espessura, largura e comprimento).

Os processos de secagem em estufa solar e ao ar livre das madeiras de *Eucalyptus tereticornis*, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna* foram iniciados simultaneamente nos dias 18 de maio, 12 de julho e 4 de setembro de 2008, respectivamente. Para cada método de secagem foi utilizada uma carga de madeira por espécie, sendo esta formada por 55 tábuas, totalizando 110 tábuas por espécie em estudo.

### Construção da estufa solar

Para realização da secagem em estufa solar desenvolveu-se um secador solar (Figura 1), modelo “greenhouse”, apresentando capacidade para 1,0 m<sup>3</sup> de madeira serrada, adaptado de Santini (1981). As dimensões do secador foram: 3,7 m de comprimento, 2,0 m de largura, 3,2 m de altura na parede sul e 1,0 m de altura na parede norte. Essa diferença de altura entre as paredes se deve ao ângulo de inclinação da cobertura da estufa de 30°, adotado em razão da latitude, pois o município de Santa Maria, RS, onde foi instalado o secador solar, está localizado a uma latitude sul de 29°41’25”. A inclinação da estufa num ângulo igual a latitude do local possibilita o uso do secador solar durante todo o ano, de modo que seja possível a incidência dos raios solares perpendicularmente ao teto transparente (VIEHBECK, 1999).

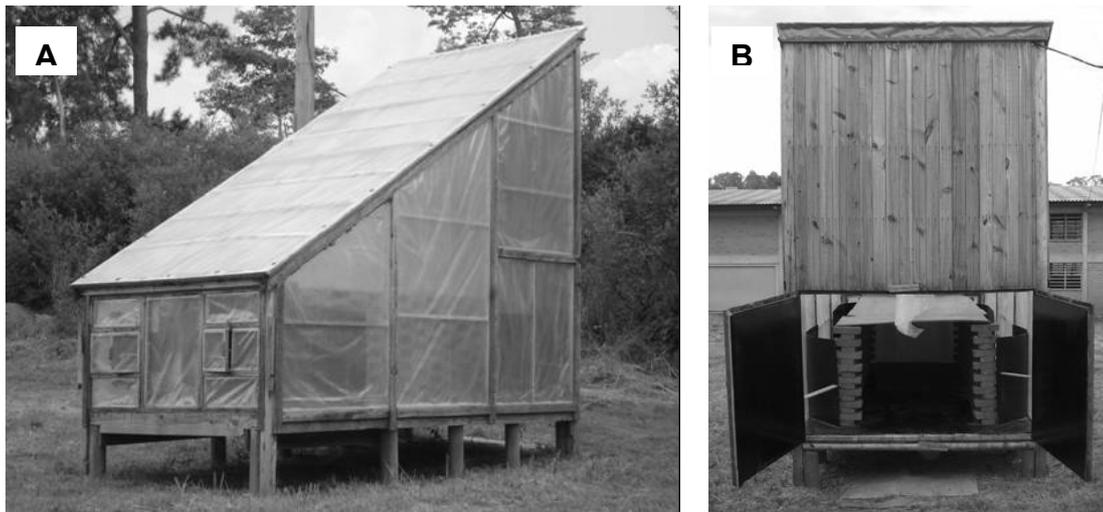


FIGURA 1: Secador solar utilizado no estudo: vista da parede norte (A) e parede sul (B).  
FIGURE 1: Solar kiln used in the study: view of the north wall (A) and south wall (B).

A orientação do secador solar foi no sentido norte-sul, de modo que os raios solares fossem incididos mais diretamente, propiciando um melhor aproveitamento destes. A construção foi realizada basicamente com estruturas de madeira apoiadas em moirões de eucalipto tratados, servindo de fundação, com elevação de 30 cm do solo.

Para confecção do assoalho, foram utilizadas tábuas com 2,5 cm de espessura. A camada primária foi coberta com chapas de isopor de 2,0 cm e, por fim, foi colocada uma terceira camada, composta por chapas de compensado de 1,0 cm. Esse processo construtivo foi empregado visando à obtenção de um isolamento térmico satisfatório, evitando o mínimo possível às perdas de calor.

A parede sul, como não era exposta à incidência de luz solar, foi fabricada de modo semelhante ao assoalho. Nessa parede, foram colocadas duas portas, com dimensões de 115 x 90 cm (altura x largura), para carga e descarga do material em experimento.

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

No restante da estufa solar, paredes norte, leste, oeste e o teto, utilizou-se dupla camada de plástico policloreto de vinila (PVC) espaçadas por separadores de seção transversal de 2,0 cm<sup>2</sup>, com objetivo de otimizar o isolamento térmico da câmara.

Na parede norte foram instaladas duas janelas, com dimensões de 25 x 25 cm, as quais têm, por finalidade, permitir a renovação do ar no interior da estufa.

Para a circulação do ar, utilizou-se um ventilador com 30 cm de diâmetro, movido por um motor elétrico trifásico de 0,5 HP, fixado sobre o assoalho da estufa. A cada quatro dias, procedeu-se à inversão do fluxo de ar.

Ao redor da área de empilhamento foram edificadas duas paredes vazadas de tijolos, com a finalidade de direcionamento do fluxo de ar e armazenamento de calor, propiciando o aproveitamento do

calor produzido durante o dia para a secagem nos períodos noturnos. Sobre as paredes de tijolos foi apoiada uma chapa compensada de 1,0 cm (coletor interno) pintada com tinta a óleo preta, servindo de absorvedor de luz solar, juntamente com as superfícies internas (assoalho e parede sul). Para auxiliar o direcionamento do fluxo de ar, ainda foi instalada, acima da chapa compensada, uma divisória de plástico PVC, que cobriu toda a extensão em comprimento da estufa, e utilizados quatro defletores curvados de HDF (High Density Fiberboard) com 0,3 cm de espessura nos quatro cantos da estufa. Os defletores também foram pintados de preto, como as demais estruturas internas.

### Secagem em estufa solar

A disposição das tábuas dentro da estufa resultou na montagem de uma pilha constituída de cinco colunas e 12 camadas, inclusas as tábuas que deram origem às amostras de controle do processo. Além destas, foram colocadas de quatro a cinco camadas de tábuas, servindo como peso para restrição mecânica da pilha. Para a separação de cada camada foram utilizados cinco tabiques, livres de defeitos, com dimensões de 2,5 x 2,5 x 100 cm (espessura, largura e comprimento), dispostos a uma distância de 52 cm.

### Secagem ao ar livre

A secagem ao ar livre foi realizada a uma distância de aproximadamente 15 m da estufa solar, de modo a evitar variações climáticas nas duas metodologias de secagem. O local escolhido é alto e plano, com boa drenagem e sem obstáculos à ventilação.

As tábuas foram empilhadas de modo semelhante à secagem em estufa solar, sobre estruturas de madeira apoiadas a uma fundação de moirões de eucalipto tratados, os quais foram elevados a 50 cm do solo. A orientação das pilhas foi realizada no sentido norte-sul, de acordo com a direção predominante dos ventos.

Para cobertura das pilhas, utilizaram-se duas telhas de fibrocimento com 6,0 mm de espessura, de modo a minimizar a incidência de raios solares e precipitações.

### Avaliação do tempo e taxa de secagem

O monitoramento do teor de umidade da madeira durante a secagem foi realizado por meio de cinco amostras de controle para cada carga, com dimensões de 2,5 x 15 x 40 cm (espessura, largura e comprimento). Essas amostras, confeccionadas partindo de tábuas utilizadas no empilhamento, foram monitoradas mediante pesagens diárias.

Antes do início do processo de secagem, determinou-se o teor de umidade inicial de cada amostra de controle (Equação 1) mediante a média aritmética de duas seções de 2,5 x 15 x 2,5 cm, correspondente à espessura, à largura e ao comprimento, retirado nas extremidades.

$$TU_i = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100 \quad (1)$$

Em que:  $TU_i$  = teor de umidade inicial (%);  $Mu$  = massa úmida (g);  $Ms$  = massa seca (g).

As amostras de controle foram dispostas em diferentes locais de fácil remoção e reposição, de modo a permitir uma medição real e representativa do teor de umidade destas. O teor de umidade de cada carga durante a secagem foi determinado por meio da Equação 2:

$$TU_a = \frac{Ma (TU_i + 100)}{Mu} - 100 \quad (2)$$

Em que:  $TU_a$  = teor de umidade atual (%);  $Ma$  = massa atual da amostra (g);  $TU_i$  = teor de umidade inicial (%);  $Mu$  = massa úmida da amostra (g).

Com base nos dados de redução do conteúdo de umidade da madeira foram calculadas as taxas médias de secagem para cada método (Equação 3).

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

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

### Avaliação da qualidade da madeira

Avaliaram-se os seguintes defeitos: rachaduras (de superfície e de topo), empenamentos (arqueamento, encanoamento e encurvamento), colapso, tensões de secagem e contrações.

O controle dos defeitos de rachaduras e empenamentos foi realizado em duas fases distintas, logo após o desdobro e ao término do processo de secagem. Após a medição dos defeitos ocorridos durante a secagem, compararam-se os valores obtidos com aqueles apresentados na Norma para Classificação de Madeira Serrada de Folhosas (IBDF, 1983). Foram considerados os defeitos acima dos admitidos para a 4ª classe.

A determinação da presença e intensidade de colapso foi realizada por meio da remoção de alguns milímetros da superfície da tábua com uma plaina desgrossadeira, conforme recomendado por Severo (2000).

As tensões de secagem foram avaliadas mediante procedimentos descritos por Rasmussen (1961), sendo realizada uma avaliação preliminar após a secagem e uma final após climatização dos corpos-de-prova em câmara (20°C de temperatura e 65% de umidade relativa).

Por fim, foram avaliadas as contrações radiais e tangenciais nas amostras de controle utilizadas no monitoramento do processo de secagem. Para a obtenção de dados precisos, antes e após a secagem foram demarcados, com lápis de anilina, os pontos de medições em todas as amostras. Mediante a relação entre a contração tangencial e radial obteve-se o fator de anisotropia.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Teor de umidade, tempo e taxa de secagem

O teor de umidade da madeira, o tempo decorrido e a taxa de secagem para as três espécies estudadas são apresentados na Tabela 1. A diferença entre os teores de umidade inicial se deve à variação existente na umidade da madeira de eucalipto em estado verde, que pode oscilar entre 60 e 100%, conforme referido por Bauer (2003).

TABELA 1: Teor de umidade, tempo e taxa média de secagem em estufa solar e ao ar livre.

TABLE 1: Moisture content, time and drying rate in solar kiln and air drying methods.

Espécie	Método	TU <sub>i</sub> (%)	TU <sub>f</sub> (%)	t (dias)	Ts (%/dia)
<i>Corymbia citriodora</i>	Solar	62,05	15,15	35	1,30 <sup>A</sup>
	Ar livre	60,02	20,71	58	0,68 <sup>B</sup>
<i>Eucalyptus saligna</i>	Solar	74,04	15,06	22	2,70 <sup>A</sup>
	Ar livre	75,62	20,75	33	1,66 <sup>B</sup>
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	Solar	82,13	15,24	35	1,91 <sup>A</sup>
	Ar livre	73,58	20,30	104	0,51 <sup>B</sup>

Em que: TU<sub>i</sub> = teor de umidade inicial; TU<sub>f</sub> = teor de umidade final; t = tempo de secagem; Ts = taxa de secagem. Médias seguidas por letras diferentes, dentro de cada espécie, diferem significativamente entre si (LSD Fisher, p > 0,05).

Os teores de umidade final das madeiras submetidas aos dois processos de secagem foram estabelecidos em razão da sua estabilização, uma vez que as condições ambientais se mostraram desfavoráveis à secagem no período. Apesar da secagem em estufa solar possibilitar a redução do conteúdo de umidade da madeira até 8-10% nos meses de verão (BOND, 2006), não se obteve nesse estudo teores de umidade abaixo de 15%. Haque (2002) realizando secagem em estufa solar na Austrália, em período de inverno, também verificou dificuldade em obter uma redução significativa do teor de umidade, finalizando a secagem para algumas cargas em 19%. De acordo com Santini (1984), na cidade de Santa Maria, RS, a madeira exposta à secagem ao ar livre, durante o período em que foi realizado o experimento, dificilmente alcançaria teores de umidade muito baixos, uma vez que a média do teor de umidade de equilíbrio é de 17,5%.

Para fins de comparação entre os tempos de secagem das duas metodologias, foi estabelecido um comparativo ao teor de umidade de 20%. Nessa situação, a secagem em estufa solar, para as madeiras de *Eucalyptus tereticornis*, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna* foi 4,7, 2,3 e 1,8 vezes respectivamente mais rápida que a secagem ao ar livre.

De acordo com Read *et al.* (1974), Sharma *et al.* (1974), Bois (1977) e Gough (1977), o tempo de

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

Apesar das nítidas vantagens no tempo de secagem em favor do processo em estufa solar, a comparação realizada ao teor de umidade de 20% não possibilita a obtenção de resultados precisos, visto que a retirada do conteúdo de umidade a teores bem abaixo dos 20% estipulados nessa comparação é efetuada de modo mais rápido na estufa solar do que ao ar livre (HAQUE, 2002). No entanto, é importante ressaltar que a secagem solar proporcionou teores de umidade mais baixos quando a secagem ao ar livre já estava estabilizando.

Na Figura 2, pode-se visualizar a representação gráfica da curva de secagem das três espécies submetidas aos dois processos.

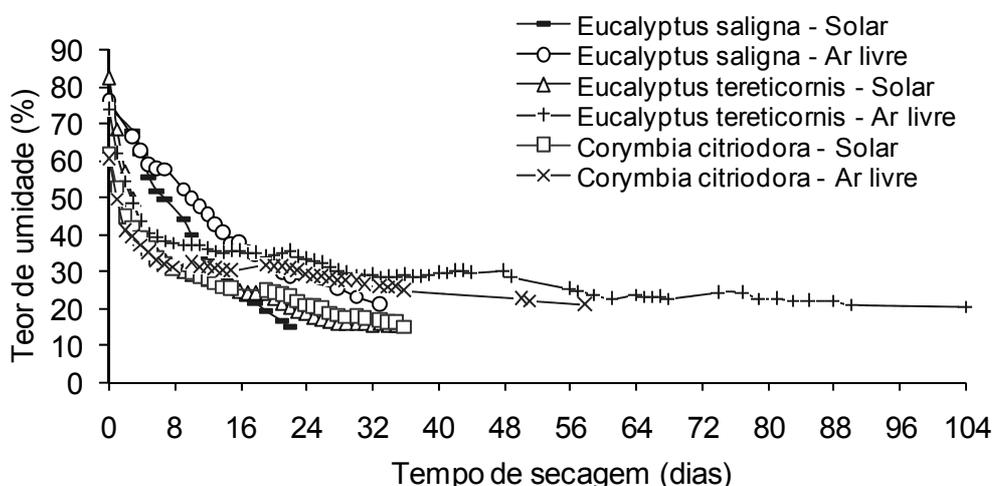


FIGURA 2: Curvas de secagem em estufa solar e ao ar livre para as três espécies estudadas.

FIGURE 2: Drying curve in solar kiln and air drying for the three species studied.

## Qualidade da madeira

### Rachaduras

A percentagem de peças com rachaduras de topo na madeira de *Eucalyptus tereticornis* submetida à secagem em estufa solar foi de 5,46%, metade da verificada ao ar livre, de 10,91% (Tabela 2), corroborando com os resultados obtidos por Chudnoff *et al.* (1966), Chen e Rosen (1979) e Tschernitz e Simpson (1979).

TABELA 2: Índice de rachaduras de topo (IRT) médio e percentual de peças defeituosas.

TABLE 2: End checking and percentage of defective boards.

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

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

No entanto, ao analisar as madeiras de *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora*, observa-se que

apenas ao final do processo de secagem em estufa solar verificou-se a presença de peças defeituosas, sendo as percentagens de 1,82 e 3,64% respectivamente. Segundo alguns estudos, como o realizado por Lumley e Choong (1981), a presença de rachaduras de topo é um dos principais defeitos que ocorrem durante o processo de secagem em estufa solar.

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

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

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

De acordo com Rietz e Page (1971), a exposição das pilhas de madeira, na secagem ao ar livre, a ação direta de raios solares provoca a incidência de defeitos, como as rachaduras de topo. No entanto, nesse estudo, em consequência da utilização de coberturas nas pilhas ao ar livre e o elevado teor de umidade final das tábuas secas ao ar livre contribuíram para o maior IRT na secagem em estufa solar, a qual também apresenta condições de secagem mais severa.

Com relação às rachaduras de superfície, a madeira de *Eucalyptus saligna* apresentou o menor índice dentre as espécies analisadas, sendo verificada a mesma percentagem de peças defeituosas (10,91%) resultantes da secagem em estufa solar e ao ar livre (Tabela 3).

TABELA 3: Percentual de peças com defeito de rachaduras de superfície.

TABLE 3: Percentage of defective boards by surface checks.

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

Williams (1983), Sattar (1987) e Plumptre (1979) verificaram, em seus estudos, uma melhor qualidade da madeira seca em estufa solar em comparação a seca ao ar livre, quando avaliada as rachaduras superficiais. Para a madeira de *Corymbia citriodora*, verificou-se essa tendência, sendo registrada maior percentagem de peças defeituosas resultantes da secagem ao ar livre (60%) em comparação ao constatado na estufa solar (27,27%). Por sua vez, a madeira de *Eucalyptus tereticornis* apresentou menor percentagem de peças defeituosas resultante do processo de secagem ao ar livre, em comparação com o verificado na estufa solar, sendo esses valores de 18,18 e 43,63% respectivamente. Haque (2002), realizando secagem em estufa solar de madeiras de *Eucalyptus pilularis*, registrou que o tipo de defeito com maior degradação da madeira foi a rachadura superficial.

A presença de rachaduras de superfície não causou grandes prejuízos na qualidade da madeira, considerando seu uso estrutural, por causa das pequenas dimensões.

### **Empenamentos**

O percentual de peças com defeito de arqueamento, resultante da secagem em estufa solar foi superior ao registrado no processo ao ar livre (Tabela 4). Bauer (2003), ao analisar o acréscimo da flecha de arqueamento, em madeiras de *Eucalyptus grandis*, ao final da secagem verificou que o arqueamento foi mais

severo nas tábuas secas em estufa solar. Todavia, Santini (1981) em seu estudo verificou tendência contrária, sendo observada maior percentagem de peças arqueadas na secagem ao ar livre quando comparada à estufa solar.

TABELA 4: Arqueamento (A) médio e percentual de peças defeituosas.

TABLE 4: Average crook and percentage of defective boards.

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

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

Dentre as espécies, a madeira de *Eucalyptus tereticornis* foi a mais afetada, apresentando 10,91% de peças arqueadas ao final da secagem ao ar livre e 14,54% de peças arqueadas no fim do processo em estufa solar. Para a madeira de *Eucalyptus saligna*, o percentual de peças arqueadas ao final do processo foi de 3,64 e 7,27%, secagem ao ar livre e em estufa solar. Por sua vez, *Corymbia citriodora* apresentou 7,27 e 9,09% de peças defeituosas ao final da secagem ao ar livre e em estufa solar respectivamente.

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

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

As maiores médias de arqueamento e percentagem de peças defeituosas na secagem em estufa solar podem ter resultado da diferença de teor de umidade final em comparação com o processo ao ar livre, visto que não foi registrada grande diferença entre as contrações radial e tangencial nas duas metodologias de secagem (Tabela 5), a qual é considerada uma das principais fontes de peças empenadas (RASMUSSEN, 1961; CECH e PFAFF, 1977).

TABELA 5: Contrações radial e tangencial e fator de anisotropia das madeiras expostas à secagem.

TABLE 5: Radial (R) and tangential (T) shrinkage and ratio T/R of wood exposed to drying.

Espécie	Método	Contração (%)		Fator de anisotropia (%)
		radial	tangencial	
<i>Corymbia citriodora</i>	Solar	3,65	4,16	1,14 <sup>A</sup>
	Ar livre	2,46	3,59	1,46 <sup>A</sup>
<i>Eucalyptus saligna</i>	Solar	4,50	3,64	0,81 <sup>A</sup>
	Ar livre	3,36	2,41	0,72 <sup>A</sup>
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	Solar	4,93	5,65	1,15 <sup>A</sup>
	Ar livre	4,69	5,12	1,09 <sup>A</sup>

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

O defeito de encaamento não foi verificado entre as fases de avaliação e os métodos de secagem em que foi submetida cada espécie. Bauer (2003) ao realizar secagem de madeiras de eucalipto em estufa solar também não verificou incidência de encaamento.

De acordo com Galvão e Jankowsky (1985), o encaamento pode ser resultante da diferença entre as contrações transversais e pela exposição de apenas uma face da tábua à secagem. No entanto, o correto empilhamento, dispondo peças tangenciais na parte de baixo da carga, a utilização de tábuas excedentes, com função de restrição mecânica, a secagem lenta e uniforme e a utilização de tábuas com largura inferior a 25 cm proporcionaram a ausência desse defeito nas duas metodologias de secagem.

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

Os dados médios das flechas de encurvamento das três espécies apresentaram tendência de redução de seus valores após a secagem, exceto na secagem em estufa solar de *Eucalyptus saligna* e na secagem ao ar livre de *Corymbia citriodora*. Ao analisar as médias das flechas de encurvamento resultantes dos processos de secagem para cada espécie, não se verifica diferença significativa ao nível 5% de probabilidade de erro (Tabela 6).

TABELA 6: Encurvamento médio e percentual de peças defeituosas.

TABLE 6: Average bow and percentage of defective boards.

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

Em que: <sup>1</sup> Flecha de encurvamento resultante do processo de secagem; médias seguidas por letras iguais, dentro de cada espécie, não diferem significativamente entre si (LSD Fisher,  $p > 0,05$ ); E = Flecha de encurvamento ( $\text{mm m}^{-1}$ ).

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

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

Segundo Simpson (1991), o encurvamento não é um defeito problemático na madeira, uma vez que este pode ser facilmente eliminado durante o processo de empilhamento da carga de madeira. De modo geral, o encurvamento é influenciado muito mais pelo método de empilhamento do que pelas circunstâncias de secagem. Mediante a adição de pesos sobre a pilha e/ou colocação de peças defeituosas na parte de baixo da pilha, conforme realizado nesse estudo, se possibilita a redução significativa do encurvamento (BEKELE, 1995).

### Colapso

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

Em geral, as madeiras refratárias à secagem, como no caso do eucalipto, apresentam tendência de manifestarem a presença de peças colapsadas (CAMPBELL e HARTLEY, 1988). No entanto, a realização de processos de secagem suave, com retirada lenta do conteúdo de umidade da madeira, como ocorre nos métodos de baixa temperatura ( $< 50^{\circ}\text{C}$ ), proporciona a ausência do defeito de colapso, conforme verificado nesse estudo.

### Tensões de secagem

Verifica-se que, após a secagem, as tensões de secagem foram menos severas nas madeiras submetidas ao processo ao ar livre em comparação com as expostas a secagem em estufa solar (Tabela 7). A diferença entre os teores de umidade final em cada método de secagem propiciou esse comportamento. Entretanto, após climatização de 24 horas, as madeiras das três espécies apresentaram, em sua maioria, 100% de peças com tensões fortes.

TABELA 7: Percentagem de peças com tensões de secagem em estufa solar e ao ar livre.

TABLE 7: Percentage of drying stress board in solar kiln and air drying methods.

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

A presença de peças com endurecimento superficial provavelmente pode ser atribuída à ausência de condicionamento no final da secagem, tratamento possível somente em processos controlados como a secagem em estufa convencional. Essa provável explicação, também mencionada por Casin (1967), é apoiada no fato que as tábuas utilizadas neste estudo não tinham dimensões tão reduzidas, nem eram provenientes de povoamentos de rápido crescimento e de curta rotação, condições que favorecem o desenvolvimento de tensões de secagem. A presença dessas tensões em madeiras submetidas à secagem solar também foi observada por Casin (1967), Lumley e Choong (1981), Santini (1981) e Bauer (2003).

### CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste estudo, conclui-se:

Para as três espécies estudadas, o teor de umidade final e o tempo de secagem na estufa solar foram menores que aqueles obtidos ao ar livre;

A madeira seca nos dois métodos apresentou boa qualidade, evidenciando uma baixa incidência de peças com encurvamento e ausência de defeitos como encanoamento e colapso;

Não foi detectada diferença significativa entre os métodos de secagem em estufa solar e ao ar livre quanto à ocorrência de rachaduras de topo e de arqueamento;

As espécies de eucalipto foram suscetíveis à incidência de rachaduras de superfície nos dois métodos de secagem;

As tábuas secas em estufa solar apresentaram grande propensão ao desenvolvimento de tensões de secagem.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BANKS, C. H. **Solar drying of timber – a development study**. Pretoria: CSIR Timber Research Unit, 1969. 27 p.
- BAUER, K. **Development and optimisation of a low-temperature drying schedule for *Eucalyptus grandis* (Hill) ex Maiden in a solar-assisted timber dryer**. 2003. 178 f. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias) – Fakultät Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim, Hohenheim.
- BEKELE, T. Degradation of boards of *Eucalyptus globulus* Labill. and *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. during air drying. **Holz als Roh-und Werkstoff**, München, v. 53, n. 6, p. 407-412, 1995.
- BOND, B. **Design and operation of a solar-heated dry kiln**. Blacksburg: Department of Wood Science and Forest Products, Virginia Tech, Virginia Cooperative Extension, 2006. 10 p.
- BOIS, P. J. **Constructing and operating a small solar-heated lumber dryer**. Madison: Department of Agriculture, Forest Service, State and Private Forest, Forest Products Utilities, 1977. 12 p. (Technical Report n.7).
- 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.
- CASIN, R. F. **Solar dryer for lumber**. Los Banos: For. Prod. Res. Inst., 1967. 3 p. (Technical Note, n. 76).

- CECH, M. Y.; PFAFF, F. **Kiln operator's manual of Eastern Canada**. Ontario: Eastern Forest Products Laboratory, 1977. 189 p.
- CHEN, P. Y. S. *et al.* Pilot plant studies of solar and solar-dehumidification lumber drying. In: INTERSOCIETY ENERGY CONVERSION ENGINEERING CONFERENCE, 15., 1980, Seattle. **Proceedings...** Seattle: IECEC, 1980. p. 18-22.
- CHEN, P. Y. S. *et al.* Experimental solar-dehumidification kiln for lumber drying. **Forest Products Journal**, Madison, v. 32, n. 9, p. 35-41, 1982.
- CHEN, P. Y. S.; ROSEN, H. N. Drying yellow-poplar in a highly efficient solar kiln. In: ANNUAL WESTERN DRY KILN CLUBS, 30., 1979, Corvallis. **Proceedings...** Corvallis: Western Dry Kiln Clubs, 1979. p. 23-32.
- CHUDNOFF, M. *et al.* **Solar drying of tropical hardwoods**. Rio Piedras: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, International Institute of Tropical Forestry, Paper ITF-2, 1966. 26 p.
- CUETO, E. M. P. Diseño y ensayo de un secador solar para madera. **Madera y Bosques**, Xalapa v. 3, n. 2, p. 13-28, 1997.
- GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo, Brasil: Nobel, 1985. 111 p.
- GOUGH, D. K. **The design and operation of a solar timber kiln**. Suva, Fiji: Fiji Timbers and their uses, Department of Forestry, 1977. 17 p.
- HAQUE, M. N. **Modelling of solar kilns and the development of an optimized schedule for drying hardwood timber**. 2002. 354 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - University of Sidney, Sidney.
- IBDF - Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal. **Norma para classificação de madeira serrada de folhosas**. Brasília: Ministério da Agricultura. 1983. 67 p.
- LUMLEY, T. G.; CHOONG, E. T. **Solar drying of wood in Louisiana**. Baton Rouge: Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, 1981. 55 p. (Bulletin n. 732).
- MALDONADO, E. D.; PECK, E. C. Drying by solar radiation in Puerto Rico. **Forest Products Journal**, Madison, v. 12, n. 10, p. 487-488, 1962.
- PLUMPTRE, R. A. The design and operation of a small solar seasoning kiln on the Equator in Uganda. **Commonwealth Forestry Review**, Abingdon, v. 46, n. 4, p. 298-309, 1967.
- PLUMPTRE, R. A. Simple solar heated timber dryers: design, performance and commercial viability. **Commonwealth Forestry Review**, Abingdon, v. 58, n. 4, p.243-251, 1979.
- RASMUSSEN, E. F. **Dry kiln operator's manual**. Madison, USA: U.S. Department of Agriculture, Forest Products Laboratory, 1961. 197 p.
- READ, W. R. *et al.* A solar timber kiln. **Solar Energy**, Tampa, v. 15, n. 1, p. 309-316, 1974.
- RIETZ, R. C.; PAGE, R. H. **Air drying of lumber: a guide to industry practices**. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 1971. 110 p.
- SANTINI, E. J. **Secagem de madeira serrada em estufa solar e sua comparação com os métodos convencionais**. 1981. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- SANTINI, E. J. Umidade de equilíbrio para algumas cidades do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO FLORESTAL ESTADUAL, 5., 1984, Nova Prata. **Anais...**Santa Maria: UFSM, 1984. p. 828-840.
- SATTAR, M. A. Comparative studies of wood seasoning with a special reference to solar drying. **Bano Biggyan Patrica**, Chittagong, v. 16, n. 1/2, p. 30-42, 1987.
- SEVERO, E. T. D. Qualidade da secagem de madeira serrada de *Eucalyptus dunnii*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 109-124, 2000.
- SHARMA, S. N. *et al.* A solar timber seasoning kiln. **Journal of the Timber Development Association of India**, Dehra Dun, v. 18, n. 2, p. 10-26, 1974.
- SIMPSON, W. T. **Dry kiln operator's manual**. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Products Laboratory, 1991. 274 p.
- STÖHR, H. P. The seasoning of South African grown *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus saligna*. **South African Forestry Journal**, Grahamstown, v. 102, n. 1, p. 61-66, 1977.
- TROXELL, H. E.; MULLER, L. A. Solar lumber drying in the Central Rocky Mountain Region. **Forest Products Journal**, Madison, v. 18, n. 1, p. 19-24, 1968.
- TSCHERNITZ, J. L.; SIMPSON, W. T. Solar-heated forced-air, lumber dryer for tropical latitudes. **Solar Energy**, Tampa, v. 22, n. 1, p. 563-566, 1979.
- VITAL, B. R. Utilização de energia solar para secagem de madeira. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 23, n. 125, p. 1-10,

1976.

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

VIEHBECK, P. **Lo básico del secado de madera con energía solar**. Eschborn: GTZ - GATE, 1999. 49 p.

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

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