

**CALIBRAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO TDR (Reflectometria por Domínio do Tempo) PARA A DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DA MADEIRA DE *Grevillea robusta* (Cunn.)**

WAGNER ROBERTO BATISTA<sup>1</sup>; JOÃO EDUARDO GUARNETTI DOS SANTOS<sup>2</sup>; ELIAS TAYLOR DURGANTE SEVERO<sup>3</sup> & ANTONIO EVALDO KLAR<sup>4</sup>

---

**RESUMO:** Este estudo teve como objetivo estabelecer um modelo de calibração de um equipamento TDR para a determinação da umidade da madeira de *Grevillea robusta* (Cunn.). Para tanto, selecionou-se aleatoriamente 11 tábuas de *Grevillea robusta* (Cunn.), as quais foram secas em estufa elétrica regulada à 40°C de temperatura. Durante o processo de secagem, a umidade foi determinada, periodicamente e sistematicamente pelos métodos gravimétrico e TDR. Pelo método gravimétrico os teores de umidades variaram de 125,88% a 6,62% enquanto que pelo método TDR, obteve-se uma variação de 119,83% a 5,79%. O modelo que melhor se ajustou a umidade da madeira em função de sua constante dielétrica relativa, empregada pela técnica, foi o exponencial  $U = 132,72 - 140,27 \cdot e^{\frac{-K}{50,20}}$ , com um  $R^2 = 0,96$ , com índice de confiança ou desempenho de 0,97 sendo classificado como ótimo, segundo Camargo e Sentelhas (1997). A correlação entre o método gravimétrico, tido como referência, e a TDR demonstrou equivalência entre as duas metodologias. Desta forma, conclui-se que a técnica TDR pode ser empregada para a determinação da umidade da madeira de *Grevillea robusta* (Cunn.), de forma precisa e rápida, uma vez estabelecida sua calibração.

**Palavras-chave:** Umidade da madeira, reflectometria por domínio do tempo (TDR), *Grevillea robusta* (Cunn.).

---

<sup>1</sup> Extraído da Tese de Doutorado do primeiro autor. Departamento de Física Aplicada, Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, CEP: 38064-200  
E-mail: [wrbatista@icte.ufbm.edu.br](mailto:wrbatista@icte.ufbm.edu.br)

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, SP, CEP: 17033-360 - E-mail: [guarneti@feb.unesp.br](mailto:guarneti@feb.unesp.br)

<sup>3</sup> Departamento de Ciências Florestais, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, CEP: 18603-970 - E-mail: [severo@fca.unesp.br](mailto:severo@fca.unesp.br)

<sup>4</sup> Departamento de Engenharia Rural, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, CEP: 18603-970 - E-mail: [aeklar@pq.cnpq.br](mailto:aeklar@pq.cnpq.br)

## CALIBRATION OF A TDR EQUIPMENT (TIME DOMAIN REFLECTOMETRY) TO DETERMINE WOOD MOISTURE *Grevillea robusta* (Cunn.).

**SUMMARY:** *This study aimed to establish a calibration model of a TDR equipment to determine the wood moisture of Grevillea robusta (Cunn.). It was selected alleatory, 11 logs of Grevillea robusta (Cunn.), it was dried in a regulate electric greenhouse at 40°C. During the dry process, the moisture was determinate, periodically and systematically by gravimetric and TDR methods. Through the gravimetric method, moisture vary from 125,88% to 6,62% while the TDR method, the variation was from 119,83% to 5,79%. The best model adjusted to the wood moisture in the determination of the function of relative dielectric constant, using this technique, was the exponential  $U = 132,72 - 140,27 \cdot e^{\frac{-K}{50,20}}$ , with a  $R^2 = 0,96$ , with indicator of trust or performance 0,97 they were classified as very good, according to Camargo and Sentelhas (1997). The correlation between the gravimetric method (reference) and TDR, showed to be equivalent for both methodologies. It was concluded that the TDR can be used to the determination of wood moisture of Grevillea robusta (Cunn.), in a precise and fast way, once it was established its calibration.*

**Keywords:** *Wood moisture content, time domain reflectometry (TDR), Grevillea robusta (Cunn.).*

## 1 INTRODUÇÃO

A determinação precisa da umidade na madeira é de grande interesse para a qualidade de um processo de secagem, para materiais de construção de origem madeireira, para o comércio, entre outras. Desta forma, há uma grande necessidade de desenvolver tecnologias visando determinação rápida e precisa da umidade na madeira.

Existem vários métodos para verificar o teor de umidade das madeiras. Alguns são exatos, porém não imediatos; outros oferecem rápida resposta, mas apresentam exatidão contestada pela literatura (CALONEGO et al., 2006). Como exemplo, tem-se medidores elétricos com princípios resistivos e capacitivos que não são exatos, porém proporcionam resposta imediata. Assim, 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 de umidade são importantes para a escolha do melhor método para cada

situação (FORRER, 1984; PONCE; WATAI, 1985; SKAAR, 1988; SIMPSON, 1991; HAYGREEN; BOWYER, 1996; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).

Os tipos de água existentes na madeira são: (1) água livre ou capilar (localizada nos lumes celulares, espaços intercelulares e abertura de pontoações) e (2) água higroscópica ou de impregnação (aquela que se encontra adsorvida pelas paredes celulares) (CECH; PFAFF, 1977; HAYGREEN; BOWYER, 1996; KOLLMANN; CÔTÈ, 1968; SIMPSON, 1991; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).

O teor de umidade referente ao estado em que, teoricamente apenas as paredes celulares estão saturadas, ao passo que toda a água capilar já foi eliminada, estando os lumes e os espaços intercelulares 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). Simpson (1991) afirma que o PSF para as espécies em geral está aproximadamente em torno de 30%.

Segundo Bodig e Jayne (1992), o teor de umidade também afeta a resistência mecânica da madeira. Com o aumento do teor de umidade da madeira, observa-se uma diminuição em sua resistência mecânica, sendo mais sensível para baixos teores de umidade e praticamente desprezível, para elevados teores de umidade.

O método considerado mais simples e exato de determinação da umidade da madeira é o método gravimétrico, porém apresenta como desvantagem o fato de ser destrutivo, de exigir muito tempo para obter-se a resposta bem como, ser inviável para espécies com componentes voláteis como altos teores de resinas, óleos e gorduras. Conforme Rasmussen (1961), este método consiste na pesagem da amostra úmida e após sua secagem em estufa a  $103 \pm 2$  °C quando a mesma alcança massa constante. O teor de umidade é costumeiramente expresso como uma porcentagem da massa total. Segundo Galvão e Jankowsky (1985), os métodos de destilação são aconselháveis para espécies que contenham extratos voláteis. O teor de umidade é determinado volumetricamente, utilizando-se o xileno ou tolueno como extratores, por não se misturarem à água.

Para Resch e Ecklund (1963), o método de titulação Karl Fisher, apresentou diferença significativa quando comparado com o método de secagem a  $103 \pm 2$ °C, o qual indicou teores de umidade maiores, sendo atribuída esta diferença à presença de óleos voláteis na madeira.

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.

O método da resistência elétrica faz uso de algumas propriedades físicas da madeira que dependem consideravelmente do teor de umidade. O desenvolvimento dessa técnica tornou possível a medição da umidade de forma não destrutiva e rápida. Stamm (1930) demonstrou a possibilidade de medir a resistência elétrica à corrente contínua para estimar o teor de umidade da madeira. Com isto, surgiram os medidores de umidade do tipo resistência elétrica que são baseados na variação da condutividade elétrica, utilizando o princípio de que existe uma relação fixa entre a resistência elétrica e o teor de umidade na madeira.

Os medidores utilizados para medir o teor de umidade da madeira normalmente são resistivos, ou seja, realizam a leitura do teor de umidade com base na resistência elétrica. A resistividade elétrica da madeira varia com o teor de umidade, especialmente abaixo do PSF. A resistividade varia de  $10^{14}$  a  $10^{16}$   $\Omega.m$  para madeira seca e de  $10^3$  a  $10^4$   $\Omega.m$  para a 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%. Assim, Ponce e Waitai (1985), Haygreen e Bowyer (1996), afirmam que medidores elétricos de resistência são geralmente mais confiáveis em teores de umidade de 6 a 30%.

Outra técnica estudada para determinação da umidade de madeira é a propagação de ondas ultrassônicas, que utiliza transdutores para emissão e recepção destas ondas, os quais oferecem rapidez em seu uso e facilidade de repetição em suas medidas. Contudo, observou-se que em transdutores de faces planas, há instabilidade nas repetições das medidas, principalmente de forem utilizadas superfícies irregulares, proporcionando erros (NESVIJSKI, 2003; LORENZI, 2000). Estudos apontaram a possibilidade de correlacionar a velocidade de propagação das ondas ao teor de umidade da madeira durante o processo de secagem (DYK; RICE, 2005; BRASHAW et al., 2004; GONÇALVES; COSTA, 2002; SIMPSON, 1998; SIMPSON; WANG, 2001).

A técnica TDR ou Reflectometria no Domínio do Tempo foi empregada originalmente em sistemas de telecomunicações para verificação da correta posição de rompimento em cabos. Para Tommaselli (1997), a técnica TDR apresenta vantagens como rapidez na obtenção das leituras, proporciona repetibilidade, portabilidade, compatibilidade com sistemas de aquisição de dados, além de não utilizar radiações ionizantes.

Fellner-Feldegg (1969) introduziu a reflectometria no domínio do tempo (TDR) como sendo um método para medir a permissividade dielétrica de líquidos. Desde então, a técnica TDR tem sido aplicada a medidas de propriedades dielétricas de muitos outros materiais, conforme afirmam Cassel et al. (1994) e Noborio (2001).

Na década de 80, Topp et al. (1980) e Topp e Davis (1985) obtiveram resultados da aplicação de TDR para a medida de constante dielétrica do solo ou do teor de umidade no solo.

Para Herrmann Júnior et al. (1986) um dos aspectos interessantes na utilização de ondas eletromagnéticas, na faixa de microondas, para a medida de umidade em meios porosos, é a versatilidade na utilização dos fenômenos que a técnica permite, como a transmissão de guias de ondas e a correlação com o teor de umidade existente neste meio. O fenômeno da reflexão através de medidas com o TDR é o espalhamento de microondas para estudo da constante dielétrica de um meio poroso.

Segundo Bicegli et al. (1996) a constante dielétrica é calculada a partir da medida do tempo que um pulso eletromagnético leva para transitar entre duas hastes metálicas que funcionam como guias de onda e que são introduzidas no meio em estudo. Esse método de medida estabelece a necessidade de considerar que o pulso emitido caminhe de uma haste metálica para outra e retorne à posição de partida. A equação (1) explica melhor o fenômeno.

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{K}} \quad (1)$$

onde:

$V_p$  – velocidade de propagação do pulso eletromagnético para um meio não dispersivo (m/s);

$c$  - velocidade da luz no vácuo ( $c=3.10^8$  m/s);

$K$  – constante dielétrica relativa, adimensional.

Reorganizando a Equação (1), segundo Bicegli et al. (1996), pode-se definir a constante dielétrica conforme a Equação (2).

$$K = \left( \frac{c \cdot t}{2L} \right)^2 \quad (2)$$

onde:

$K$  – constante dielétrica relativa, adimensional.

$c$  – velocidade da luz no vácuo ( $c=3.10^8$  m/s);

$t$  – tempo (s);

$L$  – comprimento da haste metálica (m).

Topp et al. (1980) mostram que a constante dielétrica se relaciona com o teor de água ( $\theta_v$ ) no solo, conforme a equação (3).

$$\theta_v = -5,3 \cdot 10^{-2} + 2,92 \cdot 10^{-2} K - 5,5 \cdot 10^{-4} K^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} K^3 \quad (3)$$

onde:

$\theta_v$  – teor de umidade no solo (%);

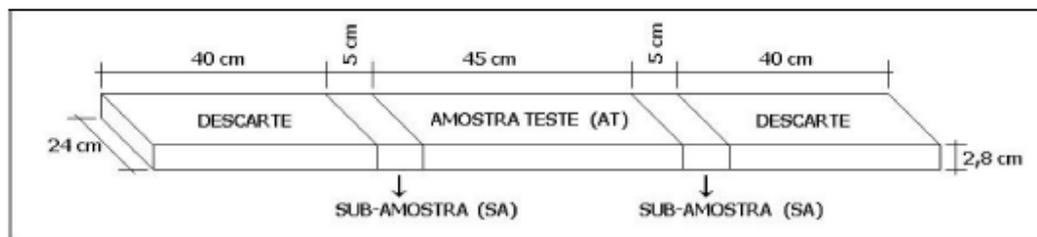
$K$  – constante dielétrica relativa do solo, adimensional.

Para Schumugge e Jackson (1980), em solos, os valores de  $K$  variam tipicamente entre 3 e 5. Para a água, os valores de  $K$  estão em torno de 80. Contudo, para Tommaselli (1997), Tommaselli e Bacchi (2001) a técnica TDR requer uma calibração específica para cada meio a ser avaliado. Segundo Batista (2004) uma vez estabelecido a calibração de forma concisa, a técnica apresenta exatidão nos dados adquiridos. Desta forma, pequenas quantidades de água livre no solo ou em outro meio poroso, irão afetar consideravelmente suas propriedades eletromagnéticas.

Contudo, o objetivo do presente estudo, foi estabelecer um modelo de calibração do equipamento TDR, para a determinação da umidade da madeira de *Grevillea robusta* (Cunn.).

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

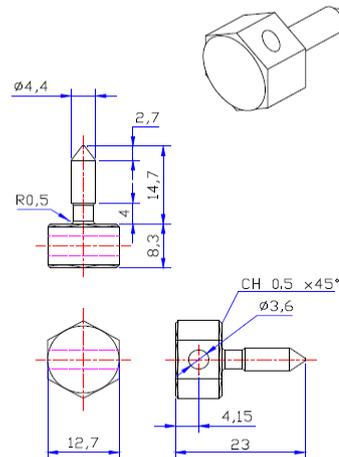
Foram avaliadas 11 (onze) tábuas de *Grevillea robusta* (Cunn.) escolhidas ao acaso (COSTA NETO, 2002) as quais foram desdobradas pelo sistema de corte tangencial nas dimensões 28mm x 24cm x 1,25m e, em seguida, sofreram cortes para a obtenção das amostras conforme esquema da figura 1.



**Figura 1** – Representação gráfica da obtenção das amostras avaliadas.

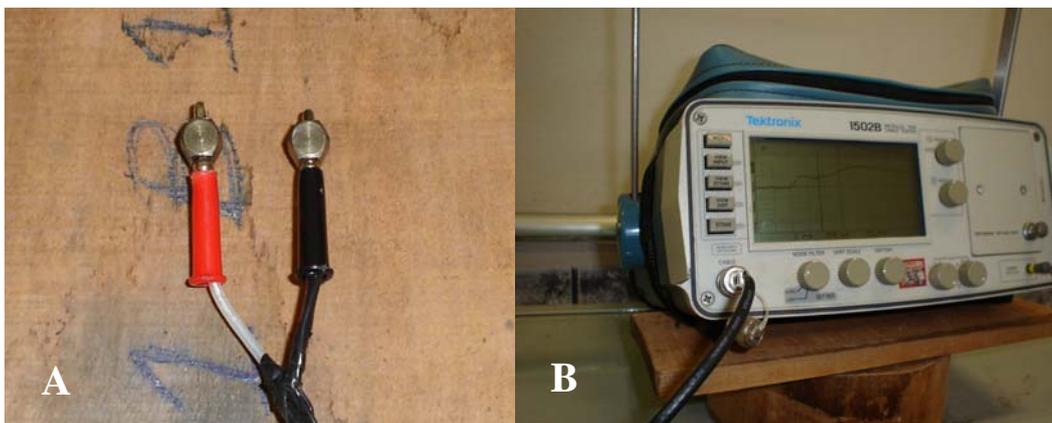
Logo após o corte, as sub-amostras (SA) e a amostra teste (AT) foram pesadas, visando à determinação da massa úmida inicial ( $M_U$ ). A amostra teste recebeu uma camada de produto impermeabilizante nos topos, com a finalidade de restringir a saída de água pelas faces longitudinais e, conseqüentemente, impedir o surgimento de um gradiente de umidade no sentido do comprimento das

peças. Também foram introduzidas duas hastes, confeccionados a partir de uma barra sextavada com dimensões  $\frac{1}{2}$  pol. x 3000mm em latão (com 65,5 – 68,5% de cobre, Cu, e o restante em zinco, Zn). O projeto e as dimensões das hastes estão apresentados na figura 2.



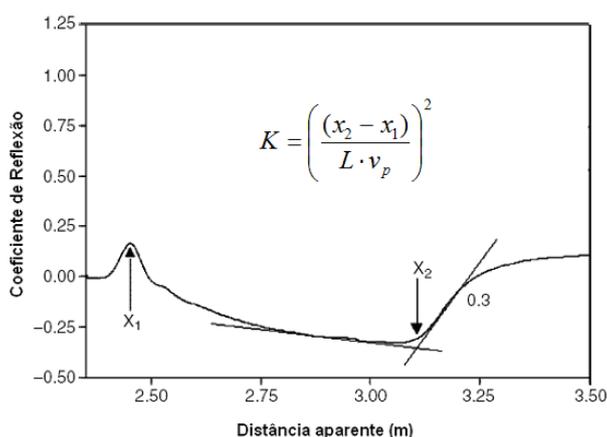
**Figura 2** - Projeto das hastes empregadas na TDR para madeira, com dimensões em milímetros.

As hastes foram instaladas com distância de 30mm entre si, cuja finalidade foi permitir o acesso da TDR às amostras de madeira ( A figura 3). O equipamento TDR utilizado foi um osciloscópio Tektronix, tipo TDR, modelo 1502B.



**Figura 3** - A: Amostra teste (AT) com as hastes instaladas e um cabo de 50 $\Omega$  de impedância instalado. B: Osciloscópio tipo TDR, empregado nesta pesquisa.

Posteriormente, as “AT” foram mantidas em estufa a 40°C de temperatura até atingirem 8% de umidade e os teores de umidade foram determinados pelo método gravimétrico através de uma balança de precisão de 0,1g e também pelo método TDR, medindo-se a distância entre a emissão e a reflexão de um pulso eletromagnético gerado pelo aparelho, permitindo determinar a constante dielétrica aparente ( $K$ ), conforme a figura 4.



**Figura 4** – Modelo de onda captada pelo equipamento TDR.

Verifica-se que  $X_1$  é o ponto de emissão do pulso eletromagnético e  $X_2$  é o ponto de reflexão do mesmo pulso. A distância aparente medida entre  $X_1$  e  $X_2$ , permite determinar a constante dielétrica aparente ( $K$ ) conforme é ilustrado na respectiva figura.

As sub-amostras foram submetidas à secagem completa em estufa a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  de temperatura, até massa constante, obtendo-se a massa seca ( $M_S$ ).

Com base nas  $M_U$  e  $M_S$ , determinou-se o teor de umidade inicial das sub-amostras, através do uso da equação (4):

$$U_{\%} = \frac{M_U - M_S}{M_S} \cdot 100 \quad (4)$$

onde:

$U_{\%}$  - teor de umidade das sub-amostras (%);

$M_U$  - massa úmida (g);

$M_S$  - massa seca em estufa a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  até peso constante (g).

Como as sub-amostras e a amostra teste são 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 (5):

$$M_{SE} = \frac{M_U \cdot 100}{100 + U_{\%}} \quad (5)$$

onde:

$M_U$  - massa úmida da amostra teste (g);

$M_{SE}$  - massa seca estimada da amostra teste (g);

$U_{\%}$  - teor de umidade inicial médio das sub-amostras (%).

Através 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 *Grevillea robusta* (Cunn.) foi obtida através da determinação do teor de umidade, referentes às massas úmidas corrente das amostras teste e simultaneamente através de técnica TDR.

Ao atingir um teor de umidade médio de 8%, os sensores foram retirados das amostras teste e estas foram secas a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  até massa constante para a determinação da massa seca real.

As hastes foram pesadas para corrigir os valores da massa úmida corrente e que juntamente com a massa seca real permitiu-se calcular o real teor de umidade das amostras testes ao longo do ensaio através do uso da equação (6).

$$U_{C\%} = \frac{M_{UC} - M_S}{M_S} \cdot 100 \quad (6)$$

onde:

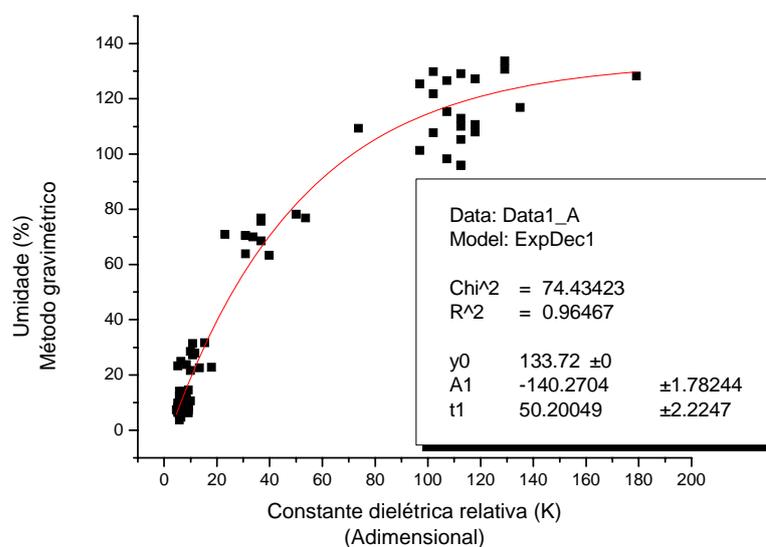
$U_{C\%}$  - teor de umidade corrente das amostras teste (%);

$M_{UC}$  - massa úmida corrente corrigida das amostras teste (g);

$M_S$  - massa seca real das amostras teste (g).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As umidades obtidas pelo método gravimétrico variaram de 125,88% a 6,62% e os valores observados pela técnica TDR variaram de 119,83% a 5,79%, durante o processo de secagem. Na figura 5 está apresentada a dispersão da umidade pelo método gravimétrico em função da constante dielétrica relativa, determinada pela TDR.



**Figura 5** - Dispersão dos valores de umidade obtidos pelo método gravimétrico em função da constante dielétrica relativa, obtida pelo equipamento TDR.

Desta forma, baseando-se em conclusões de pesquisa que validaram a TDR para determinação da umidade e outros atributos físicos para solos (TOPP et al., 1980; TOPP; DAVIS, 1985; TOMASSELLI, 2001; ROBINSON et al., 2002) pode-se, de forma análoga e baseada no comportamento experimental obtido por Batista et al. (2006), sugerir um modelo empírico de calibração para a técnica TDR, onde se tem uma equação exponencial para explicar o fenômeno da variação da umidade em função da constante dielétrica relativa para madeira do tipo *Grevillea robusta* (Cunn.), a qual é expressa pela equação (7):

$$U = 132,72 - 140,27 \cdot e^{\frac{-K}{50,20}} \quad (7)$$

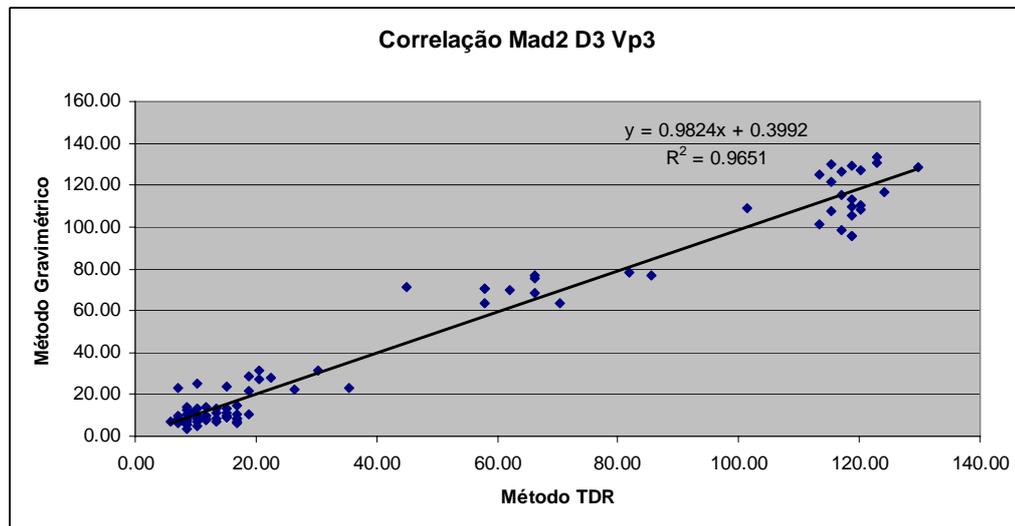
onde:

$U$  - umidade da madeira (%);

$K$  - constante dielétrica relativa, adimensional.

Na figura 6, verifica-se a dispersão dos valores de umidade entre o método gravimétrico em função da técnica TDR, tendo como característica uma correlação linear positiva. A regressão linear, que se trata de um método para estimar a condicional (valor esperado) de uma variável dependente  $Y$ , a partir de

valores de algumas outras variáveis independentes  $X$ , confere um bom ajuste, observado pelo  $R^2=0,9651$ , definido como coeficiente de correlação linear, o qual parte da existência de uma variável dependente  $Y$  e diversas variáveis independentes  $X_i$ , confirma que a equação obtida explica 96,51% da variação de  $Y$ , ou seja, da umidade obtida pelo método gravimétrico.



**Figura 6** – Correlação entre as duas metodologias: Gravimétrico e TDR.

Para avaliar o desempenho da curva de calibração obtida, utilizou-se o coeficiente de concordância,  $d$ , proposto por Willmott et al.(1985), descrito pela equação 8, cuja finalidade é oferecer um parâmetro de tomada de decisão sobre o comportamento do modelo avaliado. O valor do coeficiente de concordância variou de zero, para nenhuma concordância, a um, para a concordância perfeita.

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_i - \theta_i^*)^2}{\sum_{i=1}^n (|\theta_i^* - \Theta| + |\theta_i - \Theta|)^2} \right] \quad (8)$$

onde:

$n$  - número total de observações;

$\theta$  - umidade das amostras obtida pelo método gravimétrico (%);

$\theta^*$  - umidade das amostras estimadas pelas respectivas curvas de calibração da técnica TDR (%);

$\Theta$  - média das umidades obtidas pelo método gravimétrico (%), tomado como padrão ouro ou referência.

Foram considerados os seguintes indicadores estatísticos: coeficiente de correlação,  $r$ , índice de Willmott,  $d$ , e índice de confiança ou desempenho,  $i$ .

A precisão é dada pelo coeficiente de correlação que indica o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à média, ou seja, o erro aleatório. O valor do coeficiente de correlação encontrado foi classificado de acordo com a metodologia proposta por Hopkins (2007).

O índice de confiança ou desempenho ( $i$ ) proposto por Camargo e Sentelhas (1997), que estabelece a seguinte relação entre os coeficientes de correlação ( $r$ ) e o de concordância ( $d$ ), de acordo com a equação 9, proporciona concluir se o modelo estudado é satisfatório ou não do ponto de vista estatístico.

$$i = r \cdot d \quad (9)$$

O desempenho dos métodos, avaliados por meio do índice ( $i$ ), foram classificados como ótimo (O), muito bom (MB), bom (B), mediano (Md), sofrível (S), mau (m) e péssimo (P), de acordo com o quadro 1.

**Quadro 1** – Critério de interpretação do desempenho dos métodos avaliados pelo índice ( $i$ ).

| Desempenho | O     | MB        | B         | Md        | S         | M         | P           |
|------------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| Valor $i$  | >0,85 | 0,76-0,85 | 0,66-0,75 | 0,61-0,65 | 0,51-0,60 | 0,41-0,50 | $\leq 0,40$ |

Fonte : Adaptado de Camargo e Sentelhas (1997).

No quadro 2, observa-se a análise de variância ao nível de 5% de significância e constata-se que não há diferença significativa entre as metodologias.

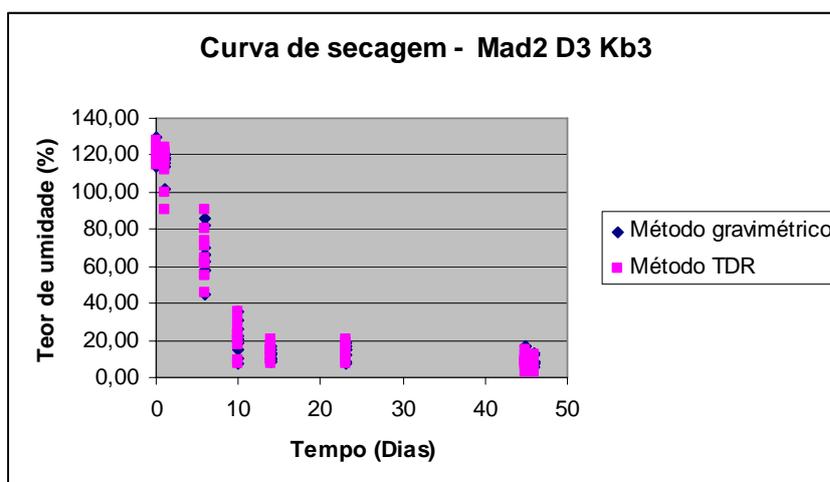
**Quadro 2** – Índices estatísticos: coeficiente de correlação,  $r$ , índice de Willmott,  $d$ , fator de confiança ou desempenho,  $i$ , e classificação dos modelos, segundo Camargo & Sentelhas (1997).

| Madeira                             | Índice $d$ | Correlação<br>$r$ | Fator $i$ | Classificação<br>do modelo |
|-------------------------------------|------------|-------------------|-----------|----------------------------|
| <i>Grevillea robusta</i><br>(Cunn.) | 0,991088   | 0,982372          | 0,973617  | Ótimo                      |

Segundo Ponce e Watai (1985), James (1988) e Haygreen e Bowyer (1996), os medidores elétricos de resistência, são geralmente mais confiáveis para avaliar umidades de 6 a 30%. Acima do PSF, verifica-se uma grande dispersão de suas leituras. Já para a TDR, pode-se observar que, o estudo quanto

ao ajuste do modelo de calibração foi considerado ótimo e a dispersão dos valores acima do PSF foi muito pequena, reforçando a conveniência desta metodologia.

A figura 7 ilustra o comportamento da variação da umidade nas amostras avaliadas em período de secagem. Observa-se uma sobreposição das medidas realizadas pela TDR sobre as medidas obtidas pelo método gravimétrico, considerado padrão-ouro. Com isso, podemos concluir que as metodologias são equivalentes. Reforçando, observamos que a curva de secagem apresenta comportamento semelhante à curva característica observada em Santos et al. (2003).



**Figura 7** – Curva de secagem das amostras. Verifica-se o comportamento das duas metodologias (Gravimétrico e TDR) na determinação da umidade da madeira de *Grevillea robusta* (Cunn.).

Os resultados observados no quadro 2 e figura 7 mostraram que a técnica TDR, com seu modelo de calibração apresentado, pode ser aplicada com alto nível de confiança e desempenho, na determinação da umidade em madeiras de *Grevillea robusta* (Cunn.). Outro fator muito importante e observado nas figuras 6 e 7 é o comportamento do método TDR acima do PSF (Ponto de Saturação das Fibras) onde, ao contrário do que afirma Galina (1997) para medidores elétricos, apresentou bom comportamento.

#### 4 CONCLUSÕES

Conclui-se através do estudo, que o processo de calibração é fácil, porém demorado, tendo em vista a necessidade de se estabelecer uma correlação, entre a umidade obtida pelo método gravimétrico e sua correspondente constante dielétrica relativa. Neste estudo, baseado na TDR, optou-se pelo modelo de

calibração exponencial:  $U = 132,72 - 140,27 \cdot e^{\frac{-K}{50,20}}$ , o qual melhor se ajustou aos dados, cuja finalidade foi obter a umidade em madeiras de *Grevillea robusta* (Cunn.). Na correlação dos valores entre metodologias, da figura 6, verificou-se uma pequena dispersão, principalmente acima do PSF, tornando a TDR uma metodologia promissora. Com os bons resultados obtidos para a determinação da umidade da madeira de *Grevillea robusta* (Cunn.), com a técnica TDR, ressalta-se a importância de se pesquisar a viabilidade da técnica também para outras espécies de madeiras.

Desta forma, pode-se reforçar que a técnica TDR, quando comparada a outros métodos elétricos, oferece boa possibilidade de monitoramento da umidade em madeiras, principalmente a *Grevillea robusta* (Cunn.), objeto deste estudo.

## 5 REFERÊNCIAS

BATISTA, W. R. **Avaliação das técnicas TDR (Reflectometria por Domínio do Tempo) e moderação de nêutrons, na determinação do teor de água em diferentes classificações de solo**. 2004. 101 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Energia na Agricultura) Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2004.

BISCEGLI, C. I. et al. Outros equipamentos e métodos.. In: CRESTANA, S. et al. (Orgs.). **Instrumentação agropecuária: contribuições no limiar do novo século**. Brasília, DF: EMBRAPA, SPI, 1996. cap.6, p. 228-262.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 712 p.

BRASHAW, B. K.; WANG, X.; ROSS, R. J.; PELLERIN, R. F. Relationship between stress wave velocities of green and dry veneer. **Forest Products Journal**, Madison, v. 54, n. 6, p. 85-89, 2004.

CALONEGO, F. W. et al. Avaliação do teor de umidade da madeira de *Eucalyptus grandis* por medidores elétricos resistivos. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 18, n. único, p. 71-78, 2006.

CAMARGO, A. P. ; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CASSEL, D. K.; KACHANOSKY, R. G.; TOPP, G. C. Practical considerations for using TDR cable tester. **Soil Technology**, Cremlingen-Destedt, v. 7, n. 2, p. 113-126, 1994.

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

COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. São Paulo: Edgard Blücher, 2002. 280 p.

DYK, H. V.; RICE, R. W. Ultrasonic wave velocity as a moisture indicator in frozen and unfrozen lumber. **Forest Products Journal**, Madison, v. 55, n. 6, p. 68-72, 2005.

FELLNER-FELDEGG, H. The measurement of dielectrics in the time domain. **Journal of Physical and Chemical**, Washington, DC, v. 73, p. 616-623, 1969.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Washington, DC: U.S. 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. 34-38, July/Aug. 1984.

GALINA, I. C. M. **Varição da resistência elétrica em madeiras visando o agrupamento de espécies**. 1997. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

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

GONÇALVES, R.; COSTA, O. A. L. Acompanhamento da secagem da madeira de pinus, eucalipto e embuia utilizando ultra-som. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS FLORESTAIS, 2., 2002, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UFPR, 2002. p. 1-10.

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

HERRMANN JÚNIOR, P. S. et al. Determinação da constante dielétrica relativa de um meio poroso através de microondas (RDT). In: PACHECO, M. T. T. (Coord.). **Instrumentação: catálogo de trabalhos completos submetidos ao Grupo de Instrumentação do XIX Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada**. São José dos Campos: UNIVAP, ID&D, 1986, p. 107-111.

HOPKINS, W. G. Correlation coefficient. Disponível em:  
<<http://www.sportsci.org/resource/stats/correl.html>>. Acesso: 06 abr. 2011.

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

LORENZI, A. **Aplicação de testes ultra-sônicos para avaliação de estruturas de concreto utilizando**

**elementos de inteligência artificial**. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2000.

NESVIJSKI, E. G. Dry point contact transducers: design for new applications. In: **The e-Journal of Nondestructive Testing**, v. 9, n. 9, Berlin: NDT.net, 2003. Disponível em: <<http://www.ndt.net/article/v08n09/nesvi/nevsi.htm>>. Acesso em: 08/04/2011.

NOBORIO, K. Measurements of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, n. 31, p. 213-237, 2001.

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

RASMUSSEN, E. F. **Dry kiln operator's manual**. Madison:United States Department of Agriculture, Forest Service, 1961. 197p.

RESCH, H.; ECKLUND, B. A. Moisture content determination for wood with highly volatile constituents. **Forest Products Journal**, Madison, v. 13, n. 11, p. 481-2, 1963.

ROBINSON, D. A.; COOPER, J. D.; GARDNER, C. M. K. Modeling the relative permittivity of soils using hygroscopic water content. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 255, p. 39-49, 2002.

SANTOS, G. R. V.; JANKOWSKY, I. P.; ANDRADE, A. Curva característica de secagem para madeira de *Grevillea robusta* (Cunn.). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 63, p. 214-220, 2003.

SCHUMUGGE, T. J.; JACKSON, T. J. Survey of methods for soil moisture determination. **Water Resources Research**, Washington, DC, v. 16, n. 6, p. 961-979, 1980.

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

SIMPSON, W. T. Relationship between speed of sound and moisture content of red oak and hard maple during drying. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 30, n. 4, p. 405-413, 1998.

SIMPSON, T. S.; WANG, X. Relationship between longitudinal stress wave transit time and moisture content of lumber during kiln-drying. **Forest Products Journal**, Madison, v. 51, n. 10, p. 51-54, 2001.

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

STAMM, A. J. An electrical conductivity method for determining the moisture content of wood. **Industrial and Engineering Chemistry Analytical**, Chapel Hill, v. 2, n. 3, p. 240-244, July, 1930.

TOMMASELLI, J. T.G. **Influência de algumas características do solo sobre a calibração de um aparelho de TDR (time-domain reflectometry)**. 1997. 109 f. Tese (Doutorado em Ciências) Centro Nacional de Energia na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

TOMMASELLI, J. T. G.; BACCHI, O. O. S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, n. 9, p. 1145-1154, 2001.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L. ; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, Washington, DC, v. 16, p. 574-582, 1980.

TOPP, G. C. ; DAVIS, J. L. Measurement of soil water content using time domain reflectometry (TDR): A field evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, p. 19-24, 1985.

WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.