

AValiação DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* POR MEDIDORES ELÉTRICOS RESISTIVOS¹

Fred Willians CALONEGO²
Wagner Roberto BATISTA³
Elias Taylor Durgante SEVERO⁴
João Eduardo Guarnetti dos SANTOS⁵
Clovis RIBAS⁶

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo verificar a precisão de dois tipos de medidores elétricos de teor de umidade durante o processo de secagem da madeira de *Eucalyptus grandis*. Foram retiradas amostras representativas de 14 tábuas de *Eucalyptus grandis* e secas em estufa elétrica a 40 °C de temperatura, até que o material atingisse 10% de umidade. Durante a secagem foram determinados, periodicamente, o teor de umidade através do método de massas correntes e de verificações simultâneas com um medidor elétrico portátil (EMM) e com o sistema de controle de um secador convencional (KCS). Os resultados mostraram que: (1) o sensor de umidade KCS pode substituir o método gravimétrico durante a secagem da madeira; (2) o medidor do teor de umidade EMM subestima os reais teores de umidade durante a secagem da madeira e não é indicado para substituir o método gravimétrico de determinação de umidade.

Palavras-chave: secagem da madeira; medidores elétricos de umidade; teor de umidade da madeira; *Eucalyptus grandis*.

ABSTRACT

The aim of the study was to evaluate the precision of two types of electric moisture meters during the drying process of *Eucalyptus grandis* boards. Samples were obtained from 14 boards of *Eucalyptus grandis* and they were dried in electric laboratory oven at 40 °C of temperature, until the wood achieve 10% of moisture content. During the drying, the moisture content was determined by gravimetric method and simultaneous checks by an electric moisture meter (EMM) and by kiln control system (KCS). The results showed that: (1) the KCS can replace the gravimetric method during the wood drying; (2) the EMM underestimate the real moisture content during the drying of boards and it is not indicate as substitute of the gravimetric method.

Key words: drying wood; electric moisture meters; moisture content; *Eucalyptus grandis*.

1 INTRODUÇÃO

Existem vários métodos para verificar o teor de umidade das madeiras, alguns são precisos, porém, não são imediatos, outros permitem a obtenção de uma rápida resposta, mas apresentam precisão contestada pela literatura.

Desta forma, entender como a água se encontra na madeira, estudar sua influência nas propriedades físicas e elétricas do material e comparar as técnicas atuais de determinação do teor de umidade são importantes para a escolha do melhor método para cada situação.

(1) Aceito para publicação em setembro de 2006.

(2) Universidade Estadual Paulista, Departamento de Recursos Naturais, Fazenda Lageado, s/n, Caixa Postal 237, 18603-970, Botucatu, SP, Brasil. E-mail: fwcalonego@ig.com.br

(3) Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Rural, Fazenda Lageado, s/n, Caixa Postal 237, 18603-970, Botucatu, SP, Brasil. E-mail: wrbatista@fca.unesp.br

(4) Universidade Estadual Paulista, Departamento de Recursos Naturais, Fazenda Lageado, s/n, Caixa Postal 237, 18603-970, Botucatu, SP, Brasil. E-mail: severo@fca.unesp.br

(5) Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Bauru, s/n, 17033-360, Bauru, SP, Brasil. E-mail: guarneti@feb.unesp.br

(6) Instituto Florestal, Caixa Postal 1322, 01059-970, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: clovisr@iflorestal.sp.gov.br

Os tipos de água existentes na madeira são freqüentemente classificados da seguinte forma: (1) água livre ou capilar: aquela localizada nos lumes celulares e nos espaços intercelulares e (2) água higroscópica ou de impregnação: aquela que se encontra adsorvida pelas paredes celulares, principalmente pela celulose e hemiceluloses que constituem a maior parte da substância madeira (Kollmann & Côte Jr., 1968; Cech & Pfaff, 1977; Simpson, 1991; Haygreen & Bowyer, 1996; Forest Products Laboratory, 1999).

O teor de umidade referente ao estado em que, teoricamente, apenas as paredes celulares estão saturadas e os lumes e os espaços intercelulares estão sem o líquido é denominado ponto de saturação das fibras (PSF). Abaixo do PSF ocorrem alterações significativas na resistência mecânica, nas propriedades físicas e nas propriedades elétricas da madeira (Galvão & Jankowsky, 1988; Skaar, 1988; Simpson, 1991; Haygreen & Bowyer, 1996; Santini, 1996).

Simpson (1991) afirma que o PSF para as espécies em geral situa-se em torno de 30%. Kollmann & Côte Jr. (1968) citam que o PSF varia desde 22 a 24% para as coníferas com alto teor de resina e para as folhosas com cerne distinto e porosidade em anel circular; de até 32 a 35% para as folhosas com porosidade difusa, cerne indistinto, alburno com porosidade em anel circular, e para as folhosas com cerne distinto e porosidade em anel semicircular.

O método mais simples e preciso de determinação do teor de umidade da madeira é o método gravimétrico, porém, o mesmo apresenta como desvantagem o fato de ser destrutivo, de exigir muito tempo para obter-se a resposta e ser inviável para espécies com componentes voláteis. A umidade também pode ser determinada por meio de medidores elétricos que são menos precisos, porém proporcionam resposta imediata (Forrer, 1984; Ponce & Watai, 1985; Skaar, 1988; Simpson, 1991; Haygreen & Bowyer, 1996; Forest Products Laboratory, 1999).

Forrer (1984), Skaar (1988), Simpson (1991) e Forest Products Laboratory (1999) afirmam que os medidores elétricos são de dois tipos: (1) medidores tipo resistência: que medem essencialmente a resistência ao fluxo de corrente elétrica direta na madeira entre dois eletrodos e (2) medidores dielétricos: que medem a constante dielétrica ou a permissividade elétrica da madeira através do uso de corrente alternada.

Os medidores normalmente utilizados para medir o teor de umidade da madeira são os do tipo resistência. A resistividade elétrica da madeira varia com o teor de umidade, especialmente abaixo do PSF. A resistividade varia de 10^{14} a 10^{16} Ω .m para madeira seca e de 10^3 a 10^4 Ω .m para madeira no PSF (Skaar, 1988; Haygreen & Bowyer, 1996; Forest Products Laboratory, 1999).

Galina (1997), estudando a variação da resistência elétrica em função dos teores de umidade de várias espécies de madeira, observou que a perda de sensibilidade dos medidores elétricos ocorre acima do PSF das madeiras e este varia de 19 a 40%.

Segundo Ponce & Watai (1985), James (1988) e Haygreen & Bowyer (1996) os medidores elétricos de resistência são geralmente mais confiáveis para avaliar teores de umidade de 6 a 30%. Com o aumento do teor de umidade, a partir do PSF até a completa saturação da estrutura da madeira, a diminuição da resistividade elétrica é menor e sua determinação incorre em erros (Galina, 1997; Forest Products Laboratory, 1999).

Para melhorar a exatidão das determinações do teor de umidade da madeira através da sua resistência elétrica é necessário que o aparelho seja manufaturado de forma a medir os baixos valores de resistência e de levar em consideração a formação de gradientes de umidade (Galina, 1997).

Os medidores elétricos permitem verificar o teor de umidade na área imediatamente em contato com as agulhas do eletrodo, porém, este sistema é adequado apenas para amostras que não apresentem gradiente de umidade (James, 1988).

Entretanto, a resistência elétrica da madeira pode variar com a espécie, com a direção da grã, com a temperatura e com a profundidade de acomodação dos eletrodos.

Skaar (1988) afirma que a presença de íons é mais importante para os medidores resistivos do que a massa específica da madeira. Na madeira, os extrativos não solúveis em água são redutores da condutividade elétrica e os extrativos solúveis em água são ótimos condutores, pois contém complexos que incluem eletrólitos responsáveis pelo aumento da condutividade.

Galina (1997) concluiu que não existe correlação entre a massa específica básica e a resistividade elétrica das madeiras, e que estas se agrupam pelas diferenças químicas que apresentam e não pela massa específica e, portanto, o atual fator de correção utilizado pelos medidores elétricos de umidade para as espécies baseado na diferença de massa específica está equivocado.

Os medidores elétricos do tipo resistivo apresentam, normalmente, três ou mais escalas para corrigir o teor de umidade em função de um grupamento de espécies, e o aumento do número mínimo destas escalas exige circuitos processadores com maior capacidade, sendo inviável para medidores portáteis. Entretanto, os sistemas de aquisição de dados baseados em microcomputadores permitem a aplicação de uma equação que transforma a medida de resistência elétrica em teor de umidade para cada espécie (Galina, 1997).

Para Lignomat (2005), os sensores de determinação do teor de umidade da madeira incluídos no “Kiln Control System (KCS)” têm sua capacidade de mensuração, com precisão, mantida devido à calibração e ao ajuste automático de cada medida, baseada na equação de umidade em função da resistência elétrica específica de cada espécie de madeira.

A determinação precisa e imediata do teor de umidade durante o processo de secagem da madeira é imprescindível para a obtenção de produtos com qualidade e com menores perdas de matéria-prima, com grande vantagem econômica.

Assim, o objetivo do presente estudo foi verificar a precisão de dois tipos de medidores elétricos de teor de umidade durante o processo de secagem da madeira de *Eucalyptus grandis*.

2 METODOLOGIA

Foram estudadas 14 (quatorze) tábuas de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden desdobrados pelo sistema de corte tangencial.

O material coletado foi proveniente da Floresta Estadual de Santa Bárbara e foi desdobrado no Horto Florestal de Manduri, ambos pertencente ao Instituto Florestal – Seção de Manduri – SP.

As tábuas apresentavam espessura de 28 mm e largura de 24 cm e sofreram cortes para a obtenção das amostras, conforme esquema da FIGURA 1.

Logo após o corte, as subamostras (SA) e a amostra teste (AT) foram pesadas, visando à determinação da massa úmida inicial (M_U). Os topos das amostras testes receberam uma camada de adesivo à base de PVA, visando restringir a saída de água pelas faces longitudinais e, conseqüentemente, impedir o surgimento de um gradiente de umidade na direção do comprimento das peças.

Posteriormente, as “AT” foram mantidas em estufa a 40 °C de temperatura até atingirem 10% de teor de umidade. Os teores de umidade foram determinados pelo método gravimétrico através de uma balança de precisão de 0,1 g e também por medidores elétricos.

As subamostras foram submetidas à secagem completa em estufa a 103 ± 2 °C de temperatura, até massa constante, obtendo-se a massa seca (M_S).

Com base na M_U e M_S , determinou-se o teor de umidade inicial das subamostras, através do uso da equação (1):

$$U = \left[\frac{M_{USA} - M_{SSA}}{M_{SSA}} \right] * 100 \quad (1),$$

em que:

$U\%$ – teor de umidade das subamostras, %;

M_{USA} – massa úmida das subamostras, g, e

M_{SSA} – massa seca em estufa a 103 ± 2 °C até massa constante, g.

Como as sub-amostras e a amostra teste foram pareadas, considerou-se a umidade inicial da “AT” igual à média das umidades iniciais das “SA” correspondentes, conforme metodologia proposta por Rasmussen (1961).

A partir dos valores de M_U da “AT” e de U das “SA”, foi estimada a massa seca das “AT”, de acordo com a equação (2):

$$M_{SE} = \frac{M_U * 100}{(100 + U)} \quad (2),$$

em que:

M_{SE} – massa seca estimada da amostra teste, g;

M_U – massa úmida da amostra teste, g, e;

U – teor de umidade inicial médio das subamostras, %.

Com o auxílio da massa seca estimada permitiu-se o acompanhamento e o encerramento do experimento no teor de umidade final desejado.

A curva de secagem da madeira de *Eucalyptus grandis* foi obtida por meio da determinação do teor de umidade referente às massas úmidas corrente das amostras teste e, simultaneamente, através de medidores elétricos do tipo resistivo.

Os medidores elétricos utilizados para inferir sobre a umidade da madeira foram: (1) Medidor Elétrico de Umidade Portátil (EMM); (2) Sistema de Controle de Secador Convencional (KCS).

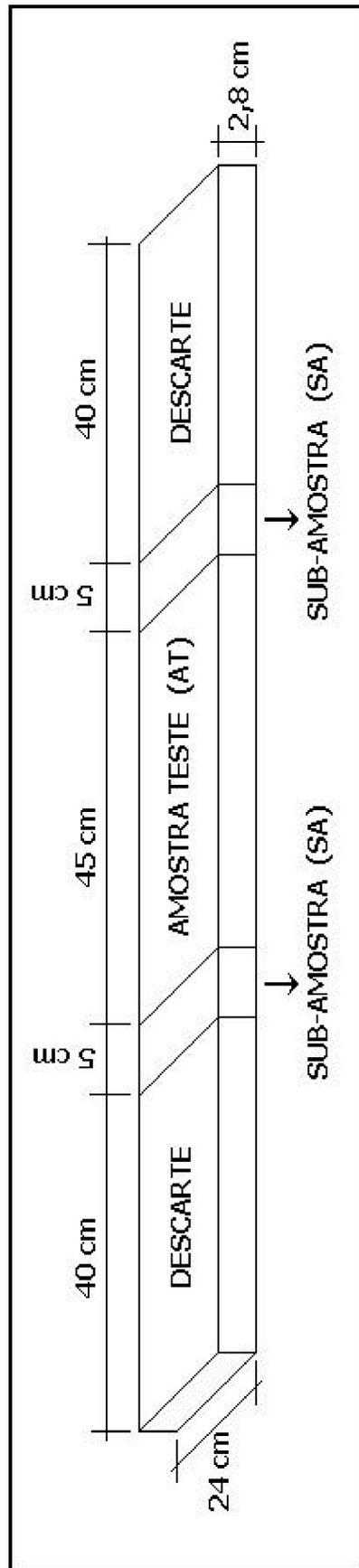


FIGURA 1 – Esquema de obtenção das amostras para a verificação do teor de umidade durante o processo de secagem.

No caso do EMM, para propiciar a passagem da corrente elétrica no interior das amostras de madeira introduziu-se o eletrodo com 4 (quatro) agulhas de modo que cada pólo ficasse paralelo à grã da madeira. Posteriormente, fez-se a medição da umidade da madeira com a chave seletora da espécie de madeira na posição 2, adequada, segundo o fabricante do aparelho, para o eucalipto.

Como o EMM está calibrado para fazer leituras a 20 °C de temperatura, a compensação para a variação da temperatura da madeira teve como base a equação para correção da umidade em função da temperatura, determinada por Samuelsson (1992).

Para o KCS foram introduzidos, em furos produzidos com o auxílio de uma broca, “probes” de aço inox no centro da amostra (em relação à espessura) mantendo 3 cm de distância entre eles na direção paralela à grã. Posteriormente, fez-se a leitura da umidade da madeira no monitor do computador que contém o software específico, calibrado com os coeficientes “a” e “b” da curva característica de secagem de *Eucalyptus grandis*, fornecida pelo fabricante, e capaz de corrigir automaticamente a umidade em função da temperatura da madeira.

Ao atingir um teor de umidade de 10%, os sensores foram retirados das amostras teste e estas foram secas a 103 ± 2 °C até massa constante para a determinação da massa seca real.

As “probes” foram pesadas para corrigir os valores da massa úmida corrente, a qual, com a massa seca real, permitiu calcular o teor de umidade real das amostras teste ao longo do ensaio, através da equação (3):

$$U_C = \left[\frac{M_{UC} - M_S}{M_S} \right] * 100 \quad (3),$$

em que:

U_C – teor de umidade corrente das amostras teste, %;

M_{UC} – massa úmida corrente corrigida das amostras teste, g, e

M_S – massa seca real das amostras teste, g.

Para a avaliação dos dados foi realizada uma análise de regressão linear simples em função da tendência dos pares de dados: (1) teor de umidade pelo KCS em função do teor de umidade obtido pelo método gravimétrico e (2) teor de umidade pelo EMM em função do teor de umidade obtido pelo método gravimétrico.

Em ambas as comparações optou-se pela escolha de um modelo linear crescente ($Y = a + bX$).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o processo de secagem da madeira de *E. grandis*, em estufa elétrica a 40 °C de temperatura, determinou-se, em intervalos periódicos de tempo, os teores de umidade pelos medidores elétricos resistivos (KCS e EMM) e através das verificações das massas correntes das amostras.

Através da FIGURA 2, pode-se verificar o comportamento da curva de secagem da madeira em estudo através do método gravimétrico e também pelos medidores elétricos resistivos KCS e EMM.

Na FIGURA 3, pode-se observar o modelo proposto para o teor de umidade determinado pelo sensor KCS em função do teor de umidade real e também o modelo proposto para o teor de umidade determinado pelo EMM em função do teor de umidade real determinado pelo método gravimétrico.

Para o KCS, o modelo ajustado apresentou coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,59, erro padrão da estimativa (S_{yx}) igual a 10,52 e p-valor igual a $2,51758E^{-44}$, indicando que o mesmo é adequado para estimar o teor de umidade da madeira determinado pelo KCS em função do teor de umidade determinado pelo método gravimétrico. Os coeficientes do modelo de regressão “a” igual a 2,6946 e “b” igual a 0,9029 mostraram-se altamente significativos, justificando suas presenças no modelo.

Verifica-se através da dispersão dos erros e dos intervalos de confiança e de previsão que o modelo ajustado representa o fenômeno e que os intervalos de confiança dos parâmetros iguais a $0,8024 < \beta < 1,0034$ e $-0,3010 < \alpha < 5,6895$ mostram, respectivamente, que a reta que representa os pontos possui inclinação de 45° e passa pela origem. Assim, fica constatado que o método tradicional de determinação de teor de umidade, baseado nas massas correntes das amostras, pode ser substituído pela determinação da umidade da madeira através dos sensores do KCS.

Esse resultado era esperado, pois esse sistema é baseado em microcomputador, que possibilita a aplicação de uma equação de ajuste da umidade em função da resistência elétrica específica para cada espécie de madeira. Galina (1997) e Lignomat (2005) explicaram que a boa precisão desse sistema está associada à calibração e ao ajuste automático de cada medida baseada na referida equação de ajuste.

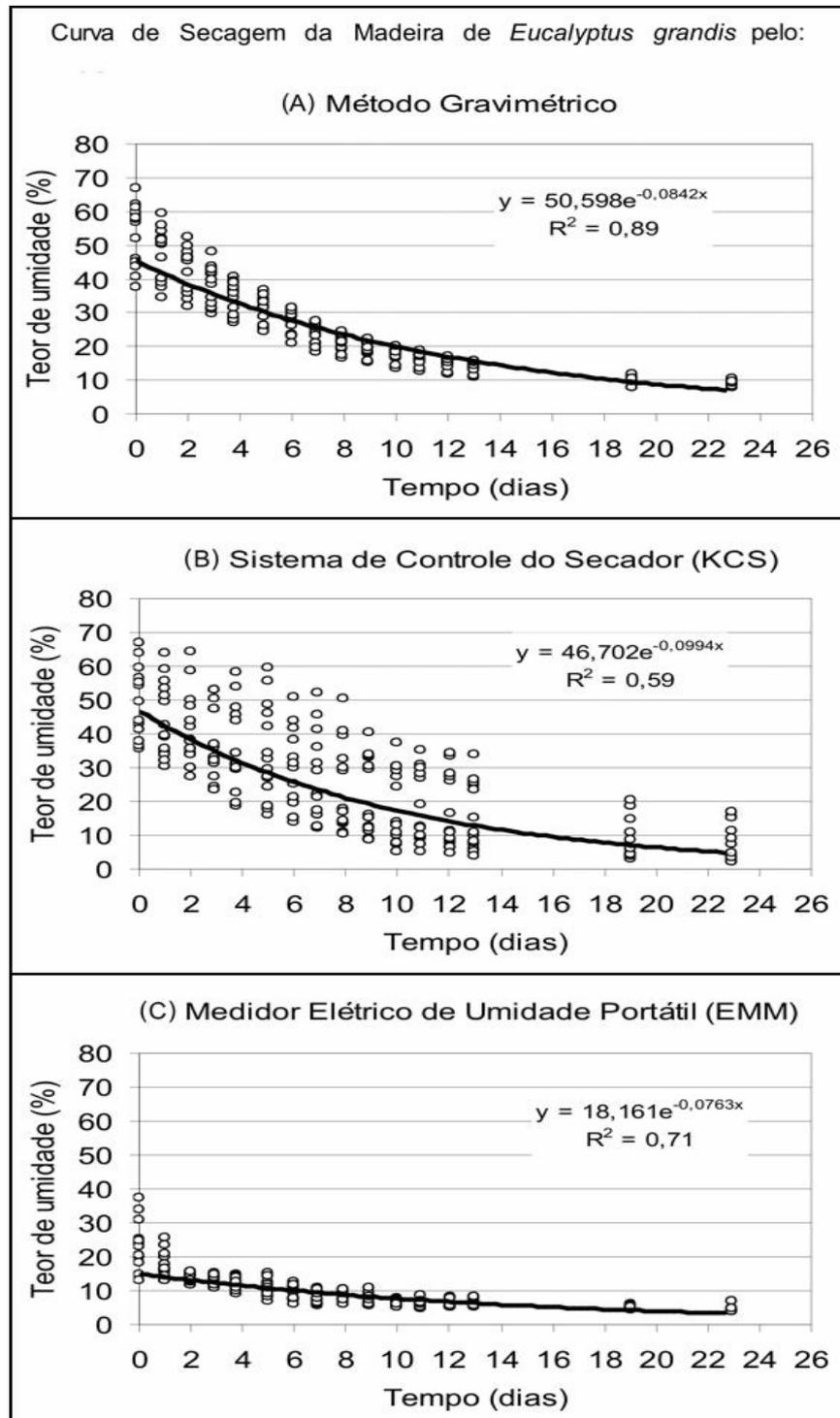


FIGURA 2 – Regressão exponencial ajustada para estimar a curva de secagem da madeira de *Eucalyptus grandis* pelo método gravimétrico e por medidores elétricos resistivos.

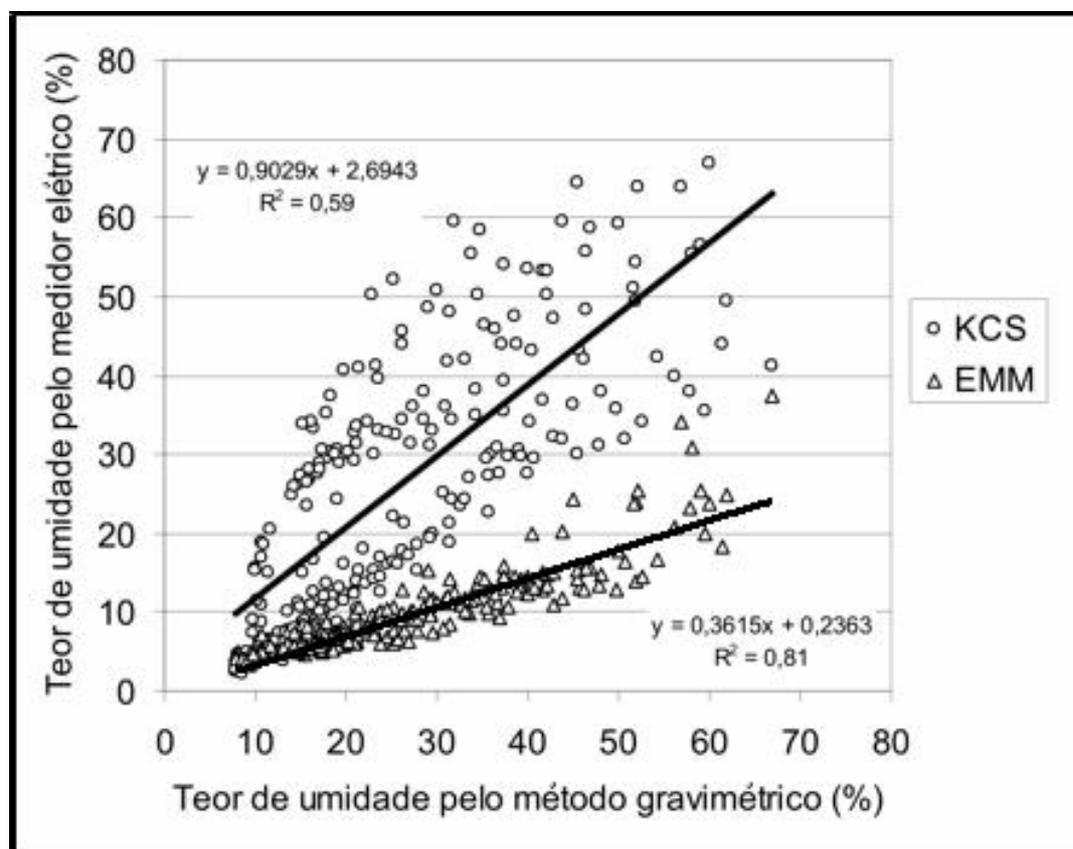


FIGURA 3 – Regressões lineares crescentes ajustadas para estimar os teores de umidade da madeira de *Eucalyptus grandis* determinados pelos medidores elétricos resistivos (EMM e KCS) em função do real teor de umidade determinado pelo método gravimétrico.

Para o EMM, o modelo ajustado apresentou coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,81, erro padrão da estimativa (S_{yx}) igual a 2,39 e p-valor igual a $5,22039E^{-83}$, indicando que o mesmo é adequado para estimar o teor de umidade da madeira determinado pelo EMM em função do teor de umidade determinado pela massa corrente das amostras. Os coeficientes do modelo de regressão “a” igual a 0,2363 e “b” igual a 0,3615 mostraram-se altamente significativos, justificando suas presenças no modelo.

Embora o “ R^2 ” seja maior do que na comparação anterior e que as dispersões dos erros e os intervalos de confiança e de previsão mostrem que o modelo ajustado representa o fenômeno, verifica-se que os intervalos de confiança dos parâmetros são iguais a $0,3387 < \beta < 0,3844$ e $-0,4452 < \alpha < 0,9178$, e, conseqüentemente, a reta que representa os pontos não possui inclinação de 45°.

Assim, fica constatado que o medidor elétrico portátil não pode substituir o método gravimétrico de determinação de umidade durante o processo de secagem da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Esse resultado era esperado, pois o teor de umidade determinado por esse sistema representa o teor de umidade da amostra se as agulhas dos eletrodos forem cravadas a 1/3 da profundidade em relação à espessura da tábua, operação esta dificultada com o sistema de cravação das agulhas sem martelo.

Como a determinação do teor de umidade no presente estudo foi realizada em madeira durante o processo de secagem, o que invariavelmente promove o surgimento de um gradiente de umidade, também se pode explicar a baixa precisão do EMM nas condições do estudo. Segundo James (1988), as agulhas fornecidas nos medidores elétricos portáteis não são adequadas para peças que apresentem gradiente de umidade.

A pouca precisão do EMM quando comparado com o método tradicional de determinação do teor de umidade, também, pode ser atribuída ao sistema operacional do aparelho, baseado na variação da massa específica das madeiras. Isso ocorre devido à presença de íons ser mais importante do que a massa específica da madeira para os medidores resistivos, pois as madeiras se agrupam pelas diferenças químicas que apresentam e não pela massa específica (Skaar, 1988; Galina, 1997).

Os resultados obtidos mostraram que o sensor de umidade KCS pode substituir o método tradicional de determinação de umidade durante o processo de secagem da madeira de *Eucalyptus grandis* e que o EMM não foi adequado para o acompanhamento do teor de umidade durante o processo de secagem da espécie estudada.

4 CONCLUSÕES

A determinação do teor de umidade da madeira com medidores elétricos resistivos durante a secagem de *Eucalyptus grandis* permitiu as seguintes conclusões:

- o sensor de determinação do teor de umidade do sistema de controle de secador convencional pode substituir o método gravimétrico durante o processo de secagem da madeira, e
- o medidor elétrico portátil subestima os teores de umidades reais durante o processo de secagem e não é indicado para substituir o método tradicional de determinação do teor de umidade da madeira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook** - wood as an engineering material. Washington, D.C.: United States Department of Agriculture, 1999. 463 p.

FORRER, J. B. An electronic system for monitoring gradients of drying wood. **Forest Products Journal**, Madison, v. 34, n. 7/8, p. 34-44, 1984.

GALINA, I. C. M. **Variação da resistência elétrica em madeiras visando o grupamento de espécies**. 1997. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciências/Ciência e Tecnologia de Madeiras) - Escola Superior de Agronomia "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1988. 111 p.

HAYGREEN, J. G.; BOWYER, J. L. **Forest products and wood science: an introduction**. Iowa: Iowa State University Press: AMES, 1996. 484 p.

JAMES, W. L. **Electric moisture meters for wood**. Madison: United States Department of Agriculture - USDA, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1988. 17 p. (USDA General Technical Report FPL-GTR, 6).

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

LIGNOMAT. **Wireless probes revolutionize moisture measurement when drying wood**. Disponível em: <<http://www.lignomatusa.com/wireless.htm#Technical%20Specifications>>. Acesso em: 19 mar. 2005.

PONCE, R. H.; WATAI, L. T. **Secagem da madeira**. Brasília, D.F.: STI/IPT, 1985. 70 p.

RASMUSSEM, E. F. **Dry kiln operator's manual**. Madison: United States Department of Agriculture - USDA, 1961. 188 p.

SAMUELSSON, A. Calibration curves for resistance: type moisture meters. In: IUFRO INTERNATIONAL WOOD DRYING CONFERENCE, 3., Vienna, 1992. **Proceedings...** Vienna: IUFRO Wood Drying Working Party, 1992. p. 405-408.

SANTINI, E. J. **Alternativas para o monitoramento e controle do processo de secagem de madeira serrada em estufa**. 1996. 198 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal/Setor de Ciências Agrárias) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SIMPSON, W. T. **Dry kiln operator's manual**. Madison: United States Department of Agriculture - USDA, 1991. 274 p.

SKAAR, C. **Wood-water relations**. New York: Springer-Verlag, 1988. 283 p.