

# TEMPERATURA DA MADEIRA COMO ALTERNATIVA DE CONTROLE DO PROCESSO DE SECAGEM

Elio José Santini<sup>1</sup>

**RESUMO:** Oito cargas de madeira serrada de *Pinus elliottii*, com 25 mm de espessura, foram submetidas a diferentes temperaturas de secagem (50, 70, 90 e 110°C) e duas velocidades de ar (2,3 e 5,0 m/s), com o objetivo de correlacionar a temperatura da madeira com o seu teor de umidade, bem como estabelecer o ajuste de modelos matemáticos, visando à sua aplicação no controle do processo. Sensores tipo diodo, introduzidos a ¼ da espessura da peça e uma célula de carga tipo tração para pesagens da pilha de madeira possibilitaram a obtenção da temperatura da madeira e teor de umidade, respectivamente. O processo de secagem foi gerenciado por um sistema computadorizado composto de um PC e uma unidade de controle e aquisição de dados. Os resultados mostraram que, para a secagem a alta temperatura, existe uma excelente correlação entre temperatura da madeira e teor de umidade. Modelos que incluem a temperatura do bulbo úmido explicaram melhor a relação entre as duas variáveis e podem ser utilizados para indicar o final da secagem, especialmente para temperaturas superiores a 100°C.

**PALAVRAS CHAVE:** Secagem, controle, teor de umidade, temperatura da madeira, *Pinus elliottii*.

## WOOD TEMPERATURE AS AN ALTERNATIVE TO THE KILN DRYING PROCESS CONTROL

**ABSTRACT:** Eight loads of sawn lumber of slash pine, with 25 mm of thickness, were exposed to four drying temperatures (50, 70, 90 and 110°C) and two air speed levels (2.3 and 5.0 m/s) for correlating wood temperature and moisture content (MC), as well as to establish statistical models to be applied in kiln drying process control. Diode type temperature sensors, introduced into ¼ of the piece thickness, and a tension type load cell was used to weight the lumber pile, which allowed the determination of temperature and MC of the wood, respectively. The drying process was managed by an automated process control consisting of a PC and a data acquisition system. The results showed that, for high temperature drying, exists an excellent correlation between wood temperature and MC. Models that include wet bulb temperature explained better the two variables relationship and can be used as an end of the drying schedule indicator, specially for temperatures above 100°C.

**KEY WORDS:** Kiln drying, wood MC, drying control, wood temperature, slash pine.

### 1. INTRODUÇÃO

O emprego da temperatura da madeira, como parte de um sistema a ser utilizado para controlar o processo de secagem, não é recente.

---

<sup>1</sup> Professor do Departamento de Ciências Florestais, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Campus Universitário, Santa Maria-RS, 97105-900. [santinie@ccr.ufsm.br](mailto:santinie@ccr.ufsm.br)

Trabalhos pioneiros sobre o assunto foram realizados há aproximadamente 40 anos (Keylwerth, 1952; Keylwerth, Gaiser e Meichsner, 1955; Keylwerth e Noack, 1956). Atualmente, a relação entre temperatura da madeira/teor de umidade volta a ser pesquisada, visando ao desenvolvimento de um sistema automático de controle para estufas comerciais (Bai e Garrahan, 1984; Panow e Nester, 1985; Holmes e Forrer, 1989).

Segundo Holmes e Forrer (1989), a temperatura da madeira como um indicador do teor de umidade tem sido investigada, porque ela pode ser medida corretamente, com precisão e a baixo custo, em qualquer faixa de teor de umidade. O sistema eletrônico desenvolvido por Forrer (1984) para monitorar a distribuição da umidade e temperatura da madeira durante a secagem possivelmente pode ser aplicado tanto na pesquisa como na indústria e sem os problemas de medição anteriormente constatados por Malmquist e Meichsner (1964). As dificuldades freqüentemente detectadas por ocasião da medição da temperatura propiciaram uma série de estudos, visando ao desenvolvimento de uma metodologia mais adequada.

Beard, Rosen e Adesanya (1985) sugerem o emprego do termômetro de radiação para medir a temperatura superficial da madeira porque ele pode detectar a temperatura sem encostar no objeto. Já a temperatura interna da madeira pode ser obtida por meio de termopares tipo cobre-constantan (Bai e Garrahan, 1984; Holmes, 1988) ou cromo-alumínio (Neville e Vermaas, 1988). A colocação dos sensores na madeira e a posição dos mesmos na pilha também têm sido investigados (Holmes, 1988). Uma fixação apropriada dos mesmos pode ser obtida com o emprego de silicone (Antti, 1992) ou espuma de poliuretano (Bramhall, 1974).

Keylwerth (1952) constatou que as temperaturas interna e superficial fornecem valiosas informações para a dedução do teor de

umidade médio da madeira. Baseado no fato que a temperatura interna da madeira é influenciada principalmente pelo seu teor de umidade, Tomaselli (1977) sugere a sua utilização como ferramenta para indicar quando a secagem deve ser concluída.

O emprego da temperatura interna para estimar o teor de umidade da madeira mostrou-se inicialmente viável para a secagem a alta temperatura (Keylwerth, Gaiser e Meichsner, 1955; Panow e Nester, 1984; Panow e Nester, 1985). Porém, Vermaas e Neville (1988), mesmo reconhecendo a necessidade de novas investigações, evidenciaram que o relacionamento entre as duas variáveis também é encontrado no processo de baixa temperatura. Neste caso, a mudança na temperatura interna em função da percentagem de alteração no teor de umidade da madeira é menor que na secagem sob alta temperatura, sendo necessários sensores com maior precisão e com proteção adequada contra a condução de calor na madeira.

No trabalho conduzido por Vermaas e Neville (1988), quando o teor de umidade foi plotado em função da temperatura superficial, os resultados foram semelhantes à relação teor de umidade/temperatura interna da madeira e pode, portanto, ser usada também para fins de controle. Verificaram os autores que a correlação entre o teor de umidade e a diferença entre temperatura do bulbo seco e temperatura interna apresentam possibilidades reais de aplicação no controle da estufa. Com a variação na temperatura do bulbo seco, que normalmente ocorre nas estufas comerciais, a relação entre as diferenças das temperaturas e o teor de umidade possivelmente seria mais útil para fins de controle da estufa, que a relação entre a temperatura absoluta e o teor de umidade.

Com base nas informações previamente mencionadas, o presente estudo teve como objetivo correlacionar a temperatura da madeira com o seu teor de umidade durante a secagem em uma estufa de convecção forçada, bem como

estabelecer ajustes de modelos de regressão, visando ao emprego desta variável como alternativa de controle do processo.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Madeira de *Pinus elliottii* Engelm. com 25 mm de espessura e 750 mm de comprimento foi submetida à secagem em uma estufa elétrica de convecção forçada, com capacidade para aproximadamente 1,0 m<sup>3</sup> de madeira serrada. As pilhas foram confeccionadas sobre um carrinho transportador, utilizando-se sarrafos de 25 x 25 mm para separação das peças.

A operação de secagem foi conduzida nas temperaturas de 50°, 70°, 90° e 110°C, por serem as mais comumente utilizadas pela indústria no processamento de madeira de *Pinus* sp. com espessura entre 25 e 50 mm. Para cada temperatura de secagem, foram utilizadas duas velocidades de ar, tendo os valores de 2,3 e 5,0 m/s sido obtidos ao modificar a área de passagem do ar dentro da pilha.

As condições da estufa foram controladas por meio do vapor produzido por uma caldeira elétrica e das aberturas de ventilação. Termômetros de bulbo seco e bulbo úmido possibilitaram a obtenção da temperatura e da umidade relativa do ar. O teor de umidade da madeira foi obtido pelas pesagens da pilha, utilizando-se uma célula de carga tipo tração.

As leituras de temperatura da madeira foram coletadas num ponto correspondente a ¼ da espessura de uma tábua localizada na primeira fileira da pilha. Sensores tipo diodo foram introduzidos a uma profundidade de aproximadamente 25 mm, em perfurações produzidas por brocas de 4 mm de diâmetro, no sentido da largura da peça e fixados com pasta de silicone.

O gerenciamento do processo de secagem da madeira foi realizado por um sistema computadorizado composto de três módulos: microcomputador com software residente específico, uma unidade de controle e aquisição

de dados e uma estufa. Todos os dados referentes ao controle do processo foram coletados em tempo real e gravados em disco rígido e flexível a cada 80 segundos, aproximadamente. O instrumental e a metodologia estatística utilizada encontram-se descritos em detalhes no trabalho de Santini (1996).

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As pesquisas sobre o emprego da temperatura da madeira como alternativa de controle do processo de secagem discutem com frequência o local onde a mesma deve ser medida. Algumas utilizaram a temperatura superficial, outros a temperatura no centro da peça e outros, ambas. Além dessas, alguns modelos incluíram a temperatura do bulbo seco e a diferença entre as temperaturas de bulbo seco e do centro da peça de madeira. No presente estudo, a temperatura interna da madeira de *Pinus elliottii* foi medida a 1/4 de sua espessura porque nos testes preliminares, conduzidos em estufa de laboratório, os valores coletados neste local se correlacionaram melhor com a umidade da madeira (Santini e Matos, 1995).

### 3.1. Temperatura da madeira na largura da pilha

Em todos os programas de secagem utilizados, a temperatura das tábuas localizadas na entrada de ar da pilha foi sempre maior que naquelas situadas na fileira de saída do ar. Essa diferença de temperatura, provavelmente, foi provocada pela queda da temperatura do ar através da pilha, analisada previamente por Santini e Tomaselli (1997) e pela abertura periódica das janelas de ventilação. A realização deste procedimento nas mudanças de fase do programa de secagem produziu, sistematicamente, uma diminuição brusca na temperatura das peças localizadas na última

fileira da pilha, aumentando, assim, a diferença entre os dois pontos medidos.

Com base nas observações de temperatura da madeira ao longo da largura da pilha, verificou-se que as medições realizadas na primeira fileira de tábuas foram as que melhor se correlacionaram com o teor de umidade.

### 3.2. Temperatura da madeira e teor de umidade

Uma análise da relação entre as duas variáveis mostrou um aumento da temperatura interna da madeira, a medida que diminuiu o seu teor de umidade. As curvas apresentadas na Figura 1, contudo, mostram que, em pelo menos uma das velocidades de ar utilizadas, ocorreu

uma diminuição da temperatura da madeira nos estágios finais da secagem a baixa temperatura (50° e 70°C) e convencional (90°C). De acordo com Kotok, Lowery e Jensen (1969), a causa do resfriamento da madeira quando a umidade cai abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF) é o calor de vaporização produzido por ocasião da evaporação da água superficial. Quedas de 1° e 2°C na temperatura interna, geralmente associadas a um súbito aumento da temperatura superficial, também foram detectadas por Panow e Nester (1984), que atribuíram o fato a um aumento da taxa de secagem próximo ao centro, à medida que o teor de umidade próximo a superfície cai abaixo do PSF.

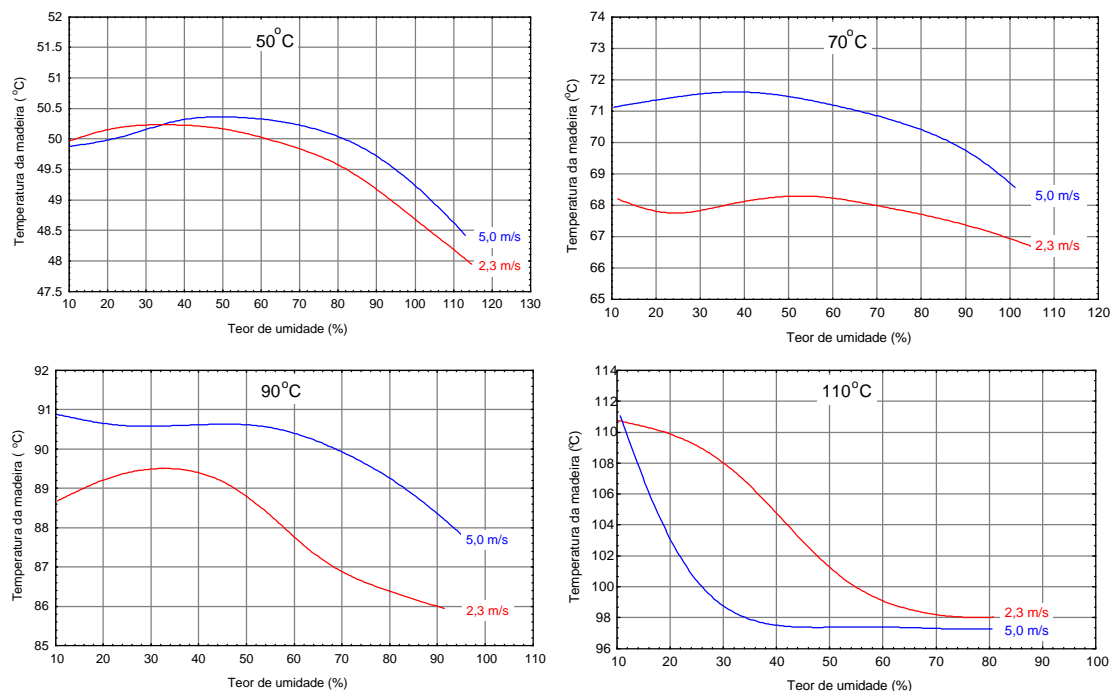


Figura 1. Relação entre teor de umidade e temperatura da madeira de *Pinus elliottii*, para quatro temperaturas de secagem e duas velocidades de ar.

Figure 1. Relationship between moisture content and wood temperature of the *Pinus elliottii* boards, for four drying temperatures and two air velocities.

No caso da secagem a alta temperatura, a Figura 1 mostra uma relação bem mais clara entre temperatura da madeira e teor de umidade, evidenciando que a primeira tende a se igualar à temperatura ambiente (tbs), à medida que o teor de umidade se aproxima de 10%, que foi o valor estabelecido para a finalização do processo. A excelente correlação entre as duas variáveis é mostrada na Tabela 1, no qual coeficientes tão altos como 0,99 foram encontrados para a temperatura de 110°C. As estimativas dos parâmetros indicam também que, independente da velocidade de ar utilizada, a temperatura da madeira correlacionou-se muito bem com a sua umidade ( $R = 0,93$ ) durante a secagem conduzida a temperatura de 90°C (Tabela 1). Já para as temperaturas de 50° e 70°C, coeficientes ( $R$ ) entre 0,63 e 0,87 e os altos valores de  $S_{yx}$

encontrados evidenciaram uma baixa correlação entre as duas variáveis.

A maioria das pesquisas conduzidas sobre o assunto utilizou o processo a alta temperatura, embora Vermaas e Neville (1988) também tenham encontrado relacionamento entre as duas variáveis na secagem a baixa temperatura. Neste último, a mudança na temperatura interna em função da percentagem de alteração no teor de umidade da madeira é menor que na secagem a alta temperatura, o que, segundo os mesmos pesquisadores, requer sensores mais precisos e mais protegidos contra a condução de calor na madeira. Esta, provavelmente, seja a explicação para a opção dos pesquisadores pelo processo a alta temperatura e a razão da boa correlação entre temperatura da madeira e teor de umidade, anteriormente discutida.

Tabela 1. Coeficientes e estimativas dos parâmetros da correlação polinomial entre a temperatura da madeira e o teor de umidade para duas temperaturas de secagem e duas velocidades de ar.

Table 1. *Coefficients and estimated polynomial correlation parameters between wood temperature and moisture content for two drying temperatures and two air velocities.*

T °C	Coeficientes					R	$S_{yx}$	F
	$B_0$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$			
90a	85,85325	0,29625	-0,006697	0,000038	-	0,93	0,4930	4234**
90b	91,31299	-0,060822	0,001661	-0,000015	-	0,93	0,2997	2535**
110a	100,1824	1,371953	-0,056358	0,000753	-0,000003	0,99	0,5428	17171**
110b	135,6769	-2,976400	0,084300	-0,0010	0,00000449	0,99	0,5517	5086**

em que: T = temperatura de secagem; R = coeficiente de correlação;  $S_{yx}$  = erro padrão da estimativa; F - valor de F calculado; a = 2,3 m/s; b = 5,0 m/s.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

### 3.3. Velocidade do ar e relação entre temperatura da madeira/teor de umidade

A influência da velocidade do ar na temperatura da madeira baseia-se no fato de que o emprego de valores elevados resultam num aumento da transferência de calor para a madeira, aumentando sua temperatura (Salamon, 1969). Este fato foi observado nos processos de 50°, 70° e 90°C, em que a velocidade de 5,0 m/s manteve a temperatura da madeira mais elevada do que a velocidade de 2,3 m/s durante a maior parte da secagem (Figura 1)

Na secagem a alta temperatura, as curvas da temperatura interna em função do teor de umidade, com relação a velocidade de ar utilizada, apresentaram um comportamento diverso daquele verificado nos demais processos. A temperatura interna da madeira, submetida a uma velocidade de ar de 5,0 m/s, manteve-se sempre abaixo daquela observada para 2,3 m/s até o final da secagem, quando praticamente se igualaram (Figura 1). Embora a transferência de calor para a madeira ocorra mais rapidamente quando se utilizam velocidades de ar mais altas, constatou-se, no presente estudo, que o aumento

na taxa de secagem não foi acompanhado por aumento da temperatura interna da madeira, com relação ao seu teor de umidade. Este comportamento das curvas pode estar relacionado com a formação de gradientes lineares, não parabólicos, típicos de processos de secagem a alta temperatura.

A temperatura do bulbo úmido (tbu) também pode introduzir mudanças nos padrões de temperatura, principalmente porque a transferência de calor para a superfície da madeira torna-se maior a medida que aumenta a umidade do ar (Salamon, 1969). O efeito desta variável foi mais marcante nos processos de secagem convencional (70° e 90°C) e baixa temperatura (50°C), em que os valores da temperatura do bulbo úmido programados foram atingidos e mantidos dentro dos níveis desejáveis. Esta, provavelmente, seja a explicação para a obtenção de temperaturas internas mais elevadas nesses processos, quando a velocidade do ar de 5,0 m/s foi utilizada. Por outro lado, nos processos de secagem a temperaturas superiores a 100°C, a temperatura do bulbo úmido dificilmente alcança este patamar, de acordo com Simpson e Rosen

(1981) e a influência da umidade do ar na transferência de calor torna-se menos importante. Segundo esses autores, isto ocorre porque a pressão parcial de vapor máxima possível nesta situação é igual a uma atmosfera, e a pressão de vapor saturado acima do ponto de ebulição da água é maior do que uma atmosfera.

#### 3.4. Ajuste de modelos de regressão para estimativa do teor de umidade da madeira

Dentre os modelos de regressão testados para a faixa de umidade, desde verde até 10%, os que incluem a temperatura do bulbo úmido foram os que se ajustaram melhor ao conjunto de dados. Apesar do bom resultado encontrado para a temperatura de 50°C, a Tabela 2 mostra uma ligeira melhoria na precisão do modelo, à medida que a temperatura de secagem aumenta. O erro padrão da estimativa percentual de 8,8%, aliado aos altos coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e valor de F, evidencia que a equação obtida para a temperatura de 110°C e velocidade de ar de 5,0 m/s foi a mais precisa entre os quatro tratamentos analisados.

Tabela 2. Equações de regressão para estimativa do teor de umidade, com base na temperatura da madeira para quatro temperaturas de secagem e duas velocidades de ar.

Table 2. Regression equations to estimate moisture content of timber based on wood temperature for four drying temperatures and two air velocities.

T	Equação de Regressão	$R^2$	$S_{yx}$	$S_{yx}\%$	F
50 <sup>a</sup>	TU = 998,9981 - 21,9671X1 + 3,5086X2	0,96	5,7325	10,0	39041**
50b	TU = 1101,646 - 24,0140X1 + 3,6120X2	0,88	10,0860	18,9	11466**
70 <sup>a</sup>	TU = 1487,854 - 23,1350X1 + 2,3100X2	0,88	9,1978	16,3	8162**
70b	TU = 921,9982 - 14,1498X1 + 2,2062X2	0,90	8,0827	16,3	7518**
90 <sup>a</sup>	TU = 754,5310 - 9,4521X1 + 1,6005X2	0,92	5,8053	12,4	17863**
90b	TU = 1316,718 - 15,7470X1 + 1,9030X2	0,90	7,0514	13,3	6035**
110 <sup>a</sup>	TU = 2990,384 - 57,163X1 + 3,654X2 + 0,259X1 <sup>2</sup> - 0,017X2 <sup>2</sup>	0,95	5,7944	12,1	3217**
110b	TU = 1835,46 - 21,115X1 - 16,303X2 + 0,093X1 <sup>2</sup> + 0,105X2 <sup>2</sup>	0,95	4,7704	8,8	1070**

em que: T = temperatura de secagem (°C);  $R^2$  = coeficiente de determinação;  $S_{yx}$  = erro padrão da estimativa;  $S_{yx}\%$  = erro padrão da estimativa percentual; F = valor de F calculado; a = 2,3 m/s; b = 5,0 m/s; TU = teor de umidade da madeira (%); X1 = temperatura da madeira (°C); X2 = TBU (°C).

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Na tentativa de melhorar o ajuste dos modelos apresentados na Tabela 2, realizou-se

uma nova análise de regressão para o intervalo entre o PSF e 10% de umidade, cujos resultados

são mostrados na Tabela 3. Dentre as temperaturas de secagem analisadas, os modelos se ajustaram melhor sob temperaturas de 90° e 110°C, sendo que os maiores coeficientes de determinação ( $R^2$ ) foram encontrados para o processo a alta temperatura. O ajuste dos

modelos resultantes da análise de regressão múltipla para as temperaturas de 50 e 70°C foram muito fracos nas duas velocidades de ar consideradas, razão pela qual não são mencionados na Tabela 3.

Tabela 3. Equações de regressão para estimativa do teor de umidade com base na temperatura da madeira, para duas temperaturas de secagem e duas velocidades de ar, no intervalo entre o ponto de saturação das fibras e 10% de umidade.

Table 3. Regression equations to estimate moisture content based on wood temperature, for two drying temperatures and two air velocities, for the range from fiber saturation point to 10% of moisture.

T	Equação de regressão	N	$R^2$	$S_{yx}$	F
90a	$TU = -4273,59 + 101,06X1 - 3,320X2 - 0,583X1^2 + 0,031X2^2$	268	0,95	1,2266	1528**
90b	$TU = 12850,3 - 276,914X1 - 3,168X2 + 1,503X1^2 + 0,029X2^2$	200	0,93	1,6055	952**
110a	$TU = 1270,910 - 20,065X1 + 0,272X2 + 0,076X1^2 + 0,003X2^2$	239	0,95	1,3451	1155**
110b	$TU = 825,328 - 13,126X1 - 1,799X2 + 0,057X1^2 + 0,013X2^2$	149	0,97	0,9529	1348**

em que: T = temperatura de secagem (°C); N = número de observações;  $R^2$  = coeficiente de determinação;  $S_{yx}$  = erro padrão da estimativa; F = valor de F calculado; TU = teor de umidade da madeira (%); a = 2,3 m/s; b = 5,0 m/s; X1 = temperatura da madeira (°C); X2 = temperatura do bulbo úmido TBU (°C)

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

A comparação entre as Tabelas 2 e 3 evidencia que os modelos de regressão obtidos para a faixa de umidade entre o PSF e 10% se ajustaram melhor aos dados, particularmente para a temperatura de 110°C. A melhor correlação encontrada nesta faixa de umidade restrita pode estar associada a uma certa estabilidade dos dados no final do processo de secagem, quando as condições da câmara são mais uniforme, e ao calor de vaporização produzido por ocasião da evaporação da água superficial da madeira (Kotok, Lowery e Jensen, 1969), conforme mencionado anteriormente.

### 3.5. Considerações sobre a temperatura da madeira no controle do processo de secagem

A discussão a respeito dos parâmetros envolvidos no relacionamento entre temperatura da madeira e teor de umidade tem como principal objetivo a obtenção de informações que possam viabilizar o emprego da primeira como meio alternativo de controle do processo de secagem. Com base na análise dos resultados e nas principais pesquisas conduzidas sobre o

assunto, pode-se destacar alguns pontos importantes:

- A existência de uma estreita relação entre a temperatura da madeira e o seu teor de umidade, evidenciada por vários pesquisadores, foi confirmada experimentalmente no presente estudo, especialmente no processo de secagem a alta temperatura. A análise de regressão apresentou altos coeficientes de correlação ( $R$ ) para a temperatura de 110°C, em que também houve um bom ajuste dos modelos de regressão para as duas amplitudes de teor de umidade em que foram avaliadas. A análise dos resíduos, contudo, sugere cuidados com relação à confiabilidade dos modelos.

- Nos processos de secagem convencional ou baixa temperatura, a relação temperatura interna versus teor de umidade apresenta uma certa instabilidade, tanto em baixas como em altas velocidades de ar. A explicação para o fato, provavelmente, está relacionada com a pequena alteração na temperatura interna, em função da percentagem de alteração no teor de umidade da madeira, o que, segundo Vermaas e Neville

(1988), requer sensores mais precisos e que reflitam melhor a temperatura da madeira.

- As dúvidas com respeito ao local de medição da temperatura estão relacionadas aos gradientes de umidade e de temperatura, formados, principalmente, quando temperaturas superiores a 100°C são utilizadas e às dificuldades de colocação de sensores próximo à superfície da madeira. A opção pela medição a ¼ da espessura é apoiada na suposição de que o teor de umidade a esta profundidade corresponde ao valor médio para a seção transversal da madeira (Mackay, 1976; James, 1984; Wengert, 1992) e nos estudos conduzidos em estufa de convecção natural (Santini e Matos, 1995).

- O emprego da temperatura interna associada a outra variável também tem sido discutido por diversos pesquisadores. Para Keylwerth (1952), o final da secagem ocorre quando as temperaturas superficial e interna se igualam. A diferença entre a temperatura de bulbo seco e a temperatura interna da madeira, geralmente incluída em modelos matemáticos em que o teor de umidade é a variável dependente (Panow e Nester, 1985; Vermaas e Neville, 1988), também se apresenta como promissora. Segundo Jai e Hsiung (1996), esta diferença de temperatura pode ser utilizada para estimar o teor de umidade final, exceto em espécies susceptíveis a severas rachaduras internas.

A análise gráfica e estatística dos dados indica que a temperatura da madeira tende a se igualar à do ambiente (tbs), à medida que o teor de umidade se aproxima de 10%, que foi o valor estabelecido para a finalização do processo. Este fato, por si só, evidencia que a temperatura interna pode ser um indicativo confiável do final do processo, quando madeira de *Pinus elliottii* com 25 mm de espessura é submetida à secagem. Além disso, curvas de secagem elaboradas com base no modelo de regressão e do método de pesagem mostram muita semelhança entre si no final da secagem. Esta evidência sugere que a

temperatura interna da madeira é uma alternativa viável para indicar o final da secagem, especialmente nos processos que utilizam altas temperaturas.

Um aspecto positivo da temperatura da madeira para controle do processo de secagem é que os dados podem ser coletados de forma contínua, por meio de um sistema computadorizado de aquisição de dados, o que agiliza a tomada de decisão sobre o programa e o processo de secagem. A facilidade de medição da temperatura interna da madeira e da temperatura do bulbo úmido, bem como a obtenção de ambas em tempo real, são os pontos fortes.

#### 4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos no presente estudo, pôde-se concluir o seguinte:

a) dentre os processos utilizados, a melhor correlação entre temperatura da madeira e teor de umidade foi encontrada para a temperatura de 110°C (R=0,99), no período de secagem desde verde (>100%) até 10% de umidade;

b) na secagem com velocidade de ar de 5,0 m/s, a madeira apresentou, durante todo o processo, temperatura mais elevada que aquela obtida para 2,3 m/s, devido à maior transferência de calor. Comportamento inverso foi observado para a temperatura de 110°C devido, provavelmente, a gradientes parabólicos não lineares, típicos da secagem a alta temperatura;

c) no intervalo desde verde até 10% de umidade, os modelos de regressão múltipla que incluem a temperatura do bulbo úmido e a temperatura interna da madeira apresentaram um bom ajuste ao conjunto de dados analisados. Entretanto, na faixa de umidade entre o PSF e 10%, os modelos obtidos para as temperaturas de 90° e 110°C foram mais precisos;

d) a temperatura da madeira é um bom indicativo para finalização do processo de



secagem, principalmente quando altas temperaturas são utilizadas.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTTI, A.L. Microwave drying of hardwood: simultaneous measurements of pressure, temperature, and weight reduction. **For. Prod. J.**, Madison, v.42, n.6, p.49-54, June. 1992.
- BAI, G.L.; GARRAHAN, P. The temperature and moisture content in lumber during preheating and drying. **Wood Sci. Technol.**, New York, v.18, n.2, p.121-135, 1984.
- BEARD, J.N.; ROSEN, H.N.; ADESANYA, B.A. Temperature distribution in lumber during impingement drying. **Wood Sci. Technol.**, New York, v.19, n.3, p.277-286, 1985.
- BRAMHALL, G. Placing thermocouples in wood. **Wood Sci.**, Madison, v.7, n.2, p.137-139, Oct. 1974.
- FORRER, J.B. An electronic system for monitoring gradients of drying wood. **For. Prod. J.**, Madison, v.34, n.7/8, p.34-38, July/Aug. 1984.
- HOLMES, S. Sensor type and placement for measurement of internal temperature in dry kilns. **For. Prod. J.**, Madison, v.38, n.10, p.69-71, Oct. 1988.
- HOLMES, S.; FORRER, J. Lumber moisture content and temperature changes with kiln conditions. **For. Prod. J.**, Madison, v.39, n.4, p.67-70, Apr. 1989.
- JAI, S.Y.; HSIUNG, J.C. Relationships among the temperatures of lumber-center and kiln-air and moisture content changes during high-temperature kiln drying (2). **Bulletin of the Taiwan Forestry Research Institute**, Taipei, v.10, n.2, p.137-144, 1995. **For. Prod. Abstr.**, Farnham Royal, v.19, n.2, p.73, 1996. Ref. 664. Resumo.
- JAMES, W.L. *et al.* Moisture levels and gradients in commercial softwood dimension lumber shortly after kiln-drying. **For. Prod. J.**, Madison, v.34, n.11/12, p.59-64, Nov/Dec. 1984.
- KEYLWERTH, R. Der verlauf der holztemperatur während der Furnier und schnittholztrocknung. **Holz Roh-Werkstoff**, Berlin, v.10, n.3, p.87-91, Marz. 1952.
- KEYLWERTH, R.; GAISER, H.; MEICHSNER, H. Untersuchungen an einer Heissdampftrockenanlage. **Holz Roh-Werkstoff**, Berlin, v.13, n.1, p.5-20, Jan. 1955.
- KEYLWERTH, R.; NOACK, D. Über den Einfluß höherer Temperaturen auf die elektrische Holzfeuchtigkeitsmessung nach dem Widerstandsprinzip. **Holz Roh-Werkstoff**, Berlin, v.14, n.5, p.162-172, Mai. 1956.
- KOTOK, E.S.; LOWERY, D.P.; JENSEN, C.E. Surface temperature as an indicator of wood moisture content during drying. **For. Prod. J.**, Madison, v.19, n.9, p.80-82, Sept. 1969.
- MACKAY, J.F.G. Effect of moisture gradients on the accuracy of power-loss moisture meters. **For. Prod. J.**, Madison, v.26, n.3, p.49-52, Mar. 1976.
- MALMQUIST, L.; MEICHSNER, H. On heat transfer in the convection drying of wood in superheated steam. **Holz Roh-Werkstoff**, Berlin, v.22, n.3, p.95-106, 1964. **For. Abstr.**, Farnham Royal, v.26, n.1, p.156, Jan. 1965. Ref. 1428. Resumo.
- NEVILLE, C.J.; VERMAAS, H.F. Laboratory kiln for the development of low temperature wood drying schedules. **Holz Roh-Werkstoff**, Berlin, v.46, n.7, p.269-273, Juli 1988.
- PANOW, S.; NESTER, M.R. Some moisture content/temperature/time relationships for individual timber specimens during high temperature drying. **Research Note**, n.39, p.1-10, 1984.
- PANOW, S.; NESTER, M.R. Drying and point determination during high-temperature drying. **For. Prod. J.**, Madison, v.35, n.10, p.51-55, Oct. 1985.
- SALAMON, M. High-temperature drying on its effect on wood properties. **For. Prod. J.**, Madison, v.19, n.3, p.27-34, Mar. 1969.
- SANTINI, E.J. **Alternativas para monitoramento e controle do processo de secagem de madeira serrada em estufa**. Curitiba: UFPR, 1996. 198p. (Tese - Doutorado em Ciências Florestais).
- SANTINI, E.J.; MATOS, J.L.M. Relação entre resistência elétrica, temperatura e teor de umidade para madeira de *Pinus elliottii* E. submetida à diferentes temperaturas de secagem: resultados preliminares. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.1, n.5, p.139-154, nov. 1995.
- SANTINI, E.J.; TOMASELLI, I. Uso da queda da temperatura na passagem pela pilha como instrumento de controle do processo de secagem de madeiras. **Revista Árvore**, Viçosa, v.21, n.2, p.269-277, abr./jun. 1997.

---

SIMPSON, W.T.; ROSEN, H.N. Equilibrium moisture content of wood at high temperatures. **Wood Fiber**, Lawrence, Kansas, v.13, n.3, p.150-158, July 1981.

TOMASELLI, I. **The influence of high-temperature drying on some physical and mechanical properties of *Pinus radiata* D. Don.** Melbourne: University of Melbourne, 1977. 264p. (Thesis - Doctor of Philosophy).

VERMAAS, H.F.; NEVILLE, C.J. Low temperature drying of *Eucalyptus grandis*. A preliminary laboratory evaluation. **Holzforschung**, Berlin, v.42, n.4, p.265-271, Aug. 1988.

WENGERT, E.M. Technology helps pinpoint lumber moisture content. **For. Ind.**, San Francisco, CA, v.119, n.3, p.19-20, May/June 1992.