

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

**EMPREGO DA REFLECTOMETRIA POR DOMÍNIO DO TEMPO NA  
DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE MADEIRAS COMERCIAIS.**

**WAGNER ROBERTO BATISTA**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências  
Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu,  
para obtenção do título de Doutor em  
Agronomia – Energia na Agricultura.

BOTUCATU-SP

Dezembro – 2008

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

**EMPREGO DA REFLECTOMETRIA POR DOMÍNIO DO TEMPO NA  
DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE MADEIRAS COMERCIAIS.**

**WAGNER ROBERTO BATISTA**

**FÍSICO**

**Orientador: Prof. Dr. João Eduardo Guarnetti dos Santos**

**Co-Orientador: Prof. Dr. Antonio Evaldo Klar**

**Co-Orientador: Prof. Dr. Elias Taylor Durgante Severo**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências  
Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu,  
para obtenção do título de Doutor em  
Agronomia – Energia na Agricultura.

BOTUCATU-SP  
Dezembro – 2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Batista, Wagner Roberto, 1975-  
B333e      Emprego da reflectometria por domínio do tempo na determinação da umidade de madeiras comerciais / Wagner Roberto Batista. - Botucatu : [s.n.], 2008.  
          xiii, 134 f. : il. color., gráfs.

Tese (Doutorado)-Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2008

Orientador: João Eduardo Guarnetti dos Santos

Co-orientador: Antonio Evaldo Klar

Co-orientador: Elias Taylor Durgante Severo

Inclui bibliografia

1. TDR (Reflectometria no domínio do tempo). 2. Madeira - Umidade. 3. *Pinus Caribaea* var. *hondurensis*. 4. *Grevillea robusta* (Cunn.). 5. *Eucalyptus grandis* I. Santos, João Eduardo Guarnetti dos. II. Klar, Antonio Evaldo. III. Severo, Elias Taylor Durgante. IV. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu) Faculdade de Ciências Agrônomicas. V. Título.

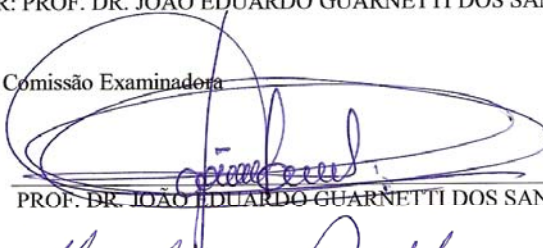
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU  
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "EMPREGO REFLECTOMETRIA POR DOMÍNIO DO TEMPO NA  
DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE MADEIRAS COMERCIAIS"

ALUNO: WAGNER ROBERTO BATISTA

ORIENTADOR: PROF. DR. JOÃO EDUARDO GUARNETTI DOS SANTOS

Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. JOÃO EDUARDO GUARNETTI DOS SANTOS



PROF. DR. MARCOS ANTONIO DE REZENDE



PROF. DR. MOMOTARO IMAIZUMI



PROF. DR. JOSÉ FERNANDO PREZENÇO



PROF. DR. EIK TENÓRIO

Data da Realização: 19 de dezembro de 2008.

*Aos meus pais Aparecido Batista e Maria Inês  
Ortelan Batista, minhas irmãs Daniele e Heloisa  
e ao meu sobrinho Leonardo.*

### **Ofereço**

*A minha esposa Mara Cléia Trevisan, pelo  
incansável apoio, compreensão e  
companheirismo.*

*As Famílias Batista e Trevisan, pelo amor e  
carinho que sempre tiveram comigo.*

### **Dedico**

**Ao Senhor Deus, por me permitir encerrar com grande  
alegria, mais uma etapa de minha vida. A Ti Senhor  
ofereço e dedico minha vida.**

## AGRADECIMENTOS

- Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Campus de Botucatu por ter acreditado em meu potencial para o desenvolvimento deste trabalho.
- Ao Prof. Dr. João Eduardo Guarnetti dos Santos, pelo acompanhamento e orientação desde o mestrado. Valiosos foram seus ensinamentos, sempre com muita atenção, disponibilidade, críticas e elogios. Sempre primando pela boa conduta e procurando promover o verdadeiro espírito investigativo da ciência.
- Ao Prof. Dr. Antonio Evaldo Klar pelas conversas sobre os mais diversos assuntos sempre ricos de informações. Estar ao lado de uma reconhecida autoridade com vasta experiência em irrigação e drenagem foi uma enorme satisfação.
- Ao Prof. Elias Taylor Durgante Severo pela co-orientação, preocupação e permissão para usar o Laboratório de Secagem e Preservação da Madeira, fruto de sua inquestionável competência no meio científico.
- Aos colegas de pós-graduação Ademilson Coneglian e Fred Willians Calonego pelo apoio incondicional no desenvolvimento e finalização deste trabalho.
- Aos funcionários do Departamento de Recursos Naturais / Ciências Florestais, Dicão e Édson pelo apoio sempre que necessitei.
- Aos Professores Doutores João Eduardo Guarnetti dos Santos, Marcos Antonio de Rezende e Momotaro Imaizumi que participaram das Bancas de Qualificação e Defesa da Tese, onde ofereceram valiosas observações que visaram o enriquecimento deste trabalho.
- Aos Professores Doutores José Fernando Presenço e Eik Tenório que também contribuíram enormemente para a finalização deste trabalho na Banca de Defesa da Tese.
- Ao Prof. Dr. Momotaro Imaizumi, que desde a graduação me incentivou e acreditou em meu potencial para a vida acadêmica. Foi enorme a satisfação em tê-lo, novamente, participando de minha formação.

- Ao Prof. Dr. Anderson Luiz de Souza pelo apoio nas análises estatísticas e incentivo para a finalização deste trabalho.
- Aos funcionários da Biblioteca “Professor Paulo de Carvalho Mattos” pela atenção, precisão e gentileza no atendimento. Em especial, a Inês pelas informações quanto à sala da congregação, onde a defesa aconteceu, e à Janaina, pela correção das referências bibliográficas.
- As secretárias da seção de pós-graduação Marilena do Carmo Santos, Marlene Rezende Freitas e Jaqueline de Moura Gonçalves e Kátia Otomo Duarte, pela atenção e paciência.
- A minha irmã e Professora Daniele Aparecida Batista, pelo auxílio na confecção e revisão do Summary.
- A Mara Cléia Trevisan pelos conselhos e apoio ao longo deste trabalho.
- A todos que direta ou indiretamente contribuíram para que este estudo se tornasse realidade.
- A Secretaria de Educação do Estado de São Paulo, através do programa Bolsa Mestrado/Doutorado, que muito me ajudou a desenvolver este trabalho.

**Os meus mais sinceros agradecimentos.**

## SUMÁRIO

	Página
OFERECIMENTO E DEDICATÓRIA .....	IV
AGRADECIMENTOS .....	V
LISTA DE FIGURAS .....	X
LISTA DE QUADROS .....	XIII
1 RESUMO .....	1
2 SUMMARY .....	3
3 INTRODUÇÃO .....	5
4 REVISÃO DE LITERATURA .....	7
4.1 Tipos de medidas .....	7
4.2 Espécies empregadas nesta pesquisa .....	7
4.2.1 A espécie <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> .....	7
4.2.2 A espécie <i>Grevillea robusta</i> (Cunn.) .....	9
4.3 Umidade da madeira .....	10
4.3.1 Métodos para determinação da umidade da madeira .....	10
4.3.1.1 Método da estufa ou gravimétrico .....	10
4.3.1.2 Método de destilação .....	11
4.3.1.3 Método de titulação de Karl Fischer.....	11
4.3.4.4 Método da resistência elétrica.....	11
4.4 Relação água-madeira.....	12
4.4.1 Umidade, secagem da madeira e seus aspectos .....	13
4.5 Ponto de saturação das fibras (PSF) .....	14
4.6 Movimento de água em relação ao PSF .....	15
4.6.1 Movimento de água acima do PSF .....	15
4.6.2 Movimento de água abaixo do PSF .....	18
4.7 Dielétricos .....	23

4.8 Método da constante dielétrica pela reflectometria por domínio do tempo (TDR) .....	24
4.8.1 Princípio físico da reflectometria no domínio do tempo (TDR) .....	28
4.8.2 O modelo de Topp .....	40
4.8.3 Circuito eletrônico de um TDR.....	43
4.9 Aspectos da calibração da TDR .....	44
4.9.1 Modelos empíricos .....	44
4.9.2 Modelos semi-empíricos .....	47
4.9.3 Modelos físicos .....	49
4.10 Potencial uso da TDR .....	51
4.11 Vantagens e desvantagens da TDR .....	54
4.12 Fatores de erro em medidas na TDR .....	54
5 MATERIAL E MÉTODOS .....	57
5.1 MATERIAL .....	57
5.1.1 Área experimental e localização .....	57
5.1.2 Clima .....	58
5.1.3 Espécies utilizadas .....	58
5.1.4 Materiais empregados no campo .....	58
5.1.5 Materiais empregados no laboratório .....	58
5.1.6 Materiais empregados para a TDR .....	59
5.1.7 Materiais empregados para o método gravimétrico .....	61
5.1.8 Materiais empregados para o escritório .....	61
5.2 MÉTODOS .....	61
5.2.01 Seqüência Operacional .....	61
5.2.02 Procedimentos de campo e amostragem para cada espécie de madeira ..	63
5.2.03 Levantamento de coordenadas geográficas .....	63
5.2.04 Preparação das amostras para análise gravimétrica .....	63

5.2.05 Determinação da umidade e da massa específica básica das amostras ...	66
5.2.06 Preparação das amostras para análise pela TDR .....	68
5.2.07 Determinação da constante dielétrica relativa pela TDR .....	69
5.2.08 Curvas de calibração da TDR .....	72
5.2.09 Obtenção da umidade da madeira pela TDR .....	73
5.2.10 Análise estatística .....	73
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	75
6.1 Massa específica básica .....	75
6.2 Curvas de secagem .....	75
6.3 Modelos e coeficientes ajustados para calibração da TDR .....	77
6.4 Desempenho dos modelos ajustados .....	78
6.5 Resultados da pesquisa piloto com <i>Eucalyptus grandis</i> .....	79
7 CONCLUSÕES.....	82
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84
9 APÊNDICES .....	95
9.1 Apêndice 1 – Curvas de Secagem .....	96
9.2 Apêndice 2 – Curvas de Calibração para a TDR .....	106
9.3 Apêndice 3 – Correlações entre metodologias .....	125

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
01	Diagrama esquemático mostrando uma representação idealizada da distribuição da umidade nas células de madeira seccionada em relação ao ponto de saturação das fibras (SKAAR, 1988) .....	15
02	Esquema simplificado do movimento de água em um capilar (KOLLMANN & CÔTÈ, 1968) .....	17
03	Esquema simplificado sobre os caminhos de difusão .....	19
04	Ilustração de um meio dielétrico .....	23
05	Relação de um capacitor contendo um material dielétrico com perdas .....	30
06	Modelo de equipamento tipo TDR para determinação do teor de água no solo .....	40
07	Representação das Linhas de Campo referentes a 4 modelos de hastes para o TDR.(Jones et al. 2002) .....	41
08	Haste segmentada para emprego da TDR. Os segmentos permitem a obtenção da umidade em diversas cotas do perfil analisado. (Souza & Matsura, 2002) .....	42
09	Modelo de sonda com hastes separadas. Com esta configuração geométrica, podem-se estabelecer estudos sobre a determinação do bulbo molhado (Souza & Matsura, 2002) .....	42
10	Representação da conexão osciloscópio – circuito .....	43
11	Circuito eletrônico de um reflectômetro para emprego da técnica TDR.....	43
12	Osciloscópio marca Tektronix, tipo TDR, modelo 1502B.....	59
13	Projeto das hastes empregadas na TDR para madeira, com dimensões em milímetros.....	60
14	Haste em latão empregada na TDR.....	60
15	Representação gráfica da obtenção das amostras avaliadas.....	64

16	A: Marcação das tábuas. B: Processo de corte. C: Tábua com os cortes para obtenção da amostra teste (AT) e das sub-amostras (SA).....	64
17	Aplicação de impermeabilizante nos topos das amostras.....	65
18	Amostras prontas para o início do processo de secagem.....	66
19	Layout das amostras empregadas na análise com a técnica TDR e gravimétrica .....	68
20	Amostras com as hastes instaladas .....	69
21	Modelo de onda captada pelo equipamento TDR .....	69
22	Amostra teste (AT) com as hastes instaladas e um cabo de 50Ω instalado e osciloscópio tipo TDR, empregado nesta pesquisa .....	71
23	Curva de secagem do <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> obtida pelo método gravimérico .....	76
24	Curva de secagem da <i>Grevillea robusta</i> (Cunn.), obtida pelo método gravimérico .....	76
25	Teor de água ou umidade da madeira em função da constante dielétrica relativa, obtida pela TDR .....	80
26	Correlação entre o método gravimétrico e a TDR para determinação da umidade da madeira .....	80
27	Curvas de secagem das amostras .....	81
28	Curva de secagem para Mad1 D1 Vp1 e Mad1 D1 Vp2 .....	97
29	Curva de secagem para Mad1 D1 Vp3 e Mad1 D2 Vp1 .....	98
30	Curva de secagem para Mad1 D2 Vp2 e Mad1 D2 Vp3 .....	99
31	Curva de secagem para Mad1 D3 Vp1 e Mad1 D3 Vp2 .....	100
32	Curva de secagem para Mad1 D3 Vp3 e Mad2 D1 Vp1 .....	101
33	Curva de secagem para Mad2 D1 Vp2 e Mad2 D1 Vp3 .....	102
34	Curva de secagem para Mad2 D2 Vp1 e Mad2 D2 Vp2 .....	103
35	Curva de secagem para Mad2 D2 Vp3 e Mad2 D3 Vp1 .....	104
36	Curva de secagem para Mad2 D3 Vp2 e Mad2 D3 Vp3 .....	105

37	Curva de calibração da TDR para Mad1 D1 Vp1 .....	107
38	Curva de calibração da TDR para Mad1 D1 Vp2 .....	108
39	Curva de calibração da TDR para Mad1 D1 Vp3 .....	109
40	Curva de calibração da TDR para Mad1 D2 Vp1 .....	110
41	Curva de calibração da TDR para Mad1 D2 Vp2 .....	111
42	Curva de calibração da TDR para Mad1 D2 Vp3 .....	112
43	Curva de calibração da TDR para Mad1 D3 Vp1 .....	113
44	Curva de calibração da TDR para Mad1 D3 Vp2 .....	114
45	Curva de calibração da TDR para Mad1 D3 Vp3 .....	115
46	Curva de calibração da TDR para Mad2 D1 Vp1 .....	116
47	Curva de calibração da TDR para Mad2 D1 Vp2 .....	117
48	Curva de calibração da TDR para Mad2 D1 Kb3 .....	118
49	Curva de calibração da TDR para Mad2 D2 Vp1 .....	119
50	Curva de calibração da TDR para Mad2 D2 Vp2 .....	120
51	Curva de calibração da TDR para Mad2 D2 Vp3 .....	121
52	Curva de calibração da TDR para Mad2 D3 Vp1 .....	122
53	Curva de calibração da TDR para Mad2 D3 Vp2 .....	123
54	Curva de calibração da TDR para Mad2 D3 Vp3 .....	124
55	Correlação entre metodologias para Mad1 D1 Vp1 e Mad1 D1 Vp2 .....	126
56	Correlação entre metodologias para Mad1 D1 Vp3 e Mad1 D2 Vp1 .....	127
57	Correlação entre metodologias para Mad1 D2 Vp2 e Mad1 D2 Vp3 .....	128
58	Correlação entre metodologias para Mad1 D3 Vp1 e Mad1 D3 Vp2 .....	129
59	Correlação entre metodologias para Mad1 D3 Vp3 e Mad2 D1 Vp1 .....	130
60	Correlação entre metodologias para Mad2 D1 Vp2 e Mad2 D1 Vp3 .....	131
61	Correlação entre metodologias para Mad2 D2 Vp1 e Mad2 D2 Vp2 .....	132
62	Correlação entre metodologias para Mad2 D2 Vp3 e Mad2 D3 Vp1 .....	133
63	Correlação entre metodologias para Mad2 D3 Vp2 e Mad2 D3 Vp3 .....	134

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro</b>		<b>Página</b>
01	Material (fluidos e sólidos) e respectivas constantes dielétricas.....	26
02	Seqüência, localização, espécie da madeira segundo EMBRAPA (1986), coordenadas geográficas e elevação.....	57
03	Resumo do delineamento experimental para as variáveis da TDR.....	71
04	Configurações empregadas nesta pesquisa, separadas pelas espécies estudadas .....	72
05	Critério de interpretação do desempenho dos métodos avaliados pelo índice (i) .....	74
06	Massa específica básica das espécies avaliadas .....	75
07	Coeficientes, $R^2$ , número de amostragem e modelo do ajuste linear para Mad1 .....	77
08	Coeficientes, $R^2$ , número de amostragem e modelo do ajuste exponencial para Mad2 .....	78
09	Índices estatísticos: coeficiente de correlação, r, índice de Willmott, d, índice de confiança ou desempenho, i, e classificação dos modelos, segundo Camargo & Sentelhas (1997) .....	79

## 1 RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo avaliar o emprego da reflectometria no domínio do tempo, conhecida também, como TDR (*Time Domain Reflectometry*) na obtenção da umidade em madeiras. Atualmente esta técnica é muito empregada na física dos solos e sistemas de irrigação, para o monitoramento do teor de água no solo. Para este estudo, empregou-se duas espécies de madeiras comerciais, o *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e a *Grevillea robusta* (Cunn.), procedentes dos municípios de Cabrália Paulista-SP e Duartina-SP. Para cada espécie, foram escolhidas de forma aleatória 11 árvores onde estas foram abatidas, serradas em toras de 3,0m e encaminhadas para serraria onde foi realizado o processo de desdobramento em tábuas pelo sistema de corte tangencial. As tábuas apresentaram espessura de 28mm e largura de 24cm. Em seguida, escolheu-se novamente de forma aleatória 11 tábuas, que foram embaladas em plástico para evitar a perda de água, e encaminhadas para o laboratório. Uma vez obtidas as amostras representativas para avaliação, estas foram inicialmente pesadas e secas em estufa elétrica a 40 °C de temperatura. Para o *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, o processo de secagem iniciou-se com umidade média de 101,45% e finalizou, à 7,36% de umidade. Já para a *Grevillea robusta* (Cunn.), a umidade média inicial foi de 125,88% e final de 6,62%. Durante o processo de secagem, a umidade foi determinada, periodicamente, através do método de massas correntes, bem como, a respectiva constante dielétrica relativa pela TDR. Para o estudo da viabilização da TDR na determinação

da umidade em madeiras, optou-se por estabelecer 3 distâncias entre as hastes do sensor: 10mm, 20mm e 30mm (distâncias estas comumente empregadas em medidores resistivos comerciais). Também se estabeleceu variações na velocidade de propagação dos pulsos eletromagnéticos emitidos pelo equipamento TDR. Estas variações foram de 33%, 66% e 99% da velocidade da luz. De posse destes resultados, foram estabelecidas curvas de calibração para as espécies onde se pôde verificar que para o *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, o modelo que melhor se ajustou estatisticamente foi o linear do tipo  $U = A + B \cdot K$  e para a *Grevillea robusta* (Cunn.) o modelo exponencial do tipo  $U = Y_0 + A \cdot e^{\frac{-K}{Z}}$ , onde U é a umidade,  $Y_0$ , A, B, Z são coeficientes e K a constante dielétrica relativa, obtida pela TDR. Para análise dos resultados, optou-se por empregar a verificação da significância dos modelos de calibração. Esta verificação foi realizada empregando os indicadores estatísticos: coeficiente de correlação, r; índice de Willmott (Willmott et al., 1985), d e o índice de confiança ou desempenho, i. Todos os modelos definidos, segundo o índice de confiança ou desempenho, adaptado por Camargo & Sentelhas (1997), tiveram classificações, entre ótimo e muito bom. Permitindo, portanto, concluir que a técnica da reflectometria no domínio do tempo, TDR, torna-se promissora para determinação da umidade de madeiras, inclusive quando o monitoramento ocorrer acima do Ponto de Saturação das Fibras (PSF).

---

Palavras-chave: TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo); Umidade da madeira; *Pinus caribaea* var. *hondurensis*; *Grevillea robusta* (Cunn.); *Eucalyptus grandis*.

**Apply of Time Domain Reflectometry in the determination of commercial wood moisture.** Botucatu, 2008, 134 p. Tese de Doutorado em Agronomia – Energia na Agricultura – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: WAGNER ROBERTO BATISTA

Adviser 1: JOÃO EDUARDO GUARNETTI DOS SANTOS

Adviser 2: ANTONIO EVALDO KLAR

Adviser 3: ELIAS TAYLOR DURGANTE SEVERO

## **2 SUMMARY**

The main objective of this present work was to evaluate the applied of the reflectometry in the domain of time, technique known as TDR (*Time Domain Reflectometry*) to obtention of moisture in woods. Nowadays, this technique is very used in soil physics and irrigation system, to the monitoring of moisture in the soil. To this study, two species of commercial woods were used, the *Pinus caribaea* var. *hondurensis* and the *Grevillea robusta* (Cunn.), these woods come from the municipal district of Cabrália Paulista-SP and Duartina-SP. To each specie, were chosen in a casual way, 11 trees. They were dejected, planked in logs of 3,0m and referred to the sawmill, the place where was realized the process of unfolding the wood in boards by the system of tangential section. The boards brung up the ply of 28mm and the width of 24cm. Next, were chosen again, in a casual way, 11 planks that were unrolled in plastic just to avoid the waterless, and referred to the lab. When were obtained the appropriate samples to the evaluation, they were, in an initial instant,

measure out and dry in an electric greenhouse of a temperature of 40 °C. To *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, the dry process started with a media moisture of 101,45% and finished with 7,36% of moisture. To the other specie, the *Grevillea robusta* (Cunn.), the initial media moisture found was 125,88% and the final was 6,62%. During the whole dry process, the moisture was determined, periodically, through the masses current, as like the relative dielectric constant by the TDR. To the study of the feasibility of TDR in the determination of moisture in woods, was chosen to establish 3 distances among the sensor's stick: 10mm, 20mm and 30mm (these distances were applied in commercial resistive gauges too). In the same way, it was established the variations in the velocity of propagation of electromagnetic pulses send out from TDR equipment. These variations were of 33%, 66% and 99% of the velocity of light. Through these results, calibration curves were established to the species and could be verified that *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, was the model that best statistically adjusted to the linear kind of equation  $U = A + B \cdot K$  and to *Grevillea robusta* (Cunn.) the exponential kind  $U = Y_0 + A \cdot e^{\frac{-K}{Z}}$ , U is the moisture,  $Y_0$ , A, B, Z are coefficients and K a relative dielectric constant by TDR. To the analyses of results, it was chosen to employ the verification of meaningful of calibration models. This verification was realized using the statistics indicators: coefficient of correlation, r; indicator of Willmott (Willmott et al., 1985), d and indicator of trust or performance, i. All the defined models, according to the indicator of trust or performance, adapted by Camargo & Sentelhas (1997), had classifications, between great and very good. Allowing, this way, conclude that the time domain reflectometry, TDR, become promising to the determination of moisture in woods, even when the monitoring occurs above the Saturation of Fibers Point. (PSF).

---

**Keywords:** TDR (*Time Domain Reflectometry*); Wood Moisture; *Pinus caribaea* var. *hondurensis*; *Grevillea robusta* (Cunn.); *Eucalyptus grandis*.

### 3 INTRODUÇÃO

O presente trabalho foi desenvolvido nas dependências do Laboratório de Secagem e Preservação da Madeira, junto ao Departamento de Ciências Florestais pertencente à Faculdade de Ciências Agrônômicas – FCA da Universidade Estadual Paulista – UNESP – Campus de Botucatu-SP, com o objetivo de avaliar a viabilidade da técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo, também conhecida como TDR (*Time Domain Reflectometry*) para a determinação da umidade em duas espécies de madeiras comerciais, *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e *Grevillea robusta* (Cunn.).

Esta técnica é comumente empregada na determinação do conteúdo de água em solos apresentando um alto grau de precisão e rapidez em seu procedimento uma vez que sua calibração já esteja estabelecida.

A TDR é baseada na determinação da constante dielétrica relativa de um meio poroso e, por correlação, obtenção do valor da umidade correspondente.

Atualmente, sabe-se que sensores elétricos, tipo resistivos e capacitivos, que fornecem a umidade em madeiras de forma indireta, como a TDR, apresentam resultados satisfatórios para teores de umidades inferiores ao do ponto de saturação das fibras (PSF), ou seja, de 0 até 28-30% (SIMPSON, 1991).

Os sensores mais comuns para a determinação da umidade da madeira são os de princípio resistivo, onde sua característica principal é a variação da resistividade elétrica, verificando, para tanto, oscilações de  $10^{14}$  a  $10^{16}$   $\Omega.m$  para a madeira seca e de  $10^3$  a  $10^4$   $\Omega.m$  para a madeira no PSF.

Sabe-se que os sensores resistivos, quando empregados para a determinação da umidade acima do PSF, registram um alto grau de dispersão nos resultados, provocados pela perda de sensibilidade.

Em 2006, no Segundo Congresso Brasileiro de Industrialização da Madeira e Produtos de Base Florestal, em Curitiba, Batista et al. (2006), apresentaram um estudo piloto, em que pode-se verificar que a TDR apresentou ótimos resultados nos valores da umidade em madeira de *Eucalyptus grandis*, tanto abaixo, quanto acima do PSF.

Com este estudo, buscou-se desenvolver uma nova metodologia para determinar a umidade em madeiras proporcionando, contudo, inovação tecnológica. Como referência (padrão ouro) empregada neste trabalho, adotou-se o método gravimétrico, considerado um método direto, que consiste na pesagem sistemática das amostras em todo o processo de secagem em estufa. É a metodologia mais precisa em termos de determinação da umidade em madeiras com baixo teor de resina e óleos, porém há o inconveniente da demora para a obtenção dos resultados.

Dentro do objetivo principal, optou-se por estudar o comportamento da metodologia levando-se em consideração a espécie da madeira, as distâncias entre as hastes e a velocidade de propagação dos pulsos eletromagnéticos.

Para as análises estatísticas, empregou-se a verificação da significância dos modelos de calibração, considerando-se as variáveis: madeira, distância entre hastes e velocidade de propagação. Em todos os estudos teve-se como variável dependente a umidade da madeira. Esta verificação foi realizada empregando os indicadores estatísticos: erro médio percentual, coeficiente de correlação,  $r$ , índice de Willmott (Willmott et al., 1985),  $d$ , e o índice de confiança ou desempenho,  $i$ . Dentro destes critérios estatísticos, a TDR apresentou resultados satisfatórios, tornando-a promissora para a determinação da umidade em madeiras.

## **4 REVISÃO DE LITERATURA**

### **4.1 Tipos de medidas**

Para Vuolo (1996) e Pimentel-Gomes (2000), uma medição necessita no mínimo de duas notações: o número ou intensidade, que representa a quantidade mensurada e sua respectiva unidade que representa o padrão de medida utilizado. Constataram ainda que as medidas sejam classificadas em 2 tipos: medida direta: obtida através de uma comparação meramente mecânica. Como exemplo, a medida de um comprimento com uma fita métrica; ou a massa de um objeto e medida indireta: obtida a partir do cálculo de outras grandezas de medida direta. Como exemplo, a determinação da massa específica de um sólido ou a temperatura do corpo humano por um termômetro doméstico.

### **4.2 Espécies empregadas nesta pesquisa**

#### **4.2.1 A espécie *Pinus caribaea* var. *hondurensis***

O gênero *Pinus* foi introduzido no Brasil no ano de 1936, com sementes oriundas da Europa (Barrett & Golfari, 1962). Porém, o cultivo em larga escala só

ocorreu a partir de 1940, para suprir a demanda de madeira branca e produção de fibra que anteriormente era suprida pela *Araucaria angustifolia*, espécie de ampla ocorrência na região Sul e em alguns sítios da região Sudeste do Brasil, mas que sofria forte pressão de desflorestamento devido ao crescente consumo industrial, sendo sua extinção um fato iminente. Sendo assim, optou-se por coníferas com boas características tecnológicas, rápido crescimento e que se adaptassem mais facilmente às condições ecológicas das regiões Sul e Sudeste do Brasil.

Entre as coníferas que foram inicialmente testadas, destacaram-se as espécies do gênero *Pinus*. Dentro do gênero, *Pinus caribaea* foi uma das espécies que apresentou boa adaptação, rápido crescimento, boa forma do fuste e alta produção de resina, principalmente nas regiões quentes e de déficit hídrico. A espécie é também de grande interesse comercial, em nível mundial, devido às características silviculturais e qualidade da madeira (Gibson, 1987), sendo muito cultivada na região Sudeste brasileira.

O *Pinus caribaea* é formado por três variedades: var. *bahamensis*, var. *caribaea* e var. *hondurensis*, todas provenientes da América Central. Dentre as variedades destaca-se o *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. A variedade *hondurensis* é encontrada naturalmente em Belize, Guatemala, Honduras, Nicarágua e México (Perry, 1991). Recentemente, novas áreas naturais têm sido encontradas em El Salvador (América Central e México, Coniferous Resources Cooperative - CAMCORE, 1996). O *Pinus caribaea* var. *hondurensis* ocorre geralmente em altitudes que variam do nível do mar a 500 m de altitude, podendo chegar, em alguns locais, a 1.000 m de altitude (Hodge & Dvorak, 2001). O crescimento das árvores pode chegar a 30 m (Richardson, 1998). A espécie é recomendada para plantios entre o norte do Estado de São Paulo até a Amazônia (Golfari, 1967). Sua madeira é de utilidade para serrarias e produção de celulose.

#### 4.2.2 A espécie *Grevillea robusta* (Cunn.)

A *Grevillea robusta* Cunn., vulgarmente conhecida no Brasil como Grevillea, é uma espécie nativa da Áustria. Nesse país, ela predomina nas áreas da região norte do estado de New South Wales e na região sul do estado de Queensland. Essa distribuição natural abrange latitudes de 30° 10' S a 24° 30' S e altitudes, desde o nível do mar até 1120m, aproximadamente. Nos mencionados estados, o volume de chuvas varia de 720 a 1710mm e a temperatura média anual, de 14 a 20°C (SWAIN, 1928; BOLAND, 1984; HARWOOD & GETAHUN, 1990).

Em seu habitat natural, a espécie alcança altura que varia de 20 a 24m, podendo eventualmente chegar a 40m e diâmetro à altura do peito que varia de 40 a 50cm (HARWOOD, 1992). Sua copa apresenta folhagem relativamente densa, enquanto as flores apresentam coloração que varia do amarelo ao alaranjado. Seus frutos são discentes, de coloração cinza-escuro, com comprimento que varia de 1,5 a 2cm, os quais contém duas sementes aladas de cor castanho-claro, com comprimento que varia de 0,5 a 1cm.

Segundo Boland (1984), a Grevílea é uma espécie com potencial de mercado para sombreamento de pastagens e de cultivos, quebra-vento, madeira para lenha e para desdobro. Devido a essas características a espécie é indicada para uso em diferentes sistemas silviculturais e agroflorestais, em regiões dos estados do Paraná e São Paulo.

Para Swain (1928) a Grevílea é uma árvore de rápido crescimento, resistente ao seco e ao frio, regenerando facilmente por semente no viveiro e natural. Plantado geralmente para madeira, sombra e lenha. A madeira é castanho-rosada pálida parecido ao carvalho, textura sedada, forte e elástica. Não resistente aos térmites ou “dry-rot”. Harwood & Getahun (1990), acrescentam que a Grevílea é fácil de ser trabalhada. É empregada na marcenaria, na construção de Pallet's, painéis, caixas, papel, lenha (20,395 kJ/kg) e carvão.

## 4.3 Umidade da madeira

### 4.3.1 Métodos para determinação da umidade da madeira

A determinação precisa da umidade na madeira é de grande interesse para sistemas de secagem, construção, comércio, etc. Desta forma, houve uma grande necessidade do desenvolvimento de tecnologias para a determinação da umidade da madeira de forma pontual ou mesmo automatizada.

Kollmann e Côté (1968), Skaar (1972 e 1988), Johnston (1970) e Huy (1985) apontam alguns métodos distintos, entre eles: estufa ou gravimétrico, destilação, titulação e medidores elétricos do tipo resistência e dielétrico.

#### 4.3.1.1 Método da estufa ou gravimétrico

O método gravimétrico utiliza equipamentos simples como uma estufa e uma balança de precisão além de ser de fácil execução. Conforme Johnston (1970), este método consiste na pesagem da amostra úmida e sua secagem em estufa a  $103\pm 2^{\circ}\text{C}$  até alcançar massa constante. A umidade é costumeiramente expresso como uma porcentagem da massa total.

O método gravimétrico é considerado menos preciso para madeiras com altos teores de resinas, óleos, gorduras ou materiais voláteis. Outra desvantagem está no fato da destruição da amostra e no longo período necessário para a obtenção da umidade.

De forma geral, pode-se determinar a umidade com base em massa seca conforme a equação 01.

$$U_{bs} = \frac{m_u - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (01)$$

onde:

$U_{bs}$  - umidade da madeira com base em massa seca, %;

$m_u$  - massa úmida, g;

$m_s$  - massa seca, g.

#### **4.3.1.2 Método de destilação**

Conforme Kollmann e Côté (1968) e Desh (1956), os métodos de destilação são aconselháveis para espécies de madeira que tenham extrativos voláteis. O teor de água é determinado de forma volumétrica, utilizando-se o xileno ou o tolueno como extratores, por não se misturarem com a água.

#### **4.3.1.3 Método de titulação de Karl Fischer**

O método baseia-se na determinação iodométrica da água que é removida da madeira por destilação. Resch e Ecklund (1963), compararam os resultados obtidos através desse método com os alcançados através de secagem a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$ , concluindo haver uma diferença significativa entre eles. O método de secagem a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  indicou teores de umidade maiores, e essa diferença foi atribuída à presença de óleos voláteis da madeira.

#### **4.3.1.4 Método da Resistência Elétrica**

O método da resistência elétrica faz uso de propriedades físicas da madeira, as quais dependem consideravelmente da 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 a

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 a umidade na madeira.

#### **4.4 Relação Água-Madeira**

Uma das operações mais importantes na indústria de transformação da madeira é a secagem racional da matéria-prima básica. A remoção de sua umidade até um teor adequado irá minimizar os efeitos de movimentação dimensional, além de garantir melhor qualidade ao usuário. Reduz sensivelmente os custos do transporte, influi favoravelmente no uso final e diminui a susceptibilidade ao ataque de fungos e insetos.

Simpson (1991) e Skaar (1988), afirmam que toda árvore em crescimento contém considerável quantidade de água, comumente chamada de seiva. Embora a seiva contenha alguns materiais solúveis, do ponto de vista da secagem considera-se todo esse material como água.

Segundo Ponce & Watae (1985), Simpson (1991) e Mackay & Oliveira (1989), a umidade inicial em relação ao peso seco pode variar muito de uma espécie para outra.

A quantidade de água na madeira varia em função da espécie, entre toras e, também, dentro da própria tábua. As variações na quantidade de água, em tábuas produzidas da mesma tora, são principalmente devidas à posição das mesmas na tora da qual foram serradas. Além disso, a presença de lenhos diferentes na madeira pode significar diferença de umidade (MACKAY & OLIVEIRA, 1989).

Segundo Cech & Pfaff (1977), Haygreen & Bowyer (1996), Kollmann & Côte (1968) e Simpson (1991), para entender como a água se movimenta na madeira por ocasião da sua secagem, é necessário conhecer as condições sob as quais ela ocorre nas células lenhosas. Os tipos de água existentes na madeira são freqüentemente classificados da seguinte forma: (1) Água livre ou capilar – aquela localizada nos lumes celulares e espaços

intercelulares e aberturas de pontoações. Na realidade, esta água não é completamente livre, pois existem forças capilares atuando sobre as mesmas 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.

Para Santini (1996) esses dois tipos de água desempenham funções diferenciadas no processo de secagem da madeira. Enquanto que a água capilar é mais importante para as propriedades térmicas e elétricas, a água higroscópica exerce influência principalmente sobre as propriedades mecânicas e algumas propriedades físicas da madeira, como massa específica, contração e inchamento.

#### **4.4.1 Umidade, Secagem da Madeira e seus aspectos**

O processo de secagem é de grande importância, pois visa à diminuição de problemas, defeitos, e redução no tempo de secagem da madeira.

Basicamente o processo de secagem consiste no fornecimento de energia na forma de calor para a madeira, buscando a vaporização e remoção da água na superfície. Segundo Wengert e Denig (1995), para se determinar a umidade da madeira em um processo de secagem, deve-se estabelecer um controle sobre variáveis como: temperatura, umidade relativa do ar e sua velocidade. Conforme relata Jankowsky (1996), esses controles podem ser conduzidos por meio de softwares sofisticados, que conduzem o processo de secagem em secadores, visando um aumento de produtividade.

A retirada da água livre ocasiona uma perda de peso da madeira, pode provocar também o aparecimento de defeitos, como o colapso em madeiras propensas, e se encontra a teores de umidade superiores ao ponto de saturação das fibras (ANDRADE, 2000; HAYGREEN & BOWYER, 1996; MACKAY & OLIVEIRA, 1989 e SIMPSON, 1991).

Uma das operações mais importantes na indústria de transformação da madeira é a secagem racional da matéria-prima básica. A remoção de sua umidade até um teor adequado irá minimizar os efeitos de movimentação dimensional, além de garantir melhor

qualidade ao usuário. Reduz sensivelmente os custos do transporte, influi favoravelmente no uso final e diminui a susceptibilidade ao ataque de fungos e insetos.

Na secagem, a primeira água a ser removida é a água contida nas cavidades celulares, que é denominada água livre ou capilar, que se encontra retida por forças capilares, apreciavelmente menores do que às que mantêm a água na parede celular (CECH & PFAFF, 1977 e HAYGREEN & BOWYER, 1996).

#### **4.5 Ponto de Saturação das Fibras (PSF)**

O ponto de saturação das fibras (PSF) é a 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 espaços intercelulares sem o líquido (HAYGREEN & BOWYER, 1996; ROZAS MELLADO, 1993; SANTINI, 1996; SIMPSON, 1991 e SKAAR, 1988).

Simpson (1991) afirma que o PSF para as espécies em geral está aproximadamente em torno de 30% de umidade. Kollmann & Côté (1968) citam que o PSF varia desde 22 a 24% para coníferas com alto teor de resina e folhosas com cerne distinto e porosidade em anel circular, até 32 a 35% para folhosas com porosidade difusa, cerne indistinto, alborno com porosidade em anel, e para folhosas com cerne distinto e porosidade em anel semicircular.

Segundo Simpson (1991), o PSF é importante para a secagem da madeira pelas seguintes razões: (1) para evaporar a água das paredes celulares é necessária maior energia do que para evaporar a água dos lumes celulares (aproximadamente 5% mais a 15% de umidade e 15% mais a 6% de umidade); (2) a parede celular não irá contrair até alcançar o PSF; e (3) grandes mudanças nas propriedades físicas e mecânicas começam a ocorrer no PSF.

Para Galvão & Jankowsky (1988), Rozas Mellado (1993) e Santini (1996), o PSF da madeira é de grande importância devido às mudanças que começam a manifestar abaixo do mesmo: alterações na resistência mecânica, nas propriedades físicas e

contrações. Por isso, a água higroscópica exerce um papel importante no uso da madeira. A Figura 01 é uma representação esquemática do PSF.



Figura 01. Diagrama esquemático mostrando uma representação idealizada da distribuição da umidade nas células de madeira seccionada em relação ao ponto de saturação das fibras (SKAAR, 1988).

#### 4.6 Movimento de água em relação ao ponto de saturação das fibras (PSF)

##### 4.6.1 Movimento de água acima do ponto de saturação das fibras (PSF).

O movimento de líquidos acima do ponto de saturação das fibras é causado por interações capilares e regido pela lei de Hagen-Poiseuille (KOLLMANN & CÔTÈ, 1968; SIAU, 1971), apresentada pela equação 02.

$$Q = \frac{\pi \cdot \Delta P \cdot R^4}{8 \cdot \eta \cdot L} \quad (02)$$

onde:

Q – vazão, cm<sup>3</sup>/s;

ΔP – variação de pressão, dyn/cm<sup>2</sup>;

R – raio, cm;

η – viscosidade, dyn.s/cm<sup>2</sup>;

L – Comprimento do cilindro, cm.

Segundo Kollmann & Côtè (1968), Simpson (1991) e Tomaselli (1981), em um capilar completamente cheio o movimento da água capilar é produzido pelas diferenças existentes em tensão devido às forças existentes na superfície do menisco dentro do capilar. A força de tensão “T” em um menisco balanceado de um capilar com raio “r” pode ser calculado utilizando-se a equação 03. Desconsideram-se neste caso as diferenças na pressão do ar existente dentro do capilar.

$$T = H \cdot \rho = \frac{2 \cdot \sigma}{\rho \cdot r} \cdot \rho = \frac{2 \cdot \sigma}{r} \quad (03)$$

onde:

T - tensão capilar, Kgf/cm<sup>2</sup>;

H - altura a que o líquido sobe no capilar, cm;

ρ - massa específica do líquido, g/cm<sup>3</sup>;

σ - tensão superficial do líquido, Kgf/cm;

r - raio capilar, cm.

A equação 03 estabelece que a tensão capilar é diretamente proporcional a tensão superficial da interface ar-água, e inversamente proporcional ao raio da curvatura.

Segundo Cavalcante (1991), Santini (1996) e Severo (1998), quando existe dentro de um tubo capilar um menisco balanceado (côncavo) e um não balanceado (quase plano), como ilustra a Figura 02, o movimento do líquido é provocado pelas diferenças em tensão existente entre estes dois meniscos.

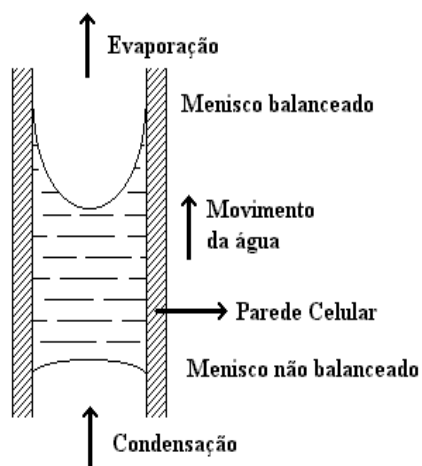


Figura 02. Esquema simplificado do movimento de água em um capilar (KOLLMANN & CÔTÈ, 1968).

Lisbôa (1986<sup>1</sup>) explica que quando a interface ar-água é plana, existe uma maior tendência das moléculas de água, perto da superfície ficarem livres, quando comparada com a tendência de escape na superfície côncava. Aliado a esse fato, as moléculas que escapam da superfície curva podem colidir em outro local da mesma superfície e serem recapturadas. A tendência de escape das moléculas em virtude da geometria da superfície é explicada pela diferença de pressão ocasionada. Desta forma, a região com menor área oferecerá uma maior pressão, enquanto que a região de maior área, uma menor pressão. Com isso, entende-se que haverá uma força resultante em virtude da diferença de pressão no sentido da região de maior pressão para a região de menor pressão.

Partindo da fundamentação anterior, como a pressão de vapor sobre o menisco balanceado é menor que a pressão de vapor sobre o menisco não balanceado, existe, portanto, o movimento de água capilar na direção do menisco mais côncavo em função do gradiente de pressão criado pela evaporação na superfície superior e condensação na inferior.

<sup>1</sup> LISBÔA, C.D.J. **Escoamento de água na madeira: capilaridade**. Curitiba: Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 1986. 91p. (Seminário apresentado à Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal). Não publicado.

Quando a pressão de vapor diminui com o decréscimo do diâmetro do capilar, a tensão superficial aumenta e conseqüentemente aumenta a tensão capilar. Numa rede de tubos capilares de diferentes diâmetros, ocorrem forças de tensão nos meniscos balanceados. Deste modo, os tubos estreitos tiram líquido dos tubos mais largos.

Tomaselli (1981), afirma que na realidade o movimento de água capilar na madeira é mais complexo devido à existência de bolhas de ar no interior das células.

Segundo Hart (1965), a umidade em madeiras recém abatidas é bem abaixo da máxima umidade que as células poderiam conter devido à existência de substancial quantidade de bolhas de ar.

Siau (1971) e Tomaselli (1981), afirmam que a existência de bolhas de ar no interior da madeira diminui o fluxo capilar de maneira bastante significativa.

Os mesmos autores explicam o fenômeno da seguinte forma: (1) Quando o raio capilar é menor que o diâmetro de uma bolha de ar, a tensão capilar no sistema celular promove a expansão desta bolha. As expansões das bolhas de ar promovem o alívio da tensão capilar e conseqüentemente a diminuição do fluxo de água capilar; e (2) Quando uma bolha de ar é forçada a passar na abertura de uma pontuação, a interface ar-água desta bolha em forma de uma esfera deve ser deformada de tal forma que o raio inicial do menisco ar-água se iguale ao raio da abertura da pontuação o que torna necessário uma considerável pressão, ocasionando redução do movimento de água livre.

#### **4.6.2 Movimento de água abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF).**

O movimento da água higroscópica corresponde ao movimento da água abaixo do ponto de saturação das fibras, que é geralmente considerado como um fenômeno de difusão. Esse fenômeno, de forma geral, é um processo que envolve o transporte molecular de um lugar para outro, desde uma região de maior concentração para uma de menor concentração, num esforço de alcançar o equilíbrio (HART, 1965; SIMPSON, 1991).

O movimento de difusão pode ocorrer por três caminhos diferentes dependendo do estado e o local em que se encontra a água na madeira. Segundo Hart (1965) e

Simpson (1991) o movimento pode ser por difusão de vapor d'água, difusão de água higroscópica e como uma combinação de ambos, como esquematizado na Figura 03.

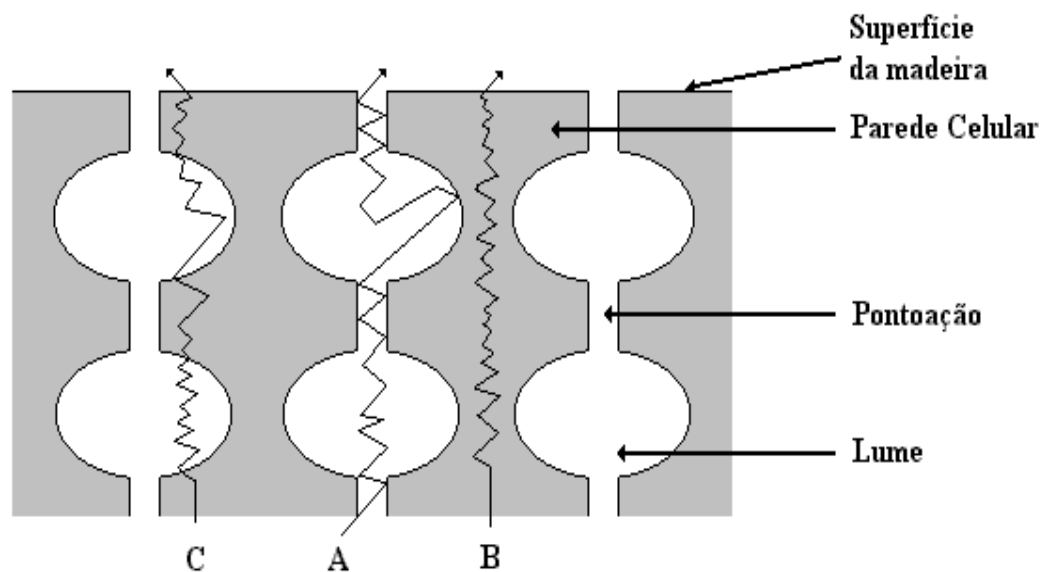


Figura 03. Esquema simplificado sobre os caminhos de difusão.

Observando a Figura 03 temos: A) difusão de vapor d'água (Lume/Pontoação/Lume); B) difusão de água higroscópica (Parede); e C) difusão combinada de água higroscópica e vapor d'água (Parede/Lume/Parede).

Segundo Siau (1971), caso o fluxo e o gradiente de umidade sejam considerados constantes no espaço e no tempo, a difusão de vapor d'água na madeira é governado pela primeira lei de Fick, de natureza estatística, conforme equação 04. O mesmo autor afirma que o movimento do fluxo de umidade é diretamente proporcional ao gradiente de concentração de umidade na direção do fluxo, e a constante de proporcionalidade é o coeficiente de difusão. Deste modo o coeficiente de condutividade por difusão para o movimento da água higroscópica na madeira é igual ao fluxo dividido pelo gradiente, como mostra a equação 05.

$$j = -D \cdot \frac{dn}{dx} \quad (04)$$

onde:

$j$  - densidade da corrente de partículas,  $m^{-2} \cdot s^{-1}$ ;

$D$  - coeficiente de difusão,  $m^2 \cdot s^{-1}$ ;

$n$  - número de átomos ou moléculas por unidade de volume (ou concentração),  $m^{-3}$ ;

$\frac{dn}{dx}$  - gradiente de concentração,  $m^{-3} \cdot m$ ;

$$Kd = \frac{\frac{m}{(t \cdot A)}}{\frac{\Delta M}{L}} = \frac{m \cdot L}{t \cdot A \cdot \Delta M} \quad (05)$$

onde:

$Kd$  - coeficiente de condutividade por difusão do vapor da água na madeira,  $g/cm \ s \ %$ ;

$m$  - massa de vapor da água transportada através do corpo de prova,  $g$ ;

$L$  - comprimento do corpo de prova na direção do fluxo,  $cm$ ;

$t$  - tempo do fluxo,  $s$ ;

$A$  - área transversal do corpo de prova perpendicular à direção do fluxo,  $cm^2$ ;

$\Delta M$  - diferença de umidade entre as superfícies paralelas separadas pela distância  $L$ ,  $\%$ .

A diferença de umidade pode ser expressa como a diferença de concentração em gramas de umidade por centímetro cúbico de madeira úmida. Assim, o coeficiente de difusão na madeira pode ser determinado, através da equação 06.

$$Dg = \frac{\frac{m}{(t \cdot A)}}{\frac{\Delta g}{L}} = \frac{m \cdot L}{t \cdot A \cdot \Delta g} \quad (06)$$

onde:

$D_g$  - coeficiente de difusão do vapor d'água na madeira,  $\text{cm}^2/\text{s}$ ;

$\Delta g$  - diferença de concentração de umidade,  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

Os valores calculados teoricamente pela lei de Fick representam aproximadamente o dobro dos valores experimentais no sentido longitudinal e 30 vezes no sentido tangencial, uma vez que o fluxo não é constante no espaço e no tempo (ROZAS MELLADO, 1993 e TOMASELLI, 1981).

Moreschi (1975<sup>2</sup>) e Tomaselli (1974), citado por Rozas Mellado (1993), atribuem essa discrepância ao fenômeno de difusão impedida, o qual ocorre nas aberturas minúsculas das pontoações cujo diâmetro é menor que o caminho livre médio das moléculas de gás. Neste caso as moléculas que entram na abertura chocam-se com a parede lateral do capilar e são adsorvidas, fato que dificulta o transporte das moléculas, quando comparado com a difusão através de capilares de diâmetros maiores, como os lumes celulares.

Como o fluxo e o gradiente de umidade são variáveis no tempo e no espaço, durante a secagem da madeira, a segunda lei de Fick expressa melhor o fluxo de difusão, como mostra a equação 07. Essa equação considera um coeficiente de difusão médio para a madeira.

$$\frac{dM}{dt} = Dg_M \cdot \frac{d^2 M}{dx^2} \quad (07)$$

---

<sup>2</sup> MORESCHI, J.C. **Relação água madeira e sua secagem**. Curitiba: Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, (1975). 91p. (Apostila apresentada à Disciplina Relação Água-Madeira, do curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal). Não publicado.

onde:

$\frac{dM}{dt}$  - quantidade de água removida (M) na unidade de tempo (t);

$D_{gM}$  - coeficiente de difusão médio,  $\text{cm}^2/\text{s}$ ;

$\frac{d^2M}{dx^2}$  - variação da umidade na distância (x).

Kollmann (1959), afirma que Stamm efetuou o cálculo do comportamento do coeficiente de difusão perpendicular às fibras em função da umidade, para madeiras de diferentes massas específicas. Para Stamm, citado por Kollmann (1959), o coeficiente de difusão médio da madeira desde o ponto de saturação das fibras até qualquer umidade intermediária é obtido através da integração gráfica da curva do coeficiente de difusão dividindo pela amplitude de umidade verificada durante a secagem.

Ao contrário do movimento capilar o movimento de água por difusão é bastante complexo, devido à, principalmente, uma integração existente entre o movimento de água por difusão nas cavidades celulares (lúmens de células) e ao movimento da água higroscópica na parede celular (STAMM, 1962 citado por TOMASELLI, 1981).

Simpson (1991) afirma que o fluxo de água no sentido longitudinal é aproximadamente 10 a 15 vezes mais rápida que no sentido transversal. Porém, na prática a saída de maior volume de água higroscópica durante o processo de secagem se dá pela secção transversal da peça de madeira, uma vez que a espessura da tábua é muito menor que o comprimento da mesma. Afirma ainda, que a difusão radial é um tanto maior que a tangencial, fato esse que explica a secagem mais rápida de uma face em relação à outra na peça de madeira e a contração diferenciada nas duas direções.

## 4.7 Dielétricos

Segundo Tipler & Mosca (2006), um material não condutor, como ar, vidro, papel ou madeira é chamado dielétrico. Quando o espaço entre dois condutores de um capacitor é ocupado por um dielétrico, a capacitância aumenta de um fato  $K$  que é uma característica do dielétrico. Esse fenômeno foi descoberto experimentalmente por Michael Faraday. A razão desse aumento é que o campo elétrico entre as placas de um capacitor é enfraquecido pelo dielétrico oferecendo alta resistência elétrica e conseqüente resistência ao fluxo de corrente elétrica.

A Figura 04 ilustra como os elétrons das moléculas migram para a placa carregada positivamente. As moléculas, então, criam um campo elétrico no lado esquerdo que anula parcialmente o campo criado pelas placas.

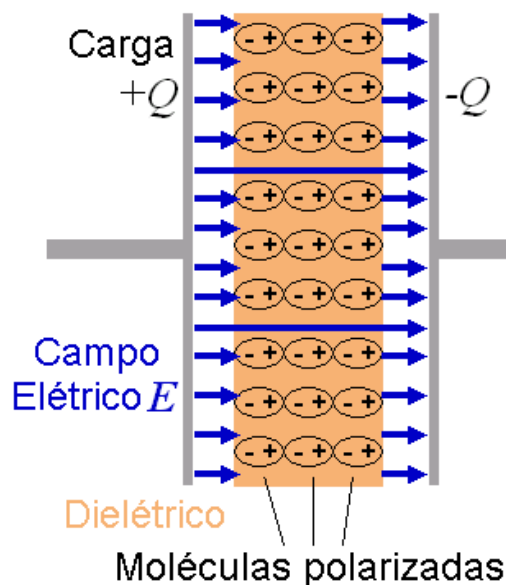


Figura 04. Ilustração de um meio dielétrico

#### 4.8 Método da constante dielétrica pela reflectometria por domínio do tempo

A técnica TDR ou Reflectometria por Domínio do Tempo foi empregada originalmente em telecomunicações na verificação da correta posição de rompimento de cabos telefônicos.

O princípio da medida da umidade do solo pela TDR foi pioneiramente introduzida por Davis e Chudobiak (1975) e implementado e validado por Topp et al. (1980), Topp e Davis (1981) e Topp et al. (1984).

A TDR baseia-se na propagação de ondas eletromagnéticas através de hastes condutoras envoltas pelo solo. Este fenômeno se deve a diferença entre as constantes dielétricas ( $K$ ), da água, do ar e do solo. Na matriz do solo estas constantes variam entre 1 e 81. O ar possui o valor mínimo igual a 1, as partículas sólidas variam entre 3 e 5, e a água, o valor máximo é de 81 (Noborio, 2001). A constante  $K$  medida no sistema ar-solo-água é denominada de constante dielétrica aparente ( $K_a$ ), assim, conhecendo-a pode-se determinar a umidade volumétrica do solo por meio de curvas de calibração obtidas a partir de dados de campo ou de laboratório (Souza & Matura, 2003).

Segundo Gomide (2001) e Crestana et al. (1996), o sensor de reflectometria no domínio do tempo, emite um pulso numa frequência de microondas com tempo de retorno do pulso muito pequeno (da ordem de nanosegundos).

Gomide (2001) afirma que, do ponto de vista eletromagnético, o solo é considerado uma mistura de quatro composições dielétricas, consistindo de ar, volume do solo, da água ligada e da água livre. Uma molécula de água ligada ao solo interage com uma onda eletromagnética incidente, diferente daquela da molécula de água livre. Exibindo desse modo, um espectro de dispersão dielétrica que é muito diferente da água livre. As funções dielétricas na forma complexa de água livre e ligada são funções de frequência eletromagnética  $f$ , da temperatura física  $T$  e da salinidade  $S$ . Para Hallikainen et al. (1985) a constante dielétrica do solo misturado fica, em geral, em função das  $f$ ,  $T$ ,  $S$ , da umidade volumétrica total  $\theta_v$ , da fração relativa de água livre e água ligada, a qual está relacionada à

características do solo como área de superfície por unidade de volume, densidade, formato das partículas e da forma da absorção da água.

Segundo Gomide (2001), um solo úmido deve ser caracterizado pela dependência da frequência como função de resposta da permissividade dielétrica complexa, conforme equação 08.

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_r(\omega) - j \varepsilon_i(\omega) \quad (08)$$

onde:

$\varepsilon(\omega)$  – permissividade complexa (total);

$\varepsilon_r(\omega)$  – permissividade real;

$\varepsilon_i(\omega)$  – perda dielétrica;

$j$  – é a unidade imaginária;

$\omega$  – é a frequência angular.

Gomide (2001) comenta ainda que a função  $\varepsilon_r(\omega)$  é aproximadamente constante para  $\omega=0$ , fora, portanto da vizinhança da frequência de relaxação  $\omega_R$  dos dipolos no meio. O tempo associado a  $\omega_R$  é a constante de tempo para o decaimento da polarização, quando o campo elétrico está ausente. Ao redor de  $\omega_R$ , a função  $\varepsilon_r$  decai ainda na região do espectro visível e é igual ao índice de refração ao quadrado. A parte função-resposta dielétrica é uma medida da energia armazenada pelos dipolos alinhados por um campo eletromagnético aplicado. Quando a frequência é maior que  $\omega_R$ , os dipolos podem não acompanhar o campo e a capacidade do meio para armazenar energia do campo elétrico decai.

Herrmann (2001) ainda salienta que a função  $\varepsilon_i(\omega)$  é uma medida da taxa de energia dissipada no meio. Visualizando como uma função da frequência, e iniciando para um baixo  $\omega$ , este irá aumentar até um pico de  $\omega_R$  e depois disso decairá. Tal comportamento é devido aos dipolos permanentes no solo. Entretanto em frequências abaixo de  $\omega_R$ , o meio pode mostrar dispersão característica e regiões de absorção, devido à excitação

molecular direta. A frequência  $\omega_R$ , irá, geralmente, se encontrar na faixa de microondas, 18GHz na água.

Para Schumugge e Jackson (1980), em um solo, os valores das constantes dielétricas, K, são tipicamente entre 3 e 5. Na água, os valores de K estão em torno de 80, conforme o Quadro 01. Dessa forma, pequenas quantidades de água livre no solo irão afetar consideravelmente suas propriedades eletromagnéticas.

Quadro 01 – Material (fluidos e sólidos) e respectivas constantes dielétricas.

Material (Fluidos)	K (20-25 °C)	Material (Sólidos)	K (20-25 °C)
Água	80,4 – 78,5	Gelo (-12°C)	4,1 – 3,7
Etanol	24,3	Quartzo Fundido (SiO <sub>2</sub> )	3,78
Amônia	16,9	Solo Arenoso (seco)	2,55
Benzeno	2,29	Solo Argiloso (seco)	2,51
Acetona	20,7	PVC	2,89
Ar	1,0	Polietileno	2,25
CO <sub>2</sub> (líquido)	1,6	Teflon	2,1
CO <sub>2</sub> (gás)	1,001	Madeira (Douglas Fir)	1,90 – 1,95

Fonte: CRC Handbook of Chemistry and Physics (1993), von-Hippel (1955), citados por Or, D. et al. (2003).

Schumugge e Jackson (1980) afirmam ainda que, em baixos níveis de umidade existe um pequeno aumento de K com o teor de água no solo, mas acima de certo ponto, a declividade da curva varia acentuadamente. Tal comportamento é devido à água no solo. Quando a água é adicionada ao solo, torna-se fortemente ligada às partículas do solo. Nesse estado, as moléculas de água não são livres para se tornarem alinhadas, e as propriedades dielétricas são similares às propriedades dielétricas do gelo, para o qual, K = 3,5.

Segundo Gomide (2001), a camada de água ao redor das partículas do solo torna-se maiores, logo as ligações das partículas decaem devido à ausência de contato de superfície; e as moléculas de água se comportam como se estivessem no estado líquido. Portanto, ocorre uma maior declividade na curva que relaciona constante dielétrica com teor de água para maiores valores do teor de água no solo. A umidade do solo  $\theta_v$  nesta transição depende da textura do solo, isto é, da distribuição do tamanho de partículas. Desta forma, os autores comentaram que estudos relacionando a variação da frequência à umidade

volumétrica, mostram que a sensibilidade da medida aumenta com o aumento da frequência, de 1,4 GHz a 18 GHz.

Para Hermmann et al. (1986) um dos aspectos interessantes na utilização de ondas eletromagnéticas, na faixa de microondas, para a medida de umidade do solo, 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 água em um meio poroso. O fenômeno da reflexão através de medidas com o TDR consiste no espalhamento de microondas para estudo da constante dielétrica de um meio poroso.

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 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 água no solo.

Para Biscegli et al. (1996) a constante dielétrica é calculada a partir da medida do tempo que um pulso eletromagnético leva para transitar (ida e volta), por duas ou mais hastes metálicas, que funcionam como guias de onda e que são introduzidas no solo.

Considerando  $K$ , a constante dielétrica relativa do meio (adimensional),  $c$  a velocidade de propagação da luz ( $c=3.10^8$  m/s),  $V_p$  a velocidade de propagação da onda eletromagnética (m/s),  $L$  o comprimento das hastes (m) e  $t$  o tempo de trânsito (s), pode-se estabelecer as equações 09 e 10.

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{k}} \quad (09)$$

onde:

$c$  - velocidade da luz ( $c=3.10^8$  m/s).

A equação 10 é obtida reorganizando a equação 11 e isolando a constante dielétrica relativa,  $K$ .

$$K = \left( \frac{c \cdot t}{2 \cdot L} \right)^2 \quad (10)$$

#### 4.8.1 Princípio físico da reflectometria no domínio do tempo (TDR)

A explicação do princípio físico da reflectometria no domínio do tempo é apresentada seguindo o mesmo raciocínio dedutivo adotado por Tommaselli (1997). Contudo, informações mais detalhadas podem ser obtidas em Von Hippel (1958).

Desta forma, consideremos um pulso eletromagnético oferecendo uma tensão  $V$  para um intervalo de tempo tendendo a zero através de um capacitor ideal com capacitância  $C_o$ . A quantidade de carga elétrica a ser armazenada por este capacitor pode ser determinada pela equação 11.

$$Q = C_o \cdot V \quad (11)$$

Considerando um capacitor ideal de placas paralelas com área  $A$  e distantes entre si de uma medida  $d$ , tem capacitância estabelecida conforme a equação 12:

$$C_o = \frac{A}{d} \cdot \epsilon_o \quad (12)$$

onde,  $\epsilon_o$  representa a permissividade do vácuo, cujo valor é  $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$ .

Todavia, se um capacitor possuir algum material dielétrico entre suas placas, o mesmo oferecerá uma capacitância  $C$ , conforme a equação 13.

$$C = \frac{A}{d} \cdot \varepsilon \quad (13)$$

onde  $\varepsilon$  representa a permissividade do material dielétrico.

À medida que houver um acréscimo do material dielétrico entre as placas, haverá também um aumento da carga elétrica, proporcionando um aumento da capacitância  $C$ .

Empregando as equações 12 e 13, pode-se estabelecer a equação 14, a qual traduz uma relação entre as constantes dielétricas do material em função das capacitâncias  $C_0$ , para um capacitor ideal e  $C$ , para um capacitor com material dielétrico entre suas placas:

$$C = C_0 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = k \cdot C_0 \quad (14)$$

onde  $k$  representa a relação entre as constantes, sendo denominado constante dielétrica relativa, sendo adimensional.

Ao aplicar uma tensão, ou diferença de potencial, de corrente alternada, verifica-se um comportamento senoidal num tempo  $t$ , conforme a equação 15.

$$V = V_0 \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t} \quad (15)$$

onde  $\omega$  é a frequência angular, em rad/s,  $V_0$  é a amplitude da senoidal, em volts, e  $J$  é o argumento complexo. Esta diferença de potencial favorecerá uma corrente de carga do capacitor  $I_C$ , a qual representa a taxa de variação temporal da carga armazenada no capacitor verificada na equação 16 e apresentará uma defasagem de  $90^\circ$  em relação à tensão aplicada:

$$I_C = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(C_0 \cdot V)}{dt} = \frac{d(C_0 \cdot V_0 \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t})}{dt} = j \cdot \omega \cdot C_0 \cdot V \quad (16)$$

Considerando que o solo ao preencher um capacitor fica descaracterizado como um isolante perfeito, proporcionando uma corrente de condução

elétrica denominada corrente de perda ou ôhmica,  $I_p$ , a qual mantém sua proporcionalidade à condutância  $G$  do material e à tensão  $V$  aplicada, incluindo a mesma fase, conforme a equação 17 demonstra:

$$I_p = G \cdot V \quad (17)$$

Pelas equações 16 e 17 pode-se estabelecer a corrente total,  $I_T$ , conforme a equação 18:

$$I_T = I_C + I_p = G \cdot V + j \cdot \omega \cdot C_o \cdot V = V \cdot (G + j \cdot \omega \cdot C_o) \quad (18)$$

Verificando a equação 18, temos que a corrente total pode ser interpretada como uma variável complexa tendo uma componente real, fator  $(G \cdot V)$  e outra imaginária, fator  $(j \cdot \omega \cdot C_o \cdot V)$ . Esta formulação ilustra uma relação entre as duas componentes conforme mostra a Figura 05.

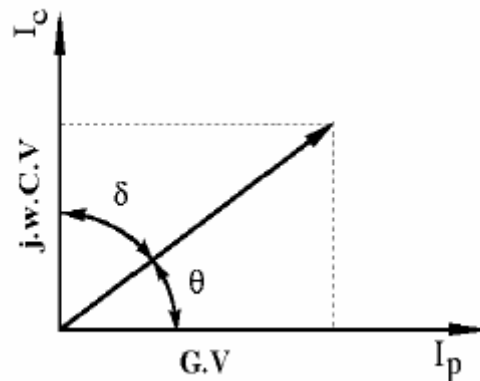


Figura 05. Relação de um capacitor contendo um material dielétrico com perdas.

Pode-se extrair um parâmetro muito empregado em eletrônica, conhecido como fator de dissipação  $D$  ou tangente de perda,  $tg \delta$ , conforme a equação 19:

$$D = \operatorname{tg} \delta = \frac{\text{energia perdida}}{\text{energia armazenada}} = \frac{\text{corrente de perda}}{\text{corrente de carga}} = \frac{G \cdot V}{w \cdot C_o \cdot V} = \frac{G}{w \cdot C_o} \quad (19)$$

Segundo Von Hippel, 1958, a corrente de perda pode ser devido a algum processo de consumo de energia, como por exemplo, a fricção resultante da orientação dos dipolos e não devida apenas às perdas condutivas. Desta forma, tornou-se conveniente expressar a permissividade do material em duas componentes; uma complexa e outra real, conforme a equação 20, da mesma forma que se expressou a corrente total.

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j \cdot \varepsilon'' \quad (20)$$

onde  $\varepsilon^*$  é a permissividade complexa,  $\varepsilon'$  é a permissividade real e  $\varepsilon''$  é a perda dielétrica.

Realizando a troca da permissividade do dielétrico pela sua permissividade complexa ( $\varepsilon = \varepsilon^*$ ) e combinando as equações 14 e 15, teremos a equação 21, a qual expressa a corrente total  $I_T$ :

$$I_T = j \cdot w \cdot C \cdot V = j \cdot w \cdot \frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_o} \cdot C_o \cdot V \quad (21)$$

O fator  $\varepsilon^*$  proporciona que a corrente total tenha duas componentes, conforme a formulação inicial. Assim, combinando as equações 20 e 21, a corrente total poderá ser expressa pela equação 22, conforme abaixo.

$$I_T = j \cdot w \cdot \left( \frac{\varepsilon' - j \cdot \varepsilon''}{\varepsilon_o} \right) \cdot C_o \cdot V = (j \cdot w \cdot \varepsilon' + w \cdot \varepsilon'') \cdot \left( \frac{C_o \cdot V}{\varepsilon_o} \right) \quad (22)$$

Considerando que o interesse do estudo se atém a permissividade relativa, pode-se estabelecê-la conforme a equação 23.

$$k^* = k' - j \cdot k'' = \frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_0} \quad (23)$$

onde  $k^*$  é a permissividade relativa complexa do meio,  $k' = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon_0}$  é a permissividade relativa real

e  $k'' = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon_0}$  é o fator de perda dielétrica. Pode-se expressar a equação 22, substituindo as

constantes relativas, conforme a equação 24.

$$I_T = j \cdot w \cdot \left( \frac{\varepsilon'}{\varepsilon_0} - j \cdot \frac{\varepsilon''}{\varepsilon_0} \right) \cdot C_o \cdot V = j \cdot w \cdot (k' - j \cdot k'') \cdot C_o \cdot V = j \cdot w \cdot k^* \cdot C_o \cdot V \quad (24)$$

O fator de dissipação D pode ser definido pela equação (25), conforme abaixo.

$$D = \operatorname{tg} \delta = \frac{k''}{k'} = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (25)$$

Caso o material seja transferido do campo elétrico do capacitor para o campo magnético de uma bobina, a tensão alternada V induz na bobina uma corrente de magnetização  $I_m$  de acordo com a lei de indutância de Faraday, conforme a equação 26.

$$\frac{dI_m}{dt} = \frac{V}{L} \quad (26)$$

onde L é a indutância do material da bobina, que está relacionada com a indutância geométrica  $L_o$ , do vácuo, conforme a equação 27:

$$L = L_o \cdot \left( \frac{\mu}{\mu_o} \right) = L_o \cdot k_m \quad (27)$$

onde  $\mu$  é a permeabilidade magnética do material dielétrico e  $\mu_o$  é a permeabilidade magnética do vácuo. Estabelecendo-se a razão entre  $\mu$  e  $\mu_o$  obtemos a constante  $k_m$ , conforme a equação 28.

$$k_m = \frac{\mu}{\mu_o} \quad (28)$$

lembrando que  $\mu_o = 1,257 \cdot 10^{-6}$  Henry.m<sup>-1</sup> ou ainda,  $\mu_o = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  T.m.A<sup>-1</sup>.

A equação 29 resulta da combinação das equações 25 e 26 indicando a intensidade da corrente de magnetização  $I_m$ , a qual apresenta uma defasagem de 90° em relação à tensão aplicada.

$$I_m = \frac{V}{j \cdot w \cdot L} = -j \cdot \frac{V}{w \cdot L_o \cdot k_m} \quad (29)$$

Quanto ao enrolamento da bobina, a qual apresenta uma resistência elétrica  $R$ , verifica-se uma componente ôhmica  $V/R$ . Também surge em fase com  $V$ , uma corrente de perda magnética,  $I_p$ , devido a dissipação de energia durante o ciclo de magnetização. Esta perda magnética é admitida através da introdução da permeabilidade complexa  $\mu^*$ , conforme a equação 303.

$$\mu^* = \mu' - j \cdot \mu'' \quad (30)$$

onde  $\mu'$  representa a parte real da permeabilidade magnética complexa e  $\mu''$  representa o fator de perda magnética. A equação 34 estabelece a permeabilidade complexa relativa  $k_m$ .

$$k_m = \frac{\mu^*}{\mu_o} = k_m' - j \cdot k_m'' \quad (31)$$

onde  $k_m'$  representa a permeabilidade relativa real e  $k_m''$  representa o fator de perda magnética relativa, demonstrando uma completa analogia com o caso elétrico.

A equação 32 apresenta a corrente total de magnetização  $I$  escrita a partir da corrente de magnetização e a corrente de perda magnética.

$$I = I_m + I_p = \frac{-j \cdot V \cdot (\mu' + j \cdot \mu'')}{w \cdot \left(\frac{L_o}{\mu_o}\right) \cdot [(\mu')^2 + (\mu'')^2]} \quad (32)$$

Sabendo-se que a determinação da permissividade relativa do meio dielétrico depende da velocidade de propagação do pulso eletromagnético, torna-se interessante estabelecer algumas informações preliminares para se determinar esta velocidade. As equações 33 e 34 estabelecem as soluções das equações ondulatórias do campo magnético, supondo-se que os campos elétrico  $E$  e magnético  $H$  sejam apenas função do tempo  $t$  e da distancia de propagação  $x$ , são dadas pelas ondas planas:

$$E = E_o \cdot e^{j \cdot \omega t - \gamma \cdot x} \quad (33)$$

$$H = H_o \cdot e^{j \cdot \omega t - \gamma \cdot x} \quad (34)$$

onde  $E_o$  e  $H_o$  são as amplitudes iniciais dos campo elétrico e magnético, respectivamente e  $\gamma$  representa o fator complexo de atenuação.

Tendo em vista que as ondas oscilam periodicamente com uma frequência  $f = \frac{\omega}{2\pi}$  e propagam-se através do espaço na direção  $x$ , verifica-se o fator complexo de atenuação  $\gamma$  ilustrado pela equação 35.

$$\gamma = \alpha + j \cdot \beta \quad (35)$$

onde  $\alpha$  representa o fator de atenuação e  $\beta$  representa o fator de fase da onda.

Segundo Von Hippel (1958), o fator de fase determinante no equacionamento da velocidade  $v$  da onda, definida conforme a equação 36.

$$v = \frac{dx}{dt} = f \cdot \lambda = \frac{\omega}{\beta} \quad (36)$$

A equação 37 estabelece o índice de refração  $n$ , a qual leva em consideração a propagação de uma onda eletromagnética num meio com perdas.

$$n = \frac{\lambda_o}{\lambda} \quad (37)$$

onde  $\lambda_o$  representa o comprimento de onda no vácuo e  $\lambda$  representa o comprimento de onda no meio estudado.

A equação 38 apresenta a velocidade  $c$  de uma onda eletromagnética propagando-se no vácuo.

$$c = \lambda_o \cdot f = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_o \cdot \mu_o}} \quad (38)$$

Em meios com perdas, o comprimento de onda fica menor e a velocidade de fase  $v$  aumenta, conforme a equação 39.

$$n = \frac{\lambda_o}{\lambda} = \frac{c}{v} = \frac{c}{w} \cdot \beta \quad (39)$$

Segundo Von Hippel (1958), o fator de fase  $\beta$  é dado pela equação 40.

$$\beta = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} = \omega \cdot \left\{ \frac{\varepsilon' \cdot \mu' - \varepsilon'' \cdot \mu''}{2} \cdot \left[ 1 + \sqrt{1 + \left( \frac{\varepsilon' \cdot \mu'' + \varepsilon'' \cdot \mu'}{\varepsilon' \cdot \mu' + \varepsilon'' \cdot \mu''} \right)^2} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (40)$$

Considerando-se como meio dielétrico os solos, madeira, enfim, meios porosos, onde em sua grande maioria apresentam perdas magnéticas desprezíveis, temos  $\mu'' \approx 0$ , logo a equação 40 pode ser reescrita pela equação 41, conforme abaixo.

$$\beta = \omega \cdot \left\{ \frac{\varepsilon' \cdot \mu'}{2} \cdot \left[ 1 + \sqrt{1 + \left( \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (41)$$

Combinando as equações 25 com 41, obtém-se a equação 42.

$$\beta = \omega \cdot \left\{ \frac{\varepsilon' \cdot \mu'}{2} \cdot \left[ 1 + \sqrt{1 + tg^2 \delta} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (42)$$

Assim, para meios com perdas magnéticas desprezíveis, pode-se estabelecer a equação 43.

$$\lambda = \frac{1}{f} \cdot \frac{1}{\left\{ \frac{\varepsilon' \cdot \mu'}{2} \cdot \left[ 1 + \sqrt{1 + tg^2 \delta} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (43)$$

Logo, o índice de refração fica estabelecido pelas equações 44 ou 45, conforme abaixo.

$$n = \frac{\lambda_o}{\lambda} = \frac{\frac{1}{f} \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_o \cdot \mu_o}}}{\frac{1}{f} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \varepsilon_o \cdot \mu_o \cdot (1 + \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta})}}} \quad (44)$$

$$n = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\varepsilon'}{\varepsilon_o} \cdot \frac{\mu'}{\mu_o} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot (1 + \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta})^{\frac{1}{2}} \quad (45)$$

Conforme Topp et al. (1980), Roth et al. (1990), Dasberg e Hopmans (1992), sabe-se que a maioria dos meios porosos como, solos, madeiras, entre outros, apresentam permeabilidade magnética próxima à do vácuo, ou seja,  $\mu' \approx \mu_o$ . Desta forma, pode-se estabelecer a equação 46, conforme segue.

$$n = \left( \frac{1}{2} \cdot k' \right)^{\frac{1}{2}} \cdot (1 + \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta})^{\frac{1}{2}} \quad (46)$$

Assim, por definição, temos a equação 47.

$$v = \frac{c}{n} = c \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot k' \cdot (1 + \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta}) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (47)$$

Em um dielétrico, as perdas ocorrem, basicamente, devido a condutibilidade dielétrica  $\sigma$ , resultante de materiais portadores de cargas livres e, também, à vibração ou rotação das moléculas  $\omega \cdot \varepsilon''$ . Desta forma, pode-se equacionar a tangente de perda, conforme a equação 48.

$$tg\delta = \frac{\text{energia perdida}}{\text{energia carregada}} = \frac{\omega \cdot \varepsilon'' + \sigma}{\omega \cdot \varepsilon'} = \frac{k'' + \frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon_0}}{k'} \quad (48)$$

De forma geral, a permeabilidade expressa a polarização do material submetido a um campo eletromagnético. Para baixas frequências, os íons podem se deslocar para os limites dos micro-domínios para gerar uma polarização extra, que pode ser maior que a permissividade dielétrica original. Para altas frequências, como a reflectometria de microondas, este efeito é praticamente nulo, ou seja, o termo  $\frac{\sigma}{\omega_0} \approx 0$ .

Considerando a água como fator preponderante, e as altas frequências, na ordem de GHz, o fator de perda relativa  $k''$  é praticamente nulo, conforme Von Hippel (1958). Desta forma, teremos uma tangente de perda desprezível, o que permite reescrever a equação 47 segundo a equação 49.

$$v = c \cdot (k')^{-\frac{1}{2}} \quad (49)$$

Desta forma, se  $k'' \approx 0$ , pode-se considerar  $k^* \approx k'$  e, assim, a permissividade relativa complexa do solo poderá ser obtida através de uma única medida: a velocidade de propagação de um pulso eletromagnético.

Considerando um meio poroso como material dielétrico a ser medido, deve-se lembrar que ele é constituído de três componentes: partículas sólidas ( $k^s=1,9$  a  $1,95$ ), o ar contido nos poros ( $k^a=1$ ) e o conteúdo de água ( $k^w=81$ ). Logo a velocidade do pulso aplicado será função de uma proporção entre estes três constituintes e neste caso, define-se uma única permissividade relativa global, também denominada aparente, conforme a equação 50.

$$k = \left( \frac{c}{v} \right)^2 \quad (50)$$

Mas, na prática, a reflectometria de microondas é efetuada no domínio temporal, ou seja, mede-se apenas o tempo  $t$  de tráfego do pulso ao longo das hastes metálicas de comprimento  $L$  inseridas num meio poroso e, assim, define-se a equação 51, conforme abaixo.

$$k = \left( \frac{c \cdot t}{2 \cdot L} \right)^2 \quad (51)$$

Considerando que o tempo de medida se refere à ida e volta (reflexão), ao final, o pulso eletromagnético terá percorrido uma distância percorrida  $2L$ .

Roth et al. (1990), estabelece que a permissividade relativa de um meio poroso (o solo, por exemplo) poderá ser determinada por um sinal de TDR, conforme a equação 52.

$$k = \frac{t^2}{\mu} \cdot \left( \frac{c}{2 \cdot L} \right)^2 \quad (52)$$

onde, o parâmetro  $\mu$  representa a permeabilidade magnética em um meio poroso, que será função do conteúdo de materiais magnéticos neste meio. O autor ainda esclarece que o valor de  $\mu$  é igual à unidade, para a grande maioria dos meios porosos, observando apenas sua importância quando o meio possuir altos teores de materiais ferromagnéticos.

#### 4.8.2. O modelo de Topp

Topp et al. (1980) obtiveram um modelo empírico onde a constante dielétrica (K) se relaciona com o teor de água ( $\theta$ ) no solo segundo a equação 53.

$$\theta = -5,3 \cdot 10^{-2} + 2,92 \cdot 10^{-2} K - 5,5 \cdot 10^{-4} K^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} K^3 \quad (53)$$

onde:

$\theta$  - teor de água no solo (%);

K - constante dielétrica relativa do solo (Adimensional).

Na Figura 06, observa-se: 1) Testador de cabos modelo TDR, marca Tektronix, modelo 1502B. 2) Forma gráfica da onda representada no TDR. 3) Modelo de sonda com 3 hastes metálicas. (Jones et al., 2002).

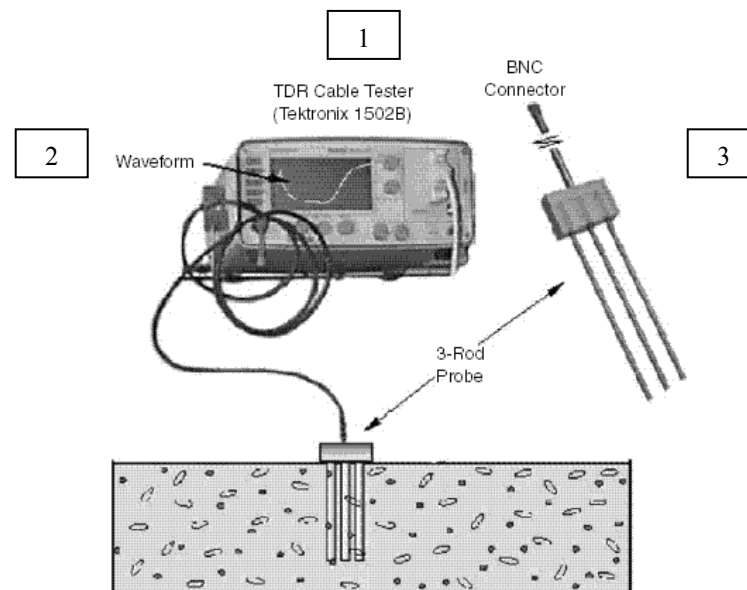


Figura 06. Modelo de equipamento tipo TDR para determinação do teor de água no solo.

Embora a sonda a ser utilizada neste projeto seja uma de hastes paralelas, segundo Vaz (2001) e Vaz e Hopmans (2001), existem outras geometrias possíveis como, por exemplo, o modelo serpentina, onde fios são enrolados numa placa de acrílico.

A Figura 07, mostra, segundo Jones et al. (2002), alguns modelos de hastes para a determinação do teor de água no solo.

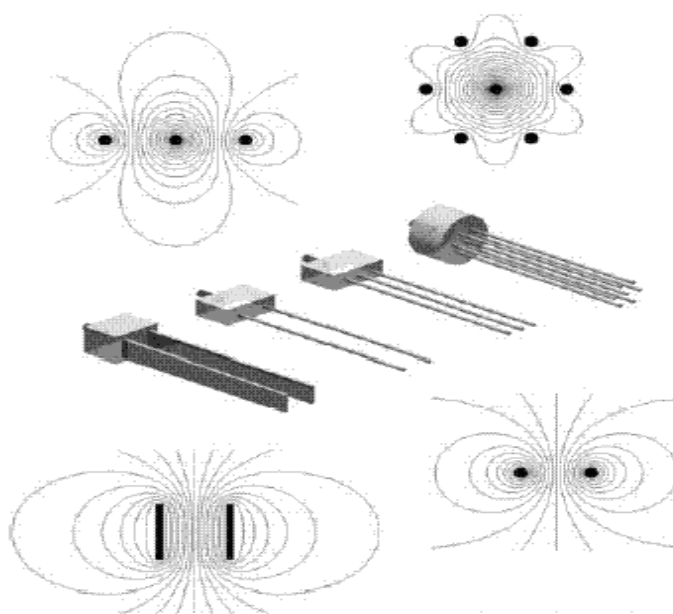


Figura 07. Representação das Linhas de Campo referentes a 4 modelos de hastes para o TDR.(Jones et al. 2002).

Outros modelos de hastes permitem acrescentar variações quanto à sua geometria, permitindo assim, analisar o comportamento da umidade ao longo do perfil do solo, conforme a Figura 08; bem como avaliar, por exemplo, o bulbo molhado, conforme a Figura 09.

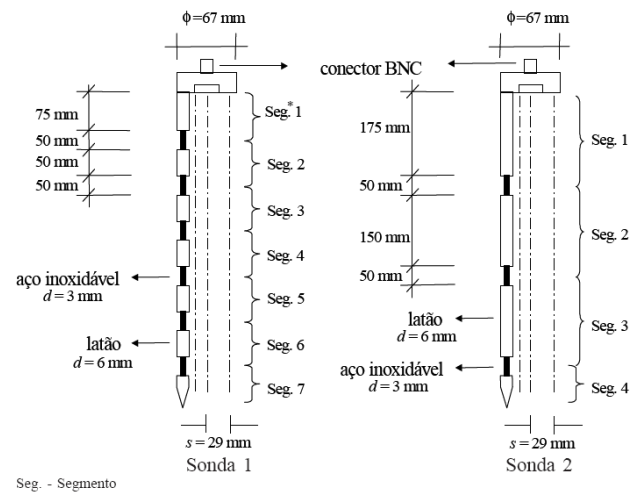


Figura 08. Haste segmentada para emprego da TDR. Os segmentos permitem a obtenção da umidade em diversas cotas do perfil analisado. (Souza & Matsura, 2002).

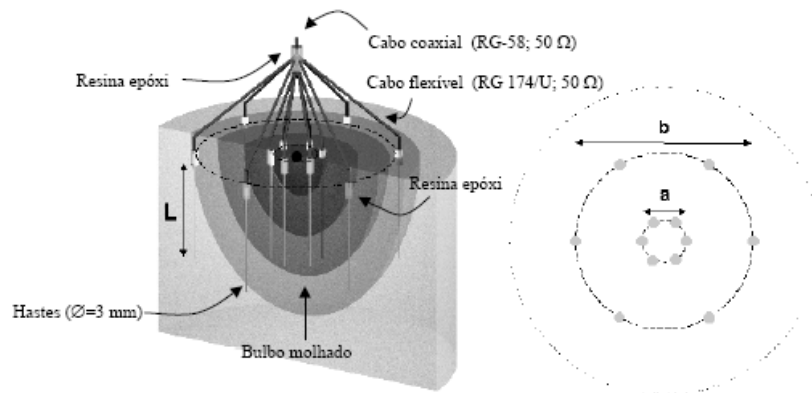


Figura 09. Modelo de sonda com hastes separadas. Com esta configuração geométrica, podem-se estabelecer estudos sobre a determinação do bulbo molhado (Souza & Matsura, 2002).

### 4.8.3 Circuito eletrônico de um TDR

Segundo Engdahl (2006) pode-se empregar a técnica TDR utilizando um osciloscópio com frequência acima de 80 MHz e um circuito gerador de sinal, conforme a Figura 10. A Figura 11 ilustra o circuito eletrônico.

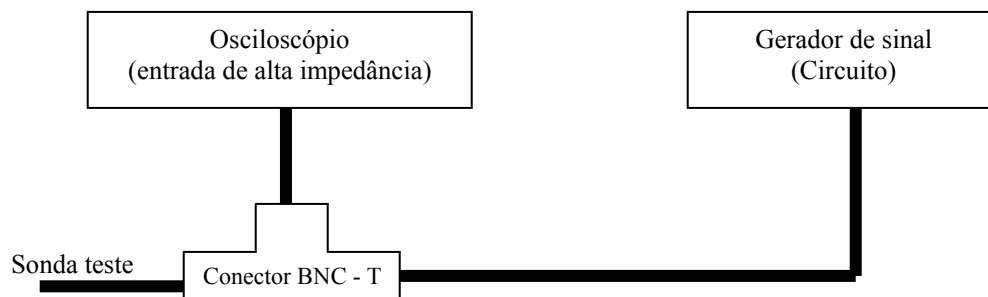


Figura 10. Representação da conexão osciloscópio – circuito.

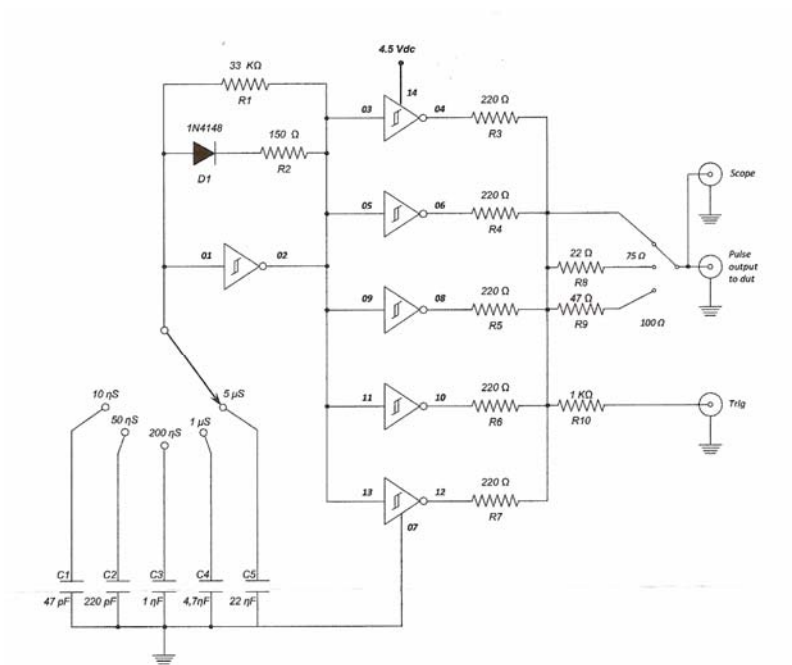


Figura 11. Circuito eletrônico de um reflectômetro para emprego da técnica TDR.

## 4.9 Aspectos da calibração da TDR

Nestes próximos tópicos que versam sobre os aspectos da calibração para a TDR, optou-se por desenvolver uma abordagem um tanto resumida, porém sem perder a fundamentação necessária para o perfeito entendimento. Uma abordagem completa de ser obtida em Tommaselli (1997).

### 4.9.1 Modelos empíricos

Sabe-se que o número dielétrico (ou permissividade relativa) de um determinado material tem alguma dependência da frequência eletromagnética. O intervalo de frequência mais sensível para a determinação da umidade do solo, a partir das permissividades relativas dos componentes do solo úmido, fica entre 50 MHz e 10 GHz. À frequência de 1 GHz e temperatura de 20°C, a permissividade relativa da água é 80,4. Para a maioria dos solos minerais é entre 3 e 5 e do ar é 1 (ROTH et. al., 1990).

Aparentemente, esta grande disparidade entre as permissividades relativas da água e dos demais constituintes do solo torna o método dielétrico insensível à composição e textura do solo.

De acordo com TOPP et al. (1980), as variáveis que afetam a resposta dielétrica do solo são: textura, estrutura, quantidade de sais solúveis, umidade, temperatura, densidade e a frequência eletromagnética do sinal da medida. Estes autores consideram que, para frequências entre 1 e 20 GHz (frequências da reflectometria de microondas), a única variável que afeta a resposta dielétrica do solo é sua umidade, com um peso relativo de cerca de 93%. Um dos principais problemas da técnica da reflectometria de microondas é a sua calibração. As pesquisas a respeito deste tema têm demonstrado que há uma procura de um modelo universal de calibração (TOPP & DAVIS, 1985; DIRKSEN & DASBERG, 1993 e muitos outros).

Outro problema da calibração dos equipamentos de TDR é a composição atípica de alguns solos. Conforme ROTH et al. (1992) há variações na curva de

calibração para solos que apresentam maior susceptibilidade aos campos magnéticos, como por exemplo os solos com altos teores de Óxidos de Ferro. Esses autores, estudando dois solos do Paraná, com teores de óxidos de ferro perto de 2,5%, detectaram um pequeno incremento da permeabilidade magnética, mas concluíram que as variações observadas na curva de calibração poderiam estar antes de tudo, associadas ao aumento da superfície específica e, por conseguinte, do conteúdo de água adsorvida.

Até o presente, têm sido usados três tipos de abordagem na formulação dos modelos das curvas de calibração, conforme passamos a descrever nos tópicos a seguir.

O primeiro tipo de abordagem é empírico, ou seja, as relações funcionais entre o conteúdo volumétrico de água do solo e a permissividade relativa aparente são selecionadas apenas em função de sua flexibilidade matemática em ajustar os pontos fornecidos pelos dados experimentais a uma curva. Não se fornece, em nenhum momento, uma justificativa física para o modelo encontrado. WOBSCHALL (1977) adotou uma equação polinomial de segunda ordem para relacionar a permissividade relativa aparente do solo  $k$  com o conteúdo volumétrico de água do solo  $\theta$ , conforme a equação 54.

$$k = a + b \cdot \theta + c \cdot \theta^2 \quad (54)$$

onde  $a$ ,  $b$  e  $c$  são constantes empíricas de ajuste.

TOPP et al. (1980), partindo do princípio de que a permissividade relativa aparente era função apenas do conteúdo de água do solo, determinaram que a relação entre estas duas variáveis era melhor representada por uma equação polinomial cúbica, conforme a equação 55.

$$k = a + b \cdot \theta + c \cdot \theta^2 + d \cdot \theta^3 \quad (55)$$

onde  $a = 3,03$ ,  $b = 9,3$ ,  $c = 146$  e  $d = 76,7$  são constantes empíricas de ajuste desenvolvido com dados de onze solos estudados por estes autores.

Esta equação de TOPP et al. (1980) tem sido amplamente utilizada e citada nos estudos de calibração de equipamentos de TDR (PATTERSON & SMITH, 1981; DALTON & VAN GENUCHTEN, 1986, ZEGELIN et al., 1989 e muitos outros), tendo sido, inclusive, chamada por muitos pesquisadores como equação universal.

Contudo, conforme mencionado pelos próprios autores e por muitos outros, sua validade não foi demonstrada para todos os intervalos possíveis de conteúdo de água e de porosidade dos solos. A vantagem deste tipo de modelo é que ele não exige a determinação de parâmetros adicionais do solo e tem fornecido bons resultados, exceto em casos específicos de solos heterogêneos, com altos teores de matéria orgânica ou de sais, conforme relato de vários estudos, entre eles o de HERKELRATH et al. (1991), mostrando que a permissividade relativa aparente dos solos estava relacionada, também, com o conteúdo de matéria orgânica.

Outro efeito que TOPP et al. (1980) consideravam desprezível, era o efeito da textura do solo nas relações entre a permissividade relativa aparente e o conteúdo de água dos solos mas que, segundo os estudos mais recentes de DOBSON et al. (1985), ROTH et al. (1990) e de DASBERG & HOPMANS (1992) este efeito não deve ser desprezado em todos os casos, principalmente nos solos de textura mais fina.

Outra abordagem, também empírica, tem sido tentada por alguns pesquisadores, a fim de melhorar a curva de calibração dando-lhe um caráter mais geral, introduzindo-se os parâmetros da análise granulométrica, conforme o estudo de HALLIKAINEN et al. (1985), representado pela equação 56.

$$k = (a_0 + a_1 \cdot S + a_2 \cdot C) + (b_0 + b_1 \cdot S + b_2 \cdot C) \cdot \theta + (c_0 + c_1 \cdot S + c_2 \cdot C) \cdot \theta^2 \quad (56)$$

onde  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $c_0$ ,  $c_1$  e  $c_2$  são os coeficientes do ajuste, S é o conteúdo de areia e C é o conteúdo de argila.

#### 4.9.2 Modelos semi-empíricos

No segundo tipo de abordagem, a forma funcional da equação de calibração é derivada de modelos dielétricos mistos, que relacionam a permissividade relativa aparente (ou número dielétrico composto ou aparente) de uma mistura polifásica (solo) com as permissividades relativas de seus constituintes e suas respectivas frações volumétricas, com base nas suposições dos vários arranjos geométricos destes constituintes, que são estimados por um parâmetro empírico que representa a geometria do solo em relação ao campo eletromagnético aplicado (TINGA et al., 1973 e ROTH et al., 1990). Este parâmetro empírico, denominado, geralmente por  $a$ , representa, também, um fator de forma da curva ajustada.

Este tipo de abordagem recebe o nome de semi-empírica e as determinações dos parâmetros deste tipo de modelo tem sido amplamente estudadas, tanto no aspecto prático das medidas do tempo de trânsito do pulso de voltagem do equipamento de TDR (BIRCHAK et al., 1974), como no aspecto estatístico da modelagem de solos úmidos (ANSOULT et al., 1985) e no aspecto da calibração (DOBSON et al., 1985; DASBERG & HOPMANS, 1992 e DIRKSEN & DASBERG, 1993).

A formulação destes modelos pode ser estipulada a partir do número de fases que se estabelecer para a mistura polifásica. Para o caso específico dos solos, a literatura mostra 3 tipos de modelos. TINGA et al. (1973) consideraram o solo como um meio estratificado bifásico, com permissividades relativas (ou números dielétricos)  $k_1$  e  $k_2$  e frações volumétricas  $V_1$  e  $V_2$ , respectivamente, representando o material sólido do solo e o conteúdo de água do solo. A permissividade relativa aparente  $k$  (ou número dielétrico composto) é dada pela equação 57.

$$k = (V_1 \cdot k_1^\alpha + V_2 \cdot k_2^\alpha)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (57)$$

onde  $\alpha = 1$ , se o campo elétrico for paralelo ao sentido de estratificação do solo e  $\alpha = -1$ , se perpendicular. Segundo esses pesquisadores, o valor encontrado para  $\alpha$  em seus estudos é 0,5, de onde eles concluíram que, na média, o solo está aleatoriamente estratificado. Ainda, segundo ANSOULT et al. (1985), o parâmetro  $\alpha$  resume a geometria do meio em relação ao campo eletromagnético aplicado.

A abordagem bifásica, considerada fraca, foi rapidamente substituída pela trifásica, onde a terceira fase passa a ser o ar. TINGA et al. (1973) e BIRCHAK et al. (1974) consideraram o solo como uma mistura dielétrica de três fases: água, ar e sólidos do solo e formularam o seguinte modelo conforme a equação 58.

$$k^\alpha = \theta \cdot k_w^\alpha + (1 - \varphi) \cdot k_s^\alpha + (\varphi - \theta) \cdot k_a^\alpha \quad (58)$$

onde  $\varphi$  é a porosidade e os índices w, s, e a referem-se à água, solo e ar, respectivamente.

Os estudos de ROTH et al. (1990) e de DIRKSEN & DASBERG (1993) mostram que, para estes modelos trifásicos,  $\alpha = 0,5$ , para os solos por eles estudados.

DOBSON et al. (1985) observaram que a água adsorvida apresentava um comportamento dielétrico distinto do da água livre e, assim, substituíram no modelo semi-empírico a fase aquosa por duas fases distintas: a água adsorvida e a água livre, conforme a equação 59.

$$k^\alpha = \theta_{bw} \cdot k_{bw}^\alpha + (\theta - \theta_{bw}) \cdot k_{fw}^\alpha + (1 - \varphi) \cdot k_s^\alpha + (\varphi - \theta) \cdot k_a^\alpha \quad (59)$$

onde os índices bw e fw se referem à água adsorvida e à água livre, respectivamente.

O valor de  $\theta$  oscila em torno de 0,65 para os solos estudados por DOBSON et al. (1985) e DIRKSEN & DASBERG (1993).

A proposta deste tipo de modelo surgiu baseada na suposição da influência da textura sobre o valor da permissividade relativa aparente dos solos, criando a quarta fase: a água adsorvida. Segundo DOBSON et al. (1985) e ROTH et al. (1990) o problema básico da introdução desta fase da água adsorvida é a determinação precisa do seu valor. Pouco se conhece sobre a permissividade relativa da água adsorvida.

Esses autores tentaram várias aproximações, entre elas adotar a permissividade da salmoura ou do gelo como sendo a da água adsorvida. Contudo, em seus estudos, os modelos mostraram que as respostas poderiam ser melhores se fossem adotados outros valores. Alguns solos dos estudos desses autores apresentaram valores de permissividade relativa da água adsorvida oscilando de 3,2 a 40, se considerado o critério de melhor resposta do modelo.

A medida do conteúdo da água adsorvida é relativamente complicada e, por isso, costuma-se estimá-lo. DIRKSEN & DASBERG (1993) propõem como seu estimador, o valor da superfície específica SE ou o conteúdo de água higroscópica. Por outro lado, esses autores mostram que a determinação da permissividade relativa da água adsorvida pode ser determinada juntamente com o ajuste dos modelos semi-empíricos.

Um dos estudos mais recentes sobre a calibração de um equipamento de TDR (DASBERG & HOPMANS, 1992), mostra que o modelo de TOPP et al. (1980) não é o que melhor se ajusta aos dados experimentais e sim, o modelo da mistura dielétrica de quatro fases e, por esse motivo, eles recomendam o uso do modelo de quatro fases nos dados de calibração.

Segundo ROTH et al. (1990), os modelos de quatro fases são válidos para as condições de campo e de laboratório e para intervalos de frequência entre 1 e 20 GHz.

#### **4.9.3 Modelos físicos**

O terceiro tipo de abordagem é puramente física e é baseada em derivações das equações de *Maxwell*, descrevendo o solo como uma mistura de quatro substâncias, com permissividades distintas, aleatoriamente distribuídas. A implementação deste modelo pressupõe que o solo é um sistema de quatro componentes, sendo que a fase sólida é representada por partículas em forma de placas, conforme a equação 60 mostrada por DOBSON et al. (1985).

$$k = \frac{3 \cdot k_s + 2 \cdot (\theta - \theta_{bw}) + (k_{fw} - k_s) + 2 \cdot \theta_{bw} \cdot (k_{bw} - k_s) + 2 \cdot (\varphi - \theta) \cdot (k_a - k_s)}{3 + (\theta - \theta_{bw}) + \left(\frac{k_s}{k_{fw}} - 1\right) + \theta_{bw} \cdot \left(\frac{k_s}{k_{bw}} - 1\right) + 2 \cdot (\varphi - \theta) \cdot \left(\frac{k_s}{k_a} - 1\right)} \quad (60)$$

Sendo que todos os parâmetros já foram anteriormente definidos.

Esse tipo de modelo foi utilizado por DIRKSEN & DASBERG (1993), estudando 11 tipos de solo, que concluíram que ele é superior a todos os demais aqui mencionados, principalmente para os solos mais heterogêneos. O modelo se comportou bem até quando o conteúdo de água estava próximo de 2/3 da saturação. A partir deste valor até a saturação, o modelo foi sofrível, o que, segundo os autores, se deve a uma restrição do modelo, que pressupõe que a fração volumétrica do meio deve ser maior que as outras frações, o que não ocorre com o solo saturado, principalmente os mais argilosos, quando as frações volumétricas de água e de sólidos do solo são semelhantes.

Observar que este tipo de formulação não apresenta nenhum parâmetro de ajuste. O único caso, que eventualmente pode demandar algum ajuste é a determinação da permissividade da água adsorvida, conforme já foi mencionado no item anterior.

Os modelos físicos fornecem outra vantagem adicional, que é o estabelecimento das formas das inclusões (TINGA et al., 1973), que neste caso são partículas de solo, o que permite a adoção de vários tipos de formulações em função destas. Isto é particularmente interessante se conhecermos a mineralogia do solo a se estudar.

#### 4.10 Potencial de uso da TDR

Há várias possibilidades de aplicações da reflectometria de microondas, mas a de maior utilidade, do ponto de vista agrônômico, é a determinação do conteúdo de água do solo, como mostram TOPP et al. (1980) e outros, e a determinação da condutibilidade elétrica dos solos, com vistas a avaliação da salinidade da solução do solo, conforme demonstram DALTON et al. (1984), DALTON & VAN GENUCHTEN (1986) e NADLER et al. (1991), entre outros.

A reflectometria de microondas já vem sendo aceita como mais uma alternativa para a medida do conteúdo de água do solo (HEINOVAARA & BOUTEN, 1990) e, com a popularização e baixo custo dos computadores, a técnica apresenta grande potencial de aplicações em situações de necessidade de automação do monitoramento simultâneo da umidade do solo em múltiplos pontos de estudo e, além disso, ela permite um grande número de repetições sobre um mesmo ponto.

DALTON et al. (1984) e DALTON & VAN GENUCHTEN (1986) mostraram que a interpretação correta dos traços do osciloscópio da sonda de TDR pode fornecer muitas informações sobre o comportamento dielétrico do solo. Os aplicativos gráficos atuais, aliado aos recursos dos computadores, são de grande ajuda neste aspecto.

HOKETT et al. (1992) usaram a técnica da TDR para quantificar o movimento de água nos materiais rochosos e afirmaram que a técnica apresenta as seguintes vantagens: (1) respostas imediatas às variações do conteúdo de água no solo; (2) sensibilidade restrita às regiões entre os cabos portadores dos pulsos; (3) possibilidades de automação, permitindo medições contínuas e em "tempo real"; (4) é adequada para uso em amostras de pequeno volume e (5) possibilidade de multiplexação. GRANTZ et al. (1990) estabeleceram protocolos de amostragem e técnicas de instalação e concluíram que o uso espaçado e ordenado das sondas de TDR é mais seguro e mais adequado para a automação de sistemas de aquisição de dados, quando comparado a métodos convencionais.

Esta técnica também encontrou bastante respaldo em estudos de água do solo de ambientes congelados (PATTERSON & SMITH, 1981 e RYDEN, 1986, entre

outros). Indistintamente, estes autores verificaram que a constante dielétrica relativa da água congelada era muito inferior à da água líquida.

As tentativas de DALTON et al. (1984) e de DASBERG & DALTON (1985) de uso da técnica de TDR para a medição de conteúdo de água em solos condutivos levou ao desenvolvimento de métodos para o uso de outros parâmetros da reflexão do sinal do equipamento de TDR para inferir sobre a condutibilidade elétrica aparente do solo simultaneamente à determinação do conteúdo de água do solo. Estes autores mostraram que o sinal refletido contém, além de informações sobre o tempo de trânsito do pulso, informações relativas à dissipação da energia eletromagnética que poderiam ser usadas para avaliar a condutibilidade elétrica média e, por conseguinte, a salinidade da água do solo.

Segundo Vaz et al. (2005), a condutividade elétrica pode ser estimada pela TDR a partir de uma função não linear tipo potência, conforme a equação 61.

$$CE_v = a\theta^n \quad (61)$$

onde:

$CE_v$  - Condutividade elétrica,  $dS.m^{-1}$ ;

$a$  - parâmetro que indica diretamente o valor da condutividade elétrica do extrato, adimensional;

$\theta$  - teor de água da amostra,  $m^3.m^{-3}$ ;

$n$  - parâmetro que indica o grau de linearidade do sistema, adimensional.

Outra aplicação recente, que vem se tornando cada vez mais corriqueira, é o uso da técnica de TDR para medidas do conteúdo de água e da condutibilidade elétrica em colunas de solo e/ou lisímetros (NADLER et al., 1991). É uma técnica que pode ser usada onde falhar as possibilidades dos métodos da sonda de nêutrons ou da atenuação de raios gama. De acordo com ANNAN (1977) a vantagem deste método é o baixo custo das sondas, a simplicidade e precisão da inserção dos eletrodos e a pequena perturbação da estrutura original do solo.

A medida do teor de água pelo equipamento de TDR pode ser feita usando sondas não invasivas, simplesmente colocando as hastes coladas em um anteparo, conforme mostra o estudo de SELKER et al. (1993). Assim a medida poderá ser feita apenas efetuando-se o contato entre o anteparo e a amostra. A vantagem imediata deste procedimento é a diminuição da amostra e a desvantagem é o menor tempo de percurso do pulso, uma vez que a resposta será função das constantes dielétricas do solo, úmido ou seco; do material do anteparo que, normalmente, é de um material dielétrico com permissividade relativa baixa e, por último, a medida efetuada estará medindo um sistema formado por cerca de 50% de solo e 50% de anteparo, o que reduz a sensibilidade da medida.

Uma das características mais atrativas da técnica da TDR é a sua habilidade de monitorar continua e simultaneamente o conteúdo de água do solo de vários locais. O sucesso deste procedimento está na habilidade desta técnica de se seguir, com grande precisão, as mudanças do balanço de água do solo. ZEGELIN et al. (1989) usaram esta metodologia, multiplexando várias sondas a um único aparelho de TDR e compararam seus dados com aqueles obtidos por lisímetros e pela razão de *Bowen*. Eles concluíram que a vantagem da técnica da TDR é a possibilidade de amostragens em intervalos de tempo, tão pequenos quanto alguns segundos. Mostraram que, para efeitos de balanço de água, torna-se desnecessária uma curva específica de calibração, sendo suficiente uma curva do tipo universal, como a de TOPP et al. (1980), porque nestes balanços o importante são as variações do conteúdo de água do solo e não o seus valores absolutos. Ainda, de acordo com ZEGELIN et al. (1989), existe a possibilidade da aplicação da técnica da TDR para outros materiais porosos, desde que estes materiais tenham condutibilidade elétrica baixa.

#### 4.11 Vantagens e desvantagens da TDR

Topp et al. (1980), Or et al. (2003) e Tomasselli (2001), notam as seguintes observações quanto a vantagens e desvantagens da técnica TDR: a técnica TDR quando utilizada para medir o teor de água no solo, supera outras técnicas indiretas em 1 ou 2% em termos de precisão; para solos conhecidos suas calibrações requeridas são mínimas; não dispõe de técnicas de radiação: emissão de nêutrons ou raios gama; possui uma excelente resolução espacial e temporal das análises; as medidas são obtidas sem maiores dificuldades, além de permitir uma automação para armazenagem de dados; não é uma técnica destrutiva; o equipamento tem um elevado custo; para solos desconhecidos é necessário efetuar calibração, o que vem a ser trabalhoso.

#### 4.12 Fatores de erro em medidas na TDR

Topp et al. (1980) mostraram que a constante dielétrica do meio em estudo é sensível a temperatura (283K – 309K), textura do solo (arenoso ou argiloso), densidade do solo (1140 a 1440 kg.m<sup>-3</sup>) e teor de sais solúveis (0,01 N Ca SO<sub>4</sub> ou 2000ppm de solução de NaCl).

Davis & Chudobiak (1975) encontraram um aumento de 10% na constante dielétrica para um incremento de 39K para a temperatura de solos arenosos e argilosos.

Para Look & Reeves (1982), as temperaturas entre 273 a 298K têm efeito mínimo sobre a constante dielétrica do solo, em confronto com Selig & Mansukhani (1975) e Rada et al. (1994), que encontraram efeito significativo para essa mesma faixa de temperatura. Segundo Zegelin et al. (1989), em situações onde podem ocorrer grandes flutuações de temperatura, a influência desta na constante dielétrica da água livre deve ser considerada. Em superfícies do solo onde a temperatura pode chegar a 323K, a correção da constante dielétrica da água é de quase 11%.

Segundo Dobson et al. (1985), Roth et al. (1990) e Dasberg & Hopmans (1992), este efeito não deve ser desprezado como colocado por Topp et al. (1980), principalmente em

solos argilosos. Para Klemunes Jr. (1998), solos arenosos e argilosos têm composições minerais diferentes. Nos argilosos há a predominância de magnésio e cálcio, enquanto que nos arenosos, sílica e quartzo. Esta diferença pode produzir uma variação considerável da constante dielétrica relativa do solo: 4,0 para solos argilosos e 8,0 para solos arenosos.

Para Hallikainen et al. (1985), a constante dielétrica do solo é função da sua densidade volumétrica. Já Tommaselli (1997), diz que para solos com textura fina, a densidade é uma variável importante na determinação da constante dielétrica do solo.

Segundo Herkelrath et al. (1991), a constante dielétrica do solo, está relacionada com o conteúdo de matéria orgânica.

Segundo Scott et al. (1983), em condições com alto índice de sal, pode ocorrer um “curto-circuito” na sonda, tornando difícil a identificação do ponto de inflexão final.

Roth et al. (1992) observaram variações na curva de calibração em solos com alto teor de óxido de ferro. Tommaselli (1997) não considera este fato uma variável significativa.

Dirksen e Dasberg (1993), Or e Wraith (2000) e Robinson et al. (2002) pesquisaram a influência da água fortemente retida no solo, no valor da constante dielétrica relativa. Para os autores existe a necessidade de adicionar o efeito dessa água, pois em solos onde ele ocorre, pode-se subestimar o valor do teor de água no solo em até 10%.

Klemunes Jr. (1998) acrescenta que se não fosse o bastante, a interferência das propriedades do solo sobre a constante dielétrica, há também fatores a serem considerados de ordem técnica, como: ruídos eletromagnéticos, comprimento e especificação do cabo coaxial, embora Herkelrath et al. (1991) afirmarem que para cabos com comprimentos de até 27m, não apresentaram problemas na reflexão do sinal.

Hook e Livingston (1996) verificaram que cabos coaxiais de  $75 \Omega$  apresentam menor tempo de resposta, menor diâmetro e mais baixo custo quando comparados aos cabos RG58 de  $50\Omega$ .

Zegelin et al. (1989) chegaram a conclusão de que sondas de 3 ou 4 hastes são muito similares na determinação da constante dielétrica. Entretanto a sonda de 4 hastes é menos atrativa, pois há uma maior exigência mecânica para a introdução da mesma no solo.

## 5 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 MATERIAL

#### 5.1.1 Área experimental e localização

Foram analisadas duas espécies de madeira, onde a primeira, *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, é pertencente ao município de Cabrália Paulista-SP e a segunda espécie, *Grevillea robusta* (Cunn.), pertencente ao município de Duartina-SP.

A localização dos campos experimentais, bem como suas coordenadas geográficas e respectivas elevações estão apresentadas no Quadro 02.

Quadro 02 – Sequência, localização, espécie da madeira segundo EMBRAPA (1986), coordenadas geográficas e elevação.

Sequência/ Localização	Madeira - Espécie	Latitude (S)	Longitude (w)	Elevação (m)
Mad1 – Cabrália Paulista-SP	<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	22°28' 38,6"	49° 19' 11,2"	547
Mad2 – Duartina-SP	<i>Grevillea robusta</i> (CUNN)	22° 26' 22,3"	49° 24' 44,4"	554

### **5.1.2 Clima**

O clima de toda a região onde foram realizados os ensaios é classificado como temperado quente (mesotérmico), com chuvas no verão e seca no inverno, segundo a classificação de W. Köppen (CUNHA et al., 1999).

### **5.1.3 Espécies utilizadas**

Conforme Quadro 02, verificação a utilização neste estudo de 2 espécies de madeira, a *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, com idade de 18 anos, denominada Mad1 e a *Grevillea robusta* (Cunn.), com idade de 20 anos, denominada Mad2.

### **5.1.4 Materiais empregados no campo.**

Para o campo, empregou-se uma moto-serra para o abate das árvores e corte das toras, trena para medida das toras e talhões, trator para efetuar o carregamento e caminhão para efetuar o transporte das toras até a serraria. Também utilizou-se um aparelho GPS para levantamento das coordenadas geográficas e elevações.

### **5.1.5 Materiais empregados no laboratório.**

Toda pesquisa, a partir da recepção das tábuas embaladas em plástico, foi desenvolvida nas estruturas do Laboratório de Secagem e Preservação da Madeira, junto ao Departamento de Ciências Florestais pertencente à Faculdade de Ciências Agrônomicas – FCA da Universidade Estadual Paulista (Unesp), campus de Botucatu-SP.

Neste laboratório, foi possível utilizar microcomputadores, estufas de secagem, balanças, trenas, serra circular, máquina de furar, termômetros entre outras ferramentas pormenores.

### 5.1.6 Materiais empregados para a TDR

Para a TDR, foram empregados: um osciloscópio tipo TDR, marca Tektronix, modelo 1502B, cabos coaxiais de 50Ω e hastes, construídas em latão, para fixação e avaliação nas amostras de madeira. A Figura 12 ilustra o osciloscópio empregado nesta pesquisa.



Figura 12. Osciloscópio marca Tektronix, tipo TDR, modelo 1502B.

As sondas fixadas na madeira e utilizadas no emprego da técnica TDR foram dimensionadas conforme a Figura 13.

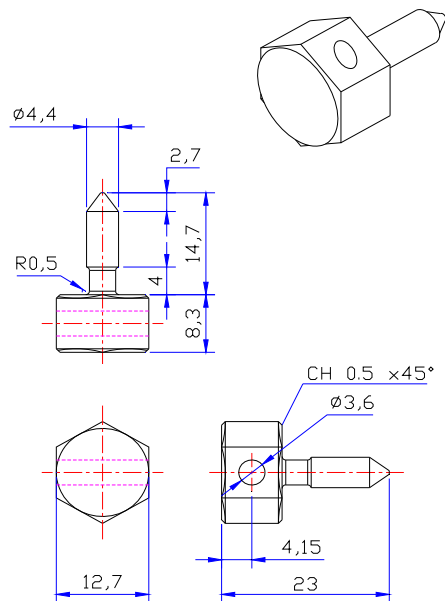


Figura 13. Projeto das hastes empregadas na TDR para madeira, com dimensões em milímetros.

As hastes foram confeccionadas em latão (com 65,5 – 68,5% de cobre, Cu e o restante em zinco, Zn), a partir de uma barra sextavada com dimensões  $\frac{1}{2}$ "x 3000mm. A Figura 14 apresenta uma haste empregada na pesquisa.



Figura 14. Haste em latão empregada na TDR.

### **5.1.7 Materiais empregados para o método gravimétrico**

Para o método gravimétrico foram utilizados os seguintes equipamentos:

- a) uma balança digital marca Ação Científica, Classe II, com capacidade máxima de 8000g e precisão 0,1g.
- b) uma estufa de secagem com ventilação forçada marca Orion, modelo 520.
- c) uma estufa de secagem e esterilização marca FANEM, modelo 315 SE.
- d) três termômetros, sendo dois de vidro e um termômetro tipo termopar tipo K, digital, marca HANNA instruments, modelo HI 93530.

### **5.1.8 Materiais empregados para o escritório**

No escritório foram realizadas diversas tarefas como tabulações dos dados com auxílio da planilha de dados Microsoft Excel versão XP PROFESSIONAL.

As curvas de regressão para calibração do TDR foram obtidas com auxílio do software Microcal Origin 6.0.

## **5.2 MÉTODOS**

### **5.2.1 Seqüência operacional**

Para esta pesquisa estabeleceu-se o protocolo de trabalho abaixo, de forma a unificar os tratamentos para as duas espécies de madeira avaliadas, uma vez que a pesquisa aconteceu em dois momentos: no primeiro foi avaliada a espécie de madeira *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e, no segundo, a espécie de madeira *Grevílea robusta* (Cunn.).

**Seqüência operacional:**

- 1° No campo, escolher 11 árvores para cada espécie de forma aleatória;
- 2° Efetuar o corte o mais próximo do solo possível;
- 3° Marcar e cortar em toras de 3,0m;
- 4° Na serraria, desdobrar em tábuas;
- 5° Selecionar de forma aleatória 11 tábuas
- 6° Embalar as tábuas selecionadas em plástico e conduzi-las ao laboratório;
- 7° No laboratório, demarcá-las e serrá-las para obtenção das amostras;
- 8° Aplicar impermeabilizante nos topos das amostras, instalar as probes da TDR, e medir a massa inicial das amostras-teste e sub-amostras.
- 9° Condicionar as amostras-teste em estufa à 40°C para processo de secagem, e as sub-amostras, em estufa à 103±2,0°C para obtenção da massa seca.
- 10° Efetuar o monitoramento da perda de água no processo de secagem, empregando uma balança, e sua respectiva constante dielétrica relativa ( $K_b$ ), empregando a TDR.
- 11° De posse da massa seca obtida das sub-amostras, estimar a massa seca das amostras teste e estabelecer o término do processo de secagem e monitoramento da umidade.
- 12° Com os dados dos teores de umidade, obtidos pelo método gravimétrico, e das constantes dielétricas relativas, obtidas pela TDR, deve-se estabelecer um modelo matemático da umidade da madeira, em função da respectiva constante dielétrica relativa.

### **5.2.2 Procedimentos de campo e amostragem para cada espécie de madeira**

A coleta do material aconteceu de forma idêntica tanto para o *Pinus caribaea* var. *hondurensis* quanto para a *Grevillea robusta* (Cunn.), ou seja, envolveu o abate ao acaso de 11 árvores de cada espécie, onde a segunda, somente teve início após o término das análises da primeira.

A operação de abate foi realizada com moto-serra e as árvores foram cortadas o mais próximo do solo e traçadas a cada 3,0m

De posse das toras, estas, foram deslocadas para serraria onde foram desdobradas em tábuas pelo sistema de corte tangencial, embaladas em plástico para evitar ao máximo a perda de água e encaminhadas ao Laboratório de Secagem e Preservação da Madeira.

Para cada madeira avaliada, foram selecionadas 11 tábuas de forma aleatória da amostragem total de árvores.

### **5.2.3 Levantamento de coordenadas geográficas**

As coordenadas geográficas e suas respectivas elevações foram apresentadas no Quadro 02. O levantamento dos respectivos dados foi feito por meio de um aparelho tipo GPS marca Garmin, modelo GPS e-Map DELUXE, com precisão de 15 metros.

### **5.2.4 Preparação das amostras para análise gravimétrica**

As tábuas apresentaram espessura de 28 mm e largura de 24 cm e sofreram cortes para a obtenção das amostras conforme esquema da Figura 15.

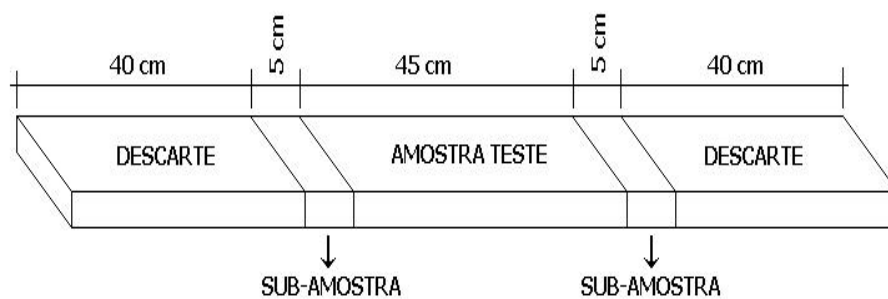


Figura 15. Representação gráfica da obtenção das amostras avaliadas.

A Figura 16 ilustra o processo finalizado de preparação das amostras de uma tábua.



Figura 16. A: Marcação das tábuas. B: Processo de corte. C: Tábua com os cortes para obtenção da amostra teste (AT) e das sub-amostras (SA).

Logo após o corte, as sub-amostras (SA) e a amostra teste (AT) foram pesadas, visando à determinação da massa úmida inicial (MU). A amostra teste recebeu nos topos uma camada de produto impermeabilizante à base de PVAc (Acetato de polivinila), um polímero sintético, 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, conforme ilustra a Figura 17.



Figura 17. Aplicação de impermeabilizante nos topos das amostras.

A Figura 18 ilustra várias amostras com a impermeabilização dos topos concluídas e as hastes para a TDR instaladas.



Figura 18. Amostras prontas para o início do processo de secagem.

### 5.2.5 Determinação da umidade e da massa específica básica das amostras.

A umidade inicial com base em massa seca foi determinada pelo método da estufa ou gravimétrico e através do uso da equação 62:

$$U_{\%} = \frac{M_u - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad (62)$$

onde:

$U_{\%}$  - Umidade da madeira, %;

$M_u$  - Massa úmida, g;

$M_s$  - Massa seca em estufa à  $103,0 \pm 2,0$  °C até massa constante, g.

Para determinar a massa específica básica, utilizou-se uma balança de precisão de 0,1 g e uma estufa com regulagem de temperatura à  $103,0 \pm 2,0$  °C. A massa específica básica foi determinada pelo método de imersão que consiste na determinação do

empuxo obtido por meio da imersão de amostras saturadas em água, ou seja, amostras com volumes saturados ou máximos. A equação 63 estabelece o empuxo.

$$E = \rho \cdot V \cdot g \quad (63)$$

onde:

$E$  - empuxo, dina (dyn);

$\rho$  - densidade ou massa específica da água, g/cm<sup>3</sup>;

$V$  - volume da amostra, cm<sup>3</sup>;

$g$  - aceleração da gravidade local, cm/s<sup>2</sup>.

Desta forma, levando-se em consideração o sistema de unidades CGS, pode-se considerar a equação 64.

$$E = V \quad (64)$$

Onde se pode interpretar que o empuxo obtido com massa em gramas é numericamente igual ao volume em cm<sup>3</sup>.

A estufa proporcionou a obtenção da massa seca das amostras após completa secagem a 103,0 ± 2,0 °C, tendo como indicativo, leituras repetidas de massa, ou seja, massa constante.

Com isso, a simples relação da equação 65, possibilitou a obtenção da massa específica básica, oferecendo mais uma caracterização das madeiras estudadas.

$$\rho_b = \frac{m}{V_{Sr}} \quad (65)$$

onde:

$\rho_b$  - massa específica básica , g/cm<sup>3</sup>;

$m$  - massa seca em estufa, g;

$V_{st}$  - volume saturado em água.

### 5.2.6 Preparação das amostras para análise pela TDR

Ao mesmo tempo em que as amostras foram preparadas para o método gravimétrico, também foram preparadas para a técnica TDR, ou seja, com auxílio de uma máquina de furar, realizou-se 6 furos em cada amostra, com distâncias de 10mm, 20mm e 30mm entre as hastes, conforme ilustra a Figura 19.

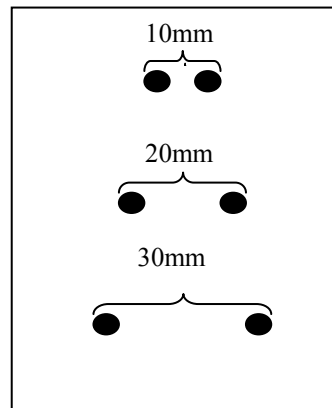


Figura 19. Layout das amostras empregadas na análise com a técnica TDR e gravimétrica.

Após realizados os furos, foram introduzidas as 6 hastes, uma em cada orifício. A Figura 20 ilustra as hastes instaladas em amostras para análise com a técnica TDR.



Figura 20. Amostras com as hastes instaladas.

### 6.2.7 Determinação da constante dielétrica relativa pela TDR

A constante dielétrica relativa ( $K$ ) é calculada pela TDR a partir da obtenção da distância entre a emissão e a reflexão de um pulso eletromagnético gerado pelo aparelho, conforme a Figura 21.

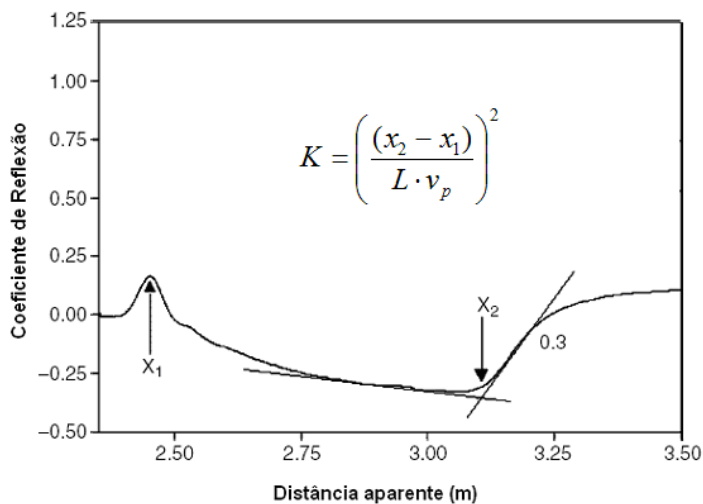


Figura 21. Modelo de onda captada pelo equipamento TDR.

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 ( $K$ ), sendo  $L$  o comprimento das hastes da sonda e  $V_p$  a velocidade de propagação do pulso, conforme é ilustrado na própria figura.

A atenuação do pulso eletromagnético, proporcional à condutividade elétrica aparente do solo, é dada pela razão entre as amplitudes da onda refletida (ao fim das múltiplas reflexões do pulso eletromagnético, entre 20 e 45 ns) e da onda incidente e, como já foi referido, é medida a partir do espectro do pulso (após conversão do formato analógico para digital, A/D) como um desvio vertical que é designado por coeficiente de reflexão,  $\rho$ . Com base no coeficiente de reflexão é determinada a impedância do solo,  $Z$ , a partir da seguinte expressão da equação 66 (Nadler *et al.*, 1991):

$$Z = Z_c \cdot [(1 + \rho)/(1 - \rho)] \quad (66)$$

onde:

$Z_c$  = é a impedância característica do cabo, que neste caso, tem o valor de  $50 \Omega$ ;

$\rho$  = coeficiente de reflexão, adimensional.

Uma descrição detalhada da obtenção dos coeficientes de reflexão, da impedância de cada onda e da sua relação com a concentração residente da solução do solo ou a condutividade elétrica aparente do solo encontra-se em Gonçalves *et al.* (2001).

A Figura 22 apresenta a técnica TDR sendo aplicada. As hastes fixadas nas amostras são conectadas por meio de um cabo coaxial de  $50 \Omega$  à um osciloscópio, tipo TDR.

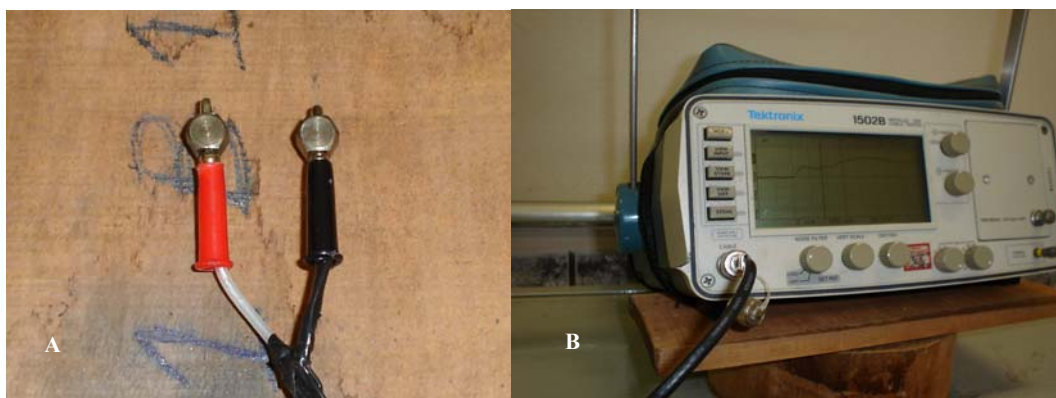


Figura 22. A: Amostra teste (AT) com as hastes instaladas e um cabo de  $50\Omega$  instalado. B: Osciloscópio tipo TDR, empregado nesta pesquisa.

Para a TDR estabeleceram-se duas variáveis:

a) distância entre as hastes, que foram configuradas em 10mm, 20mm e 30mm;

b) variação da velocidade de propagação do pulso eletromagnético, que foram configuradas em:  $0,33c$  (33% de  $c$ ),  $0,66c$  (66% de  $c$ ) e  $0,99c$  (99% de  $c$ ); onde  $c$  é a velocidade de propagação da luz no vácuo e tem seu valor aproximado de  $3.10^8$ m/s.

Assim, analisando duas espécies de madeira, com três distâncias entre hastes e três velocidades de propagação do pulso eletromagnético, estabeleceram-se as configurações apresentadas no Quadro 03 para representar o delineamento experimental para a TDR.

Quadro 03 – Resumo do delineamento experimental para as variáveis da TDR.

Identificação	Espécie	Distância entre probes (mm)			Velocidade de propagação do pulso eletromagnético (m/s)		
		D1	D2	D3	$V_{p1}$	$V_{p2}$	$V_{p3}$
Mad1	<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	10	20	30	0,33c	0,66c	0,99c
Mad2	<i>Grevillea robusta</i> (Cunn.)						

onde  $c$  é a velocidade de propagação da luz no vácuo e tem seu valor aproximado de  $3.10^8$ m/s.

O Quadro 04 apresenta as configurações entre as variáveis do Quadro 03 empregadas nesta pesquisa.

Quadro 04 – Configurações empregadas nesta pesquisa, separadas pelas espécies estudadas.

<b>Configurações</b>	
<i>Pinus caribaea var. hondurensis</i>	<i>Grevillea robusta</i> (Cunn.)
Mad1 D1 V <sub>p1</sub>	Mad2 D1 V <sub>p1</sub>
Mad1 D1 V <sub>p2</sub>	Mad2 D1 V <sub>p2</sub>
Mad1 D1 V <sub>p3</sub>	Mad2 D1 V <sub>p3</sub>
Mad1 D2 V <sub>p1</sub>	Mad2 D2 V <sub>p1</sub>
Mad1 D2 V <sub>p2</sub>	Mad2 D2 V <sub>p2</sub>
Mad1 D2 V <sub>p3</sub>	Mad2 D2 V <sub>p3</sub>
Mad1 D3 V <sub>p1</sub>	Mad2 D3 V <sub>p1</sub>
Mad1 D3 V <sub>p2</sub>	Mad2 D3 V <sub>p2</sub>
Mad1 D3 V <sub>p3</sub>	Mad2 D3 V <sub>p3</sub>

### 5.2.8 Curvas de calibração da TDR

As calibrações da TDR ou obtenção das equações que fornecem a umidade na madeira em função da constante dielétrica relativa obtida pela TDR, foram determinadas a partir de uma regressão, tomando como base um gráfico cartesiano com os teores de umidades das amostras, obtidos pelo método gravimétrico, nas ordenadas e suas respectivas constantes dielétricas aparentes ou relativas, obtidas pela técnica TDR, nas abscissas.

As regressões foram realizadas por meio do software Microcal Origin 6.0 cujas curvas estão indexadas aos tipos de madeira, distâncias entre hastes e velocidades de propagação do pulso eletromagnético, conforme o Quadro 03, e encontram-se no APÊNDICE 2.

### 5.2.9 Obtenção da umidade da madeira pela TDR

Uma vez estabelecido o modelo de calibração para a TDR, basta realizar as medidas, calcular as constantes dielétricas relativas e substituí-las nos modelos, pois a umidade na madeira fica em função do valor da constante dielétrica relativa obtida experimentalmente.

### 5.2.10 Análise estatística

Para avaliar o desempenho das curvas de calibração obtidas utilizou-se o coeficiente de concordância,  $d$ , proposto por WILLMOTT et al.(1985), descrito pela equação 67. Os valores do coeficiente de concordância variam de zero, para nenhuma concordância, a um, para a concordância perfeita.

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_i - \theta_i^*)^2}{\sum_{i=1}^n (|\theta_i^* - \Theta| + |\theta_i - \Theta|)^2} \right] \quad (67)$$

Onde  $n$  é o número total de observações;  $\theta$  é a umidade das amostras obtida pelo método gravimétrico (%),  $\theta^*$  é a umidade das amostras estimadas pelas respectivas curvas de calibração da técnica TDR (%) e  $\Theta$  é a média das umidades obtidas pelo método gravimétrico (%), tomado como padrão ouro ou referência.

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

O EMP foi expresso pela equação 68:

$$EMP = 100 \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{|\theta_i - \theta_i^*|}{\theta_i} \right)}{n} \quad (68)$$

onde:  $n$  é o número de pontos utilizados no ajuste do modelo;  $\theta$  é a umidade obtida pelo método gravimétrico (%) e  $\theta^*$  é a umidade estimada pela técnica TDR (%).

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. Os valores de coeficiente de correlação encontrados foram classificados de acordo com a metodologia proposta por Hopkins (2000).

O índice de confiança ou desempenho ( $i$ ) proposto por Camargo & Sentelhas (1997), que estabelece a seguinte relação entre os coeficientes de correlação ( $r$ ) e o de concordância ( $d$ ), de acordo com a equação 69.

$$i = r \cdot d \quad (69)$$

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 05.

Quadro 05 – 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	≤ 0,40

Fonte : Adaptado de Camargo & Sentelhas (1997).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Massa específica básica.

O Quadro 06 apresenta as massas específicas básicas das duas espécies estudadas, determinadas pela equação 65.

Quadro 06 – Massa específica básica das espécies avaliadas.

Identificação	Espécie	Massa específica básica (g/cm <sup>3</sup> )
Mad1	<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	0,46
Mad2	<i>Grevillea robusta</i> (Cunn.)	0,57

### 6.2 Curvas de secagem.

As Figuras 23 e 24 apresentam, respectivamente, as curvas de secagem para as espécies *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Mad1) e *Grevillea robusta* (Cunn.) (Mad2), obtidas pelo método gravimétrico, tido como referência nesta pesquisa. Para Mad1 e Mad2, obtiveram-se as umidades iniciais e finais, as quais foram obtidas através da média entre as 11 amostras estudadas. O *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Mad1), apresentou umidade inicial

de 101,45% e final de 7,36%. Para a *Grevillea robusta* (Cunn.) (Mad2), inicialmente verificou-se umidade de 125,88% e ao término do estudo, 6,62%.

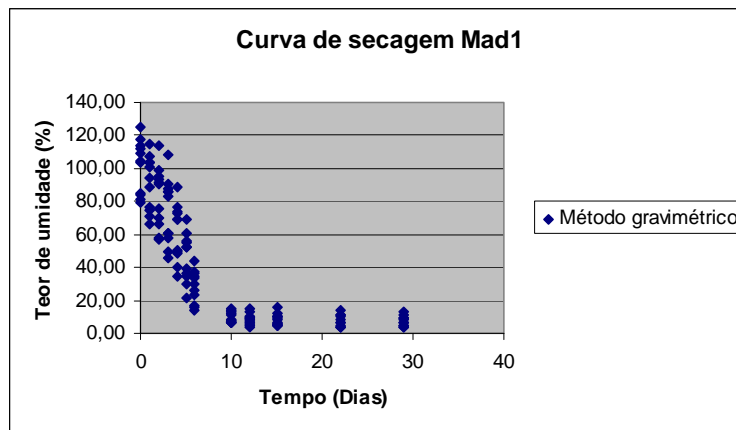


Figura 23. Curva de secagem do *Pinus caribaea* var. *hondurensis* obtida pelo método gravimétrico.

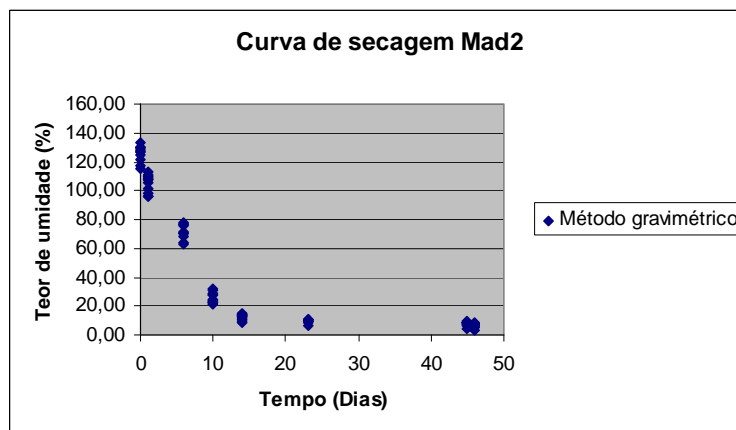


Figura 24 – Curva de secagem da *Grevillea robusta* (Cunn.), obtida pelo método gravimétrico.

As curvas de secagem estão indexadas aos tipos de madeira, distâncias entre hastas e velocidades de propagação do pulso eletromagnético, conforme o Quadro 03, e encontram-se no APÊNDICE 1.

### 6.3 Modelos e coeficientes ajustados para calibração da TDR.

Para a Mad1 foi estabelecido um modelo de calibração linear, conforme equação 70 e para Mad2, foi estabelecido um modelo de calibração exponencial, conforme equação 71

$$U = A + B \cdot K \quad (70)$$

$$U = Y_0 + A \cdot e^{\frac{-K}{Z}} \quad (71)$$

onde:

U - umidade, %;

A, B,  $Y_0$  e Z - coeficientes;

K - constante dielétrica relativa, obtida pela TDR, caráter adimensional.

Os Quadros 07 e 08 apresentam os coeficientes calculados pelas respectivas calibrações para as configurações experimentais empregadas nesta pesquisa.

Quadro 07 - Coeficientes,  $R^2$ , número de amostragem e modelo do ajuste linear para Mad1.

Configuração	Coef. A	Coef. B	$R^2$	N	Modelo
Mad1 D1 Kb1	1,97877	0,48637	0,84923	132	$U = A + B \cdot K$
Mad1 D1 Kb2	1,76459	1,21601	0,85164	132	
Mad1 D1 Kb3	2,07422	1,21213	0,8446	132	
Mad1 D2 Kb1	1,62469	1,17557	0,90538	132	
Mad1 D2 Kb2	1,13028	1,18513	0,90312	132	
Mad1 D2 Kb3	1,22362	1,17122	0,9069	132	
Mad1 D3 Kb1	5,2982	1,1169	0,9008	132	
Mad1 D3 Kb2	5,28763	1,15163	0,89924	132	
Mad1 D3 Kb3	5,09042	1,1277	0,89655	132	

Quadro 08 – Coeficientes,  $R^2$ , número de amostragem e modelo do ajuste exponencial para Mad2.

Configuração	Coef. $Y_0$	Coef. A	Coef. Z	$R^2$	N	Modelo
Mad2 D1 Kb1	132,72	-158,05697	49,24974	0,97126	132	$U = Y_0 + A \cdot e^{\frac{-K}{Z}}$
Mad2 D1 Kb2	132,72	-156,48255	49,46699	0,97111	132	
Mad2 D1 Kb3	132,72	-157,91576	48,85964	0,96762	132	
Mad2 D2 Kb1	132,72	-144,06054	55,81564	0,96699	132	
Mad2 D2 Kb2	132,72	-144,64875	55,26345	0,96706	132	
Mad2 D2 Kb3	132,72	-145,04961	54,83859	0,97043	132	
Mad2 D3 Kb1	132,72	-140,47911	47,72252	0,96695	132	
Mad2 D3 Kb2	132,72	-14052824	48,35933	0,96544	132	
Mad2 D3 Kb3	132,72	-140,2704	50,20049	0,96467	132	

O modelo exponencial ajustado para a Mad2, *Grevillea robusta* (Cunn.), confirmou o modelo ajustado por Batista et al.(2006), para *Eucalyptus grandis*, reforçando positivamente a metodologia. Contudo, não se verifica o emprego de um modelo geral, pois para a Mad2, *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, verificou-se a necessidade do emprego de um modelo linear.

#### 6.4 Desempenho dos modelos ajustados.

O Quadro 09 apresenta os resultados dos cálculos estatísticos definidos no item 6.2.9 .

Pode-se, também, verificar no APÊNDICE 3, as correlações entre metodologias indexadas aos tipos de madeira, distâncias entre hastes e velocidades de propagação do pulso eletromagnético, conforme o Quadro 03.

Quadro 09 – Índices estatísticos: coeficiente de correlação, r, índice de Willmott, d, índice de confiança ou desempenho, i, e classificação dos modelos, segundo Camargo & Sentelhas (1997).

Configuração	Índice d	Correlação r	Fator i	Classificação do modelo
Mad1 D1 Kb1	0,985313	0,84923	0,836757	Muito Bom
Mad1 D1 Kb2	0,91434	0,851648	0,778696	Muito Bom
Mad1 D1 Kb3	0,909835	0,844598	0,768445	Muito Bom
Mad1 D2 Kb1	0,948603	0,905377	0,858843	Ótimo
Mad1 D2 Kb2	0,947247	0,903113	0,855471	Ótimo
Mad1 D2 Kb3	0,949488	0,906896	0,861087	Ótimo
Mad1 D3 Kb1	0,945199	0,900802	0,851437	Ótimo
Mad1 D3 Kb2	0,942634	0,896548	0,845117	Muito Bom
Mad1 D3 Kb3	0,94447	0,899245	0,84931	Muito Bom
Mad2 D1 Kb1	0,992718	0,985713	0,978535	Ótimo
Mad2 D1 Kb2	0,99263	0,985449	0,978186	Ótimo
Mad2 D1 Kb3	0,991742	0,983789	0,975665	Ótimo
Mad2 D2 Kb1	0,991509	0,983367	0,975017	Ótimo
Mad2 D2 Kb2	0,991543	0,983393	0,975076	Ótimo
Mad2 D2 Kb3	0,992417	0,985107	0,977637	Ótimo
Mad2 D3 Kb1	0,986648	0,982256	0,969141	Ótimo
Mad2 D3 Kb2	0,991282	0,982751	0,974183	Ótimo
Mad2 D3 Kb3	0,991088	0,982372	0,973617	Ótimo

### 6.5 Resultados da pesquisa piloto com *Eucalyptus grandis*.

Um experimento piloto foi realizado com a espécie de madeira *Eucalyptus grandis* onde 14 tábuas foram serradas pelo sistema de corte tangencial e o protocolo de trabalho desenvolvido foi o mesmo apresentado no item 6.2.1 .

A Figura 25 apresenta o modelo empregado na calibração do equipamento TDR, do tipo exponencial com forma geral  $U = Y_o + A \cdot e^{\frac{-K}{Z}}$  .

A equação 72, com seus coeficientes:  $Y_0=79,26$ ,  $A=-80,28$  e  $Z=21,22$  foi obtida por meio de uma regressão exponencial.

$$U = 79,26 - 80,28 \cdot e^{\left(-\frac{K}{21,22}\right)} \quad (72)$$

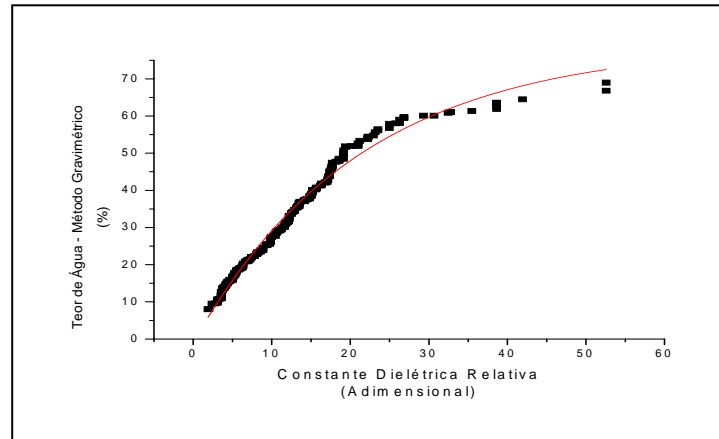


Figura 25. Teor de água ou umidade da madeira em função da constante dielétrica relativa, obtida pela TDR.

A Figura 26 apresenta a correlação entre o método gravimétrico (padrão ouro ou referência) e a TDR.

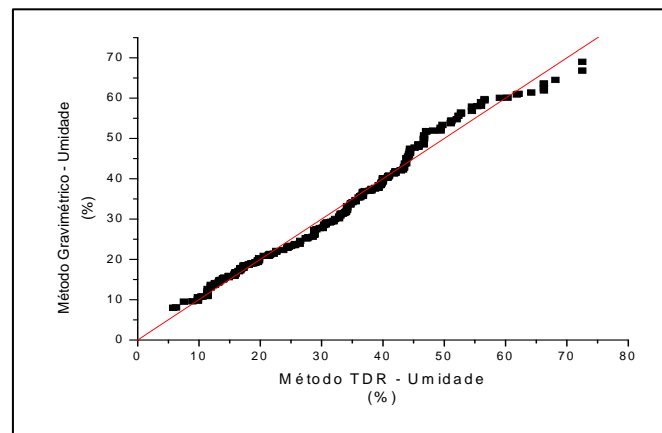


Figura 26. Correlação entre o método gravimétrico e a TDR para determinação da umidade da madeira.

Segundo Ponce & Watai (1985), James (1988) e Haygreen & 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.

Analisando a Figura 26, pode-se verificar que na TDR, a dispersão acima do PSF é muito pequena, tornando a metodologia promissora.

A Figura 27 apresenta as curvas de secagem pelo método gravimétrico e pela TDR.

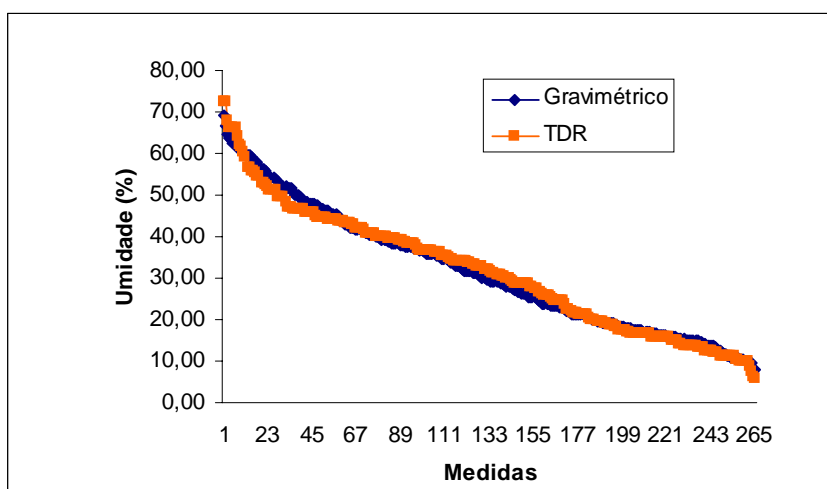


Figura 27. Curvas de secagem das amostras.

Observando a Figura 27 que ilustra o comportamento das duas metodologias (Gravimétrico e TDR) na determinação da umidade do *Eucalyptus grandis*, durante um processo de secagem, pode-se concluir que o modelo exponencial

$U = 79,26 - 80,28 \cdot e^{\left(\frac{-K}{21,22}\right)}$  foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais e estatísticos, onde  $U$  é a umidade e  $K$  a constante dielétrica relativa.

## 7 CONCLUSÕES

A TDR, com calibração para cada espécie, demonstrou ser estatisticamente eficiente, uma vez que 72,2% das configurações estudadas foram classificadas com desempenho ótimo e 27,8% como muito bom. Não foi verificado nenhum percentual das configurações classificadas com desempenho bom, mediano, sofrível, mau ou péssimo, conforme critério de interpretação do desempenho dos métodos, apresentado no Quadro 05.

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.

Quanto ao comportamento da umidade em função da constante dielétrica relativa para as duas espécies estudadas, obtiveram-se como resultados modelos diferentes, onde para o *Pinus caribaea* var. *hondurensis* optou-se por um ajuste linear do tipo  $U = A + B \cdot K$  e para *Grevillea robusta* (Cunn.) optou-se por um ajuste exponencial do tipo  $U = Y_0 + A \cdot e^{\frac{-K}{Z}}$ , onde U é a umidade da madeira, A, B,  $Y_0$  e Z, são os coeficientes e K a constante dielétrica relativa.

Verificou-se uma diferença na densidade básica entre as duas espécies. Para o *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, a densidade básica foi de 0,46g/cm<sup>3</sup> e para a *Grevílea robusta* (Cunn.), 0,57g/cm<sup>3</sup>.

A faixa de umidade estudada neste trabalho aconteceu entre 101,45% e 7,36% para o *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Mad1) e de 125,88% à 6,62% para a *Grevílea robusta* (Cunn.) (Mad2).

A TDR também demonstrou ser estatisticamente viável para faixas de umidade acima do PSF, fator hoje, limitante principalmente para sensores elétricos resistivos e capacitivos.

Para futuros trabalhos, sugere-se:

- 1) Mais estudos da TDR com maiores números de espécies, classificando-as por grupos como folhosas, coníferas e entre outras;
- 2) O efeito da temperatura na determinação da constante dielétrica relativa na madeira;
- 3) Possibilidade da calibração da TDR empregando a densidade básica da madeira.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO, M.; FINN, E. J. **Física**. São Paulo: ADDISON-WESLEY, 1999. v. único, 936 p.

ANDRADE, A. **Indicação de programas para a secagem convencional de madeiras**. 2000. 72 f. Dissertação (Mestrado em Ciências/Ciência e Tecnologia de Madeiras) – Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

ANNAN, A. P. Time-domain reflectometry air-gap problem for parallel transmission lines. **Report of activities**, Part B, Ottawa, p. 59-62, 1977. Paper 77-1B.

ANSOULT, T. M.; DE BAKER, L. W. ; DECLERQ, M. Statistical relationship between apparent dielectric constant and water content in porous media. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.49, p. 47-50, 1985.

BARRETT, W. H. G.; GOLFARI, L. Descripción de las nuevas variabilidades del “Pino Del Caribe”. **Caribbean Forester**, Porto Rico, v. 23, n. 2, p. 59-71, 1962.

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 Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2004.

BATISTA, W. R. et al. Calibração de um equipamento TDR (Reflectometria por Domínio do Tempo) para determinação da umidade da madeira de *Eucalyptus grandis*.. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE INDUSTRIALIZAÇÃO DA MADEIRA E PRODUTOS

DE BASE FLORESTAL, 2., 2006, Pinhais. **CONGRESSO BRASILEIRO DE INDUSTRIALIZAÇÃO DA MADEIRA E PRODUTOS DE BASE FLORESTAL**. São Paulo : Monferrer Produções, 2006. v. 1.

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.

BIRCHAK, J. R. et al. High dielectric constant microwave probe for measuring soil moisture. **Proceedings of the IEEE**, Worldwide, v. 62, n. 1, p. 93-98, 1974.

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

BOLAND, B.C. **Forest trees of Australia**. East Melbourne: Nelson: CSIRO, 1984. 687p.

BRUCE R. R.; LUXMOORE, R. J. Water retention: field methods. In KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis I: physical and mineralogical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 1986. chap. 27, p. 663-686.

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.

CASSEL, D. K.; KLUTE, A. Water potential: tensiometry. In KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis I: physical and mineralogical methods**. Madison: Soil Science of America. 1986, chap. 27, p. 563-596, 1986.

CAUDURO, F. A.; DORFMAN, R. **Manual de ensaios de laboratório e campo para irrigação e drenagem**. Porto Alegre: PRONI; IPH; UFRGS, 1986. 216p.

CAVALCANTE, A. A. **Ocorrência do colapso na secagem da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna***. 1991. 76 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

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

CENTRAL AMERICA AND MEXICO CONIFEROUS RESOURCES COOPERATIVE.

**Annual report.** Raleigh: North Carolina State University, College of Forest Resources, Department of Forestry, 1996. 29 p.

CRESTANA, S. et al. **Instrumentação agropecuária: contribuições no limiar do novo século.** Brasília, DF: Embrapa-SPI, 1996. 290 p.

CUNHA, A. R. et al. Classificação climática para o município de Botucatu, SP, segundo Köppen. In: SIMPÓSIO EM ENERGIA NA AGRICULTURA, 1., 1999, Botucatu. **Anais...** Botucatu: UNESP, FCA, 1999, p. 487-91.

DALTON, F. N. ; VAN GENUCHTEN, M. T. The time-domain reflectometry method for measuring soil water content and salinity. **Geoderma**, Netherlands, v.38, p. 237-250, 1986.

DALTON, F. N.; HERKELRATH, W. N.; RAWLING O. S. & RHOADES, J. D. **Time Domain Reflectometry: Simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe.** Science, Washington, DC, v. 224, p. 989-900, 1984.

DASBERG, S. ; DALTON, F. N. Time-domain reflectometry field measurements of soil water content and electrical conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, p. 293-297, 1985.

DASBERG, S. ; HOPMANS, J. W. Time-domain calibration for uniformly and nonuniformly wetted sandy and clayey loam soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p.1341-1345, 1992.

DAVIS, J. L.; CHUDOBIAK, W. J. In situ meter for measuring relative permittivity of soils. **Geology Survey of Canada**, Ottawa, p. 75-79, 1975. Paper 75-1A.

DESH, H. E. Timber, its structure and properties. New York, Mcmillan and Co., 1956. 350p.

DIRKSEN, C. ; DASBERG, S. Improved calibration of time-domain reflectometry soil water content measurements. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, p. 660-667, 1993.

DIRKSEN, C. **Soil physics measurements.** Reiskirchen: Catena-Verlag, 1999. 154 p.

DOBSON, M. C. et al. Microwave dielectric behavior of wet soil: II. Dielectric mixing models. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Worldwide, v. 23, p. 35-46, 1985.

EMBRAPA. **Zoneamento ecológico para plantios florestais no estado do Paraná.** Brasília, DF, 1986. 89 p.

ENGDAHL, T. TDR circuit. Disponível em:  
<<http://www.epanorama.net/circuits/tdr.html>>. Acesso: 20 out. 2008.

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.

GALINA, I. C. M. **Variação 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.

GIBSON, G. L. A review of provenance testing of commercially important tropical pines. In: **SIMPÓSIO SOBRE SILVICULTURA Y MEJORAMIENTO GENÉTICO DE ESPÉCIES FORESTALES**, 1., 1987, Buenos Aires. **Trabalhos enviados...** Buenos Aires: CIEF, 1987. v. 1, p. 29-61.

GOLFARI, L. Coníferas aptas para repoblaciones forestales en el Estado de São Paulo. **Silvicultura em São Paulo**, São Paulo, v. 6, p. 7-62, 1967.

GOMIDE, R. L. Importância da automação nos sistemas agrícolas irrigados, visando a irrigação inteligente e a agricultura de precisão. In: **WORKSHOP SOBRE APLICAÇÕES DA TÉCNICA DE TDR (REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO) NA AGRICULTURA**, 1., 2001, Campinas: UNICAMP, **Aplicações da Técnica de TDR na Agricultura...** 2001. p.1-36.

GONÇALVES JÚNIOR, A. A. **Metrologia, Parte I, 2001.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2001. 117 p.

GONÇALVES, M. C. et al. Avaliação da condutividade elétrica aparente e do teor de água do solo por TDR. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, vol. 24, n. 3 e 4, p. 105-117, 2001.

GRANTZ, D. A., PERRY, M. H. ; MEINZER, F. C. Using time domain reflectometry to measure soil water in Hawaiian sugarcane. **Agronomy Journal**, Madison, v. 82, p. 144-

146, 1990.

HALLIKAINEN, M. T. et al. Microwave dielectric behavior of wet soil - Part I: Empirical models and experimental observations. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Worldwide, v. 23, n. 1, p. 25-34, 1985.

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

HARWOOD, C. E. Natural distribution and ecology of *Grevillea robusta* Cunn. In: **Grevillea robusta in agroforestry and forestry**. Nairobi: ICRAF, 1992. p. 10.

HARWOOD, C. E.; GETAHUN, A. Australian tree finds successes in Africa. **Agroforestry today**. Nairobi, v.2, n.1, p. 8-10, jan./mar. 1990.

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

HEINOVAARA, T. J. ; BOUTEN, W. A computer-controlled 36-channel time domain reflectometry system for monitoring soil water contents. **Water Resources Research**, Washington, DC, v. 26, n. 10, p. 2311-2316, 1990.

HERKELRATH, W. N.; HAMBURG, S. P. ; MURPHY, F. Automatic, real time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry. **Water Resources Research**, Washington, DC, v. 27, p. 857-864, 1991.

HERMMANN JÚNIOR, 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.

HERMMANN JÚNIOR, P. S. Aspectos básicos da reflectometria no domínio do tempo (TDR) e potencialidades de aplicação na física do solo. In: MATSURA, E. E. et al. **Aplicações da técnica de TDR na agricultura**. Campinas: UNICAMP, FEAGRI, 2001. p. 37-50.

HODGE, G. R.; DVORAK, W. S. Genetic parameters and provenance variation of *Pinus caribaea* var. *hondurensis* in 48 international trials. **Canadian Journal Forest Resources**, Ottawa, v. 31, p. 496-511, 2001.

HOKETT, S. L.; CHAPMAN, J. B. ; RUSSELL, C. E. Potential use of time domain reflectometry for measuring water content in rock. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.

138, p. 89-96, 1992.

HOOKE, W. R.; LIVINGSTON, N. J. Errors in converting time domain reflectometry measurements of propagation velocity to estimates of soil water content. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, p. 35-41, 1996.

HOPKINS, W.G. Correlation Coefficient. Disponível em:  
<<http://www.sportsci.org/resource/stats/correl.html>>. Acesso: 22 out. 2007.

HUY, V. R. Measurement of moisture content in resinous wood. In: SYMPOSIUM ON FOREST PRODUCTS RESEARCH INTERNATIONAL, 1., 1985, Pretoria. **Proceedings...** Pretoria: Republic of South African, 1985. v.1, p. 16-20.

JANKOWSKY, I. P.; Secagem de madeira de reflorestamento: técnicas e equipamentos. In: SEMINÁRIO SOBRE PROCESSAMENTO E UTILIZAÇÃO DE MADEIRAS PARA REFLORESTAMENTO, 1996, 1., Curitiba. **Anais**. Curitiba: ABPM, 1996. p. 107-117.

JOHNSTON, D. D. Gravimetric and distillation methods of moisture content determination. In: Building Research Establishment. **Report of a seminar on moisture content determination of wood**. s.e., 1972, p. 1-3. (Timberlab Papers, 24 – 1970).

JONES, S. B. et al. Time domain reflectometry measurement principles and applications, **Hydrological Processes**, San Francisco, n.16, p. 141-153, 2002.

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 264 p.

KLEMUNES, J. Jr. **Determining soil volumetric moisture content using time domain reflectometry**. Mc lean: U.S. Department of Transportation, 1998. 74p.

KLUTE, A.; DIRKSEN, C. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis I: physical and mineralogical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 1986, chap. 28, p. 687-734.

KOLLMANN, F.F.P. **Tecnología de la madera y sus aplicaciones**. Madrid: Gráficas Reunidas, 1959. 677 p.

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

LOOK, B.; REEVES, I. The application of time domain reflectometry for measurement on unfrozen water content in frozen soils. **Cold Region Science Technology**, Ireland, v.3, p. 205-210, 1982.

MACKAY, J. F. G.; OLIVEIRA, L. C. **Kiln operator's handbook for Western Canada**. Vancouver: Forintek Canada Corporation, 1989. 61 p. (Special publication n. SP-31).

MARCIANO, C. R. et al. Variabilidade do potencial mátrico e do conteúdo de água do solo, em experimento de manejo de irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 563-571, 1998.

MOURA, V. P. G.; PARCA, M. L. S.; SILVA, M. A. Variação da densidade básica da madeira de três espécies e procedências de *pinus* centro-americanos em três locais na região dos cerrados. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n.22/23, p. 29-44, 1991.

NADLER, A.; DASBERG, S & LAPID, I. Time domain reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soils columns. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, p. 938-943, 1991.

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

OR, D. et al. **WinTDR**: soil analysis software: users guide (USU Soil Physics Group). version 6.0. Logan: Utah State University Plants, Soils & Biometeorology, 2003. Chap. 9, 73 p.

OR, D.; WRAITH, J. M. Soil water content and water potential relationships. In: SUMMER, M.E. **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC Press, 2000.

PATTERSON, D. E. & SMITH, M. W. **The measurement of unfrozen water content by TDR: Results from laboratory tests**. Canadian Geotechnical Journal, Fredericton, v. 18, p. 131-145, 1981.

PERRY, J. P. **The pines of Mexico and Central America**. Portland: Timber Press, 1991. 231 p.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 14 ed. Piracicaba: O autor, 2000, 477 p.

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

RADA, G. R. et al. **LTPP seasonal monitoring program**: instrumentation installation and data collection guidelines. FHWA-RD-94-110. McLean, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 1994, 70 p.

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.

RICHARDSON, D. **Ecology and biogeography of *Pinus***. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 527 p.

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.

ROTH, C. H.; MALICKI, M. A. ; PLAGGE, R. Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR. **Journal of Soil Science**, Madison, v. 43, p. 1- 13, 1992.

ROTH, K. et al. Calibration of time-domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. **Water Resources Research**, Washington, DC, v. 26, n. 10, p. 2267-2273, 1990.

ROZAS MELLADO, E. C. E. **Contribuição ao desenvolvimento tecnológico para a utilização de madeira serrada de *Eucalyptus grandis* (Hill Ex Maiden) na geração de produtos com maior valor agregado**. 1993. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal/Setor de Ciências Agrárias) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1993.

RYDEN, B. E. Winter soil moisture regime monitored by de time domain reflectometry technique (TDR). **Geography Annals**, Uppsala, 68(A), p. 175-184, 1986.

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, 1996

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.

SCOTT, M. G.; PHANG, W. A.; PATTERSON, D. E. **Developments in situ monitoring of moisture in pavement structures by time domain reflectometry (TDR)**. Ontario: The Transportation Technology and Energy Branch, 1983. 85 p.

SELIG, E.T.; MANSUKHANI, S. Relationship of soil moisture to the dielectric property. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, ASCE, v. 101, n. 8, p. 755-770, 1975.

SELKER, J. S.; GRAFF, L. ; STENNHUIS, T. Noninvasive time domain reflectometry moisture measurement probe. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, p.

934-936, 1993.

SEVERO, E. T. D. **Estudo sobre o efeito da vaporização nas propriedades e comportamento de secagem na madeira de *Eucalyptus dunnii* Maid.** 1998. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal/Setor de Ciências Agrárias) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1998.

SIAU, J. F. **Flow in wood.** Syracuse: Syracuse University Press, 1971. 131 p.

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

SKAAR, C. **Water in wood.** Syracuse: Syracuse University Press, 1972. 218 p.

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

SOUZA, C. F. **A utilização da reflectometria no domínio do tempo (TDR) na modelagem do bulbo molhado do solo irrigado por gotejamento.** 2002. 115 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola – Águas e Solos) – Universidade de Campinas, Campinas, 2002.

SOUZA, C. F.; MATSURA, E. E. Avaliação de sondas de TDR multi-haste segmentadas para estimativa da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 63-68, 2002.

SOUZA, L. D.; REICHARDT, K. Estimativas da capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, n. 20, p. 183-189, 1996.

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.

SWAIN, E. H. F. **A silvicultural note on southern silky oak (*Grevillea robusta*).** Brisbane: Queensland Forest Service, 1928. 18 p. (Bulletin, 9).

TINGA, W. R.; WOSS, W. A. G. ; BLOSSEY, D. F. Generalized approach to multiphase dielectric mixture theory. **Journal of Applied Physics**, Argonne, v. 44, n. 9, p. 3897-3902, 1973.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **FÍSICA.** Rio de Janeiro: LTC, 2006. v. 2, 550 p.

TOMASELLI, I. **Aspectos físicos da secagem de madeira de *Pinus elliottii* Engelm. acima de 100°C.** 1981. 128 f. Tese (Livre Docência em Engenharia e Tecnologia Rurais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1981.

TOMMASELLI, J. T. G. 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.

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.

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. Detecting infiltration of water through soil cracks by time domain reflectometry. **Geoderma**, Netherlands, v. 26, p. 13-23, 1981.

TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; BAILEY, W.G.; ZEBCHUK, W.D. The measurement of soil water content using a portable TDR hand probe. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 64, p. 313-321, 1984.

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.

VAZ, C. M. P. Aplicações de sondas espirais de TDR combinadas com tensiômetro e penetrômetro. In: WORKSHOP SOBRE APLICAÇÕES DA TÉCNICA DE TDR (REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO) NA AGRICULTURA, 1., 2001, Campinas: UNICAMP. **Aplicações da técnica TDR na agricultura**, 2001. p. 1-36.

VAZ, C.M.P.; HOPMANS, J.W. Simultaneous measurement of soil strength and water content with a combined penetrometer-moisture probe. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n. 1, p. 4-12, 2001.

VON HIPPEL, A. R. Dielectrics. In: CONDON, E. V.; ODISHAW, H. (ed.). **Handbook of Physics**. New York: McGraw-Hill, 1958.

VUOLO, J. H. **Fundamentos da teoria dos erros**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blüncher, 1996. 249 p.

WENGERT, G.; DENIG, J. Lumber drying: today and tomorrow. **Forest Products Journal**, Madison, v. 45, n. 5, p. 22-30, May 1995.

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.

WOBSCHALL, D. A theory of the complex dielectric permittivity of soil containing water: The semidisperse model. **IEEE Transaction of Geoscience Electronics**, Worldwide, v. 15, n.1, p. 49-58, 1977.

ZEGELIN, S. J.; WHITE, J. ; JENKINS, D. R. Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry. **Water Resources Research**, Washington, DC, v. 25, n. 11, p. 2367-2376, 1989.

## **9 APÊNDICES**

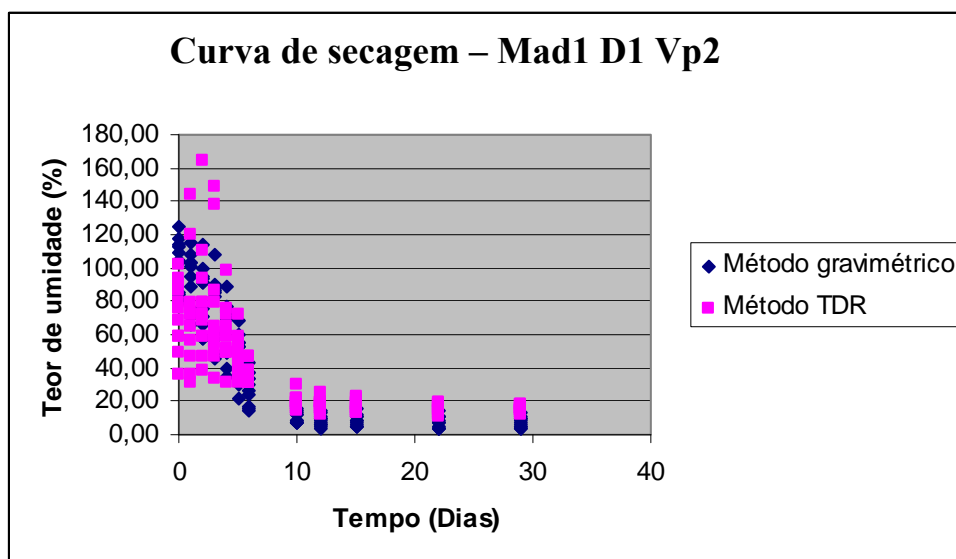
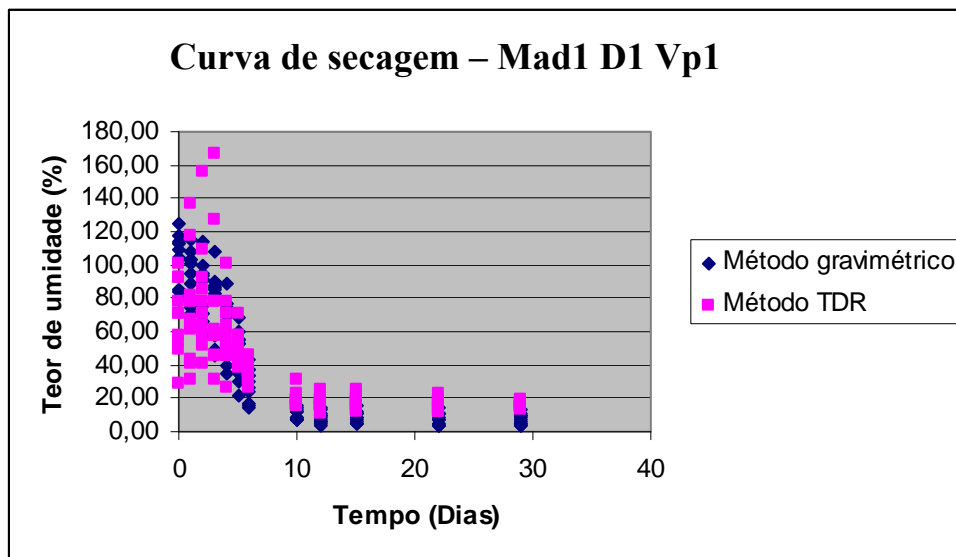
APÊNDICE 1 – CURVAS DE SECAGEM

APÊNDICE 2 – CURVAS DE CALIBRAÇÃO PARA A TDR

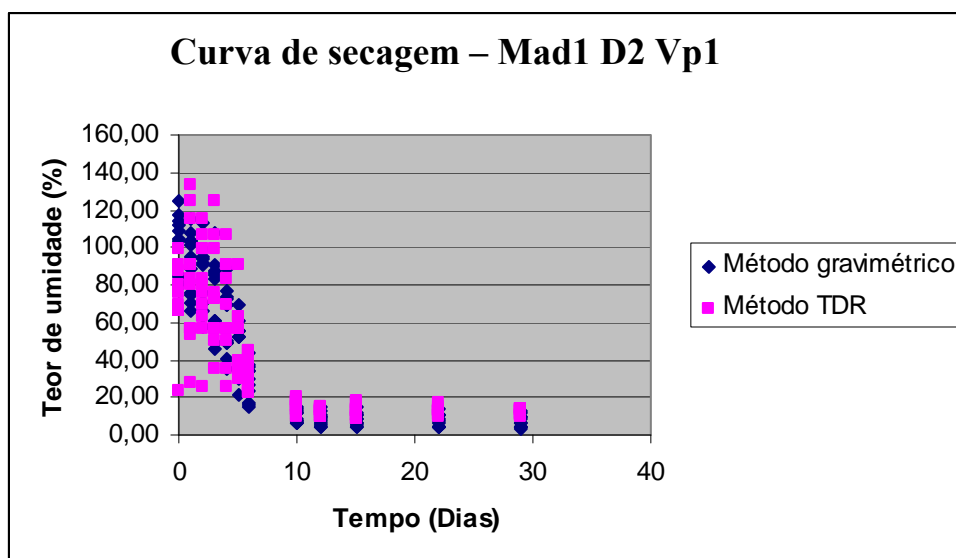
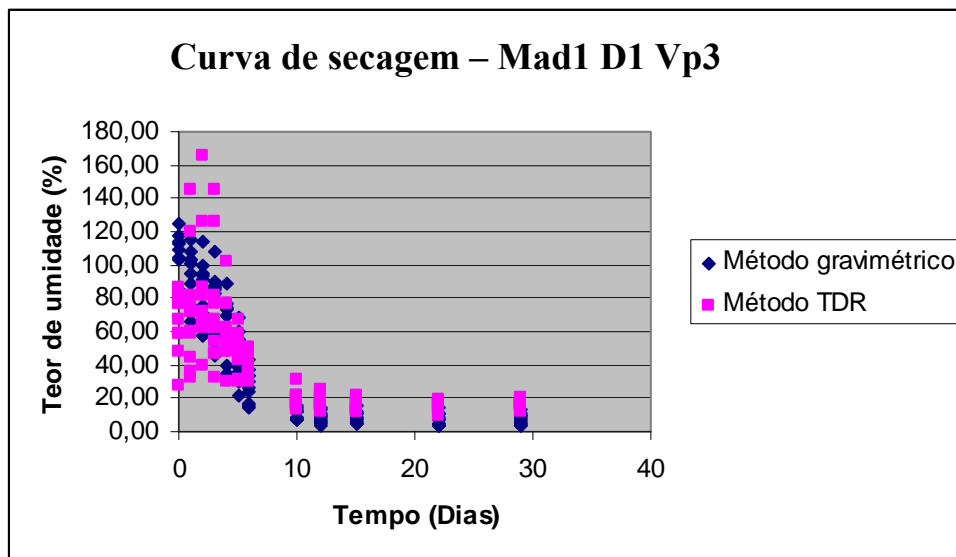
APÊNDICE 3 – CORRELAÇÕES ENTRE METODOLOGIAS

## 9.1 APÊNDICE 1 – CURVAS DE SECAGEM

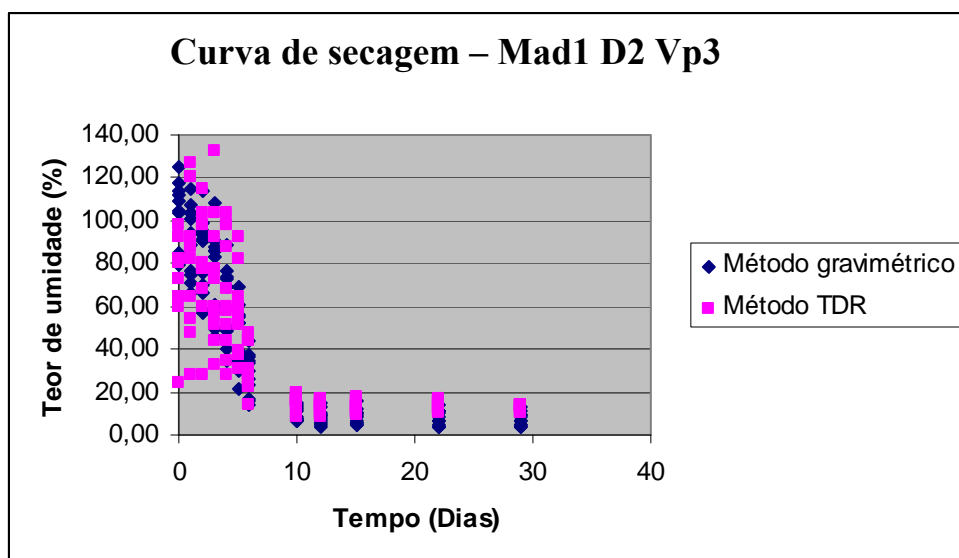
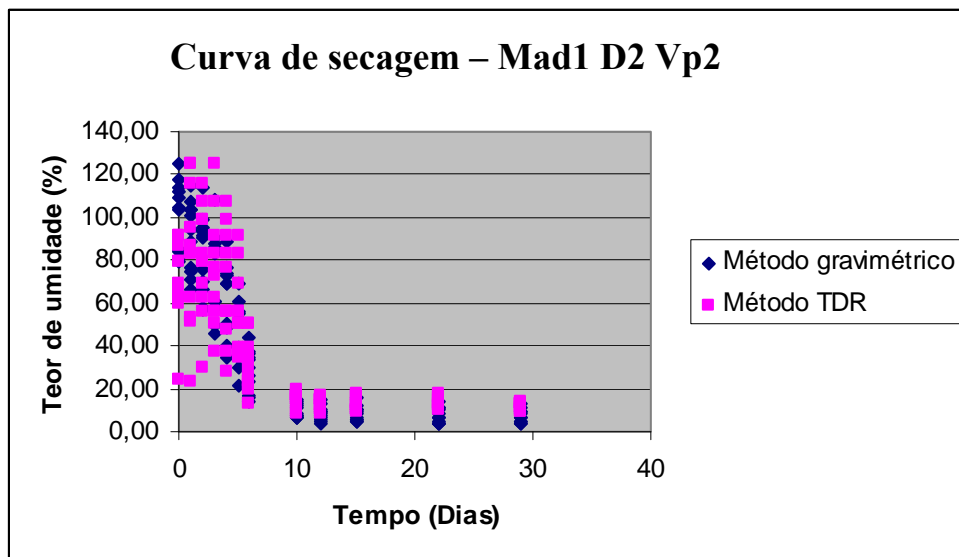
### APÊNDICE 1 CURVAS DE SECAGEM



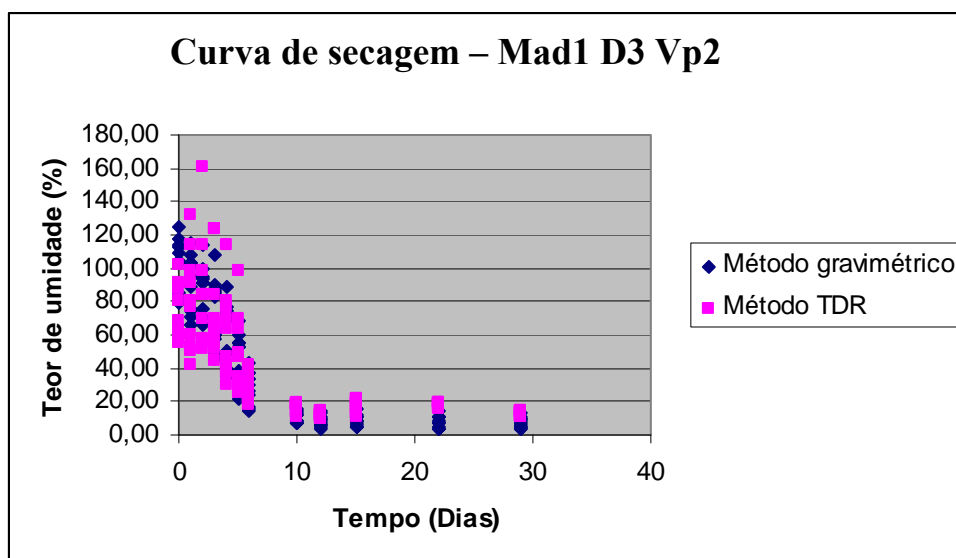
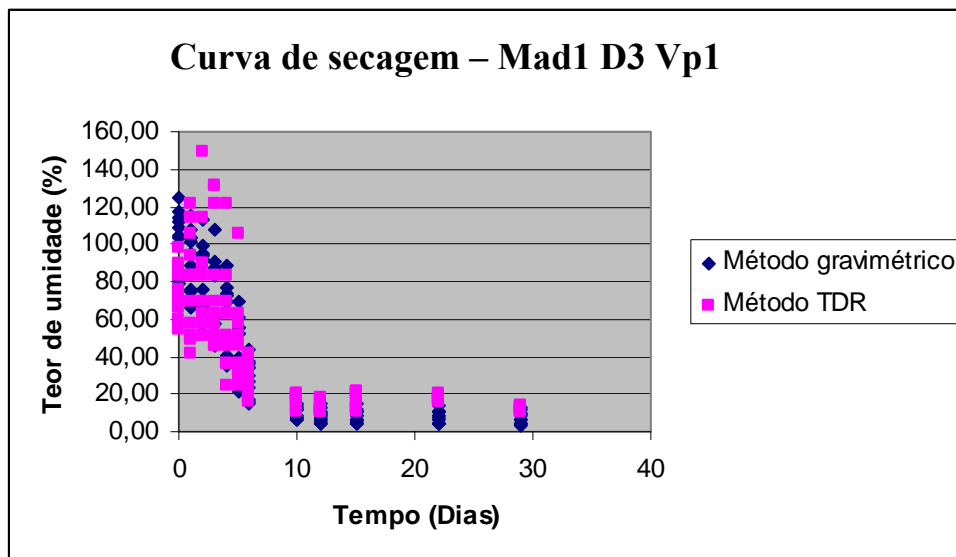
**Figura 28.** Curvas de secagem. Os pontos representam as medidas realizadas pelos métodos gravimétrico (padrão ouro ou referência) e TDR. Para **Mad1 D1 Vp1**, tem-se, madeira espécie *Pinus caribaea var. hondurensi*, com as probes distanciadas 10mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,33c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo) e para **Mad1 D1 Vp2**, tem-se, madeira espécie *Pinus caribaea var. hondurensi*, com as probes distanciadas 10mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,66c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



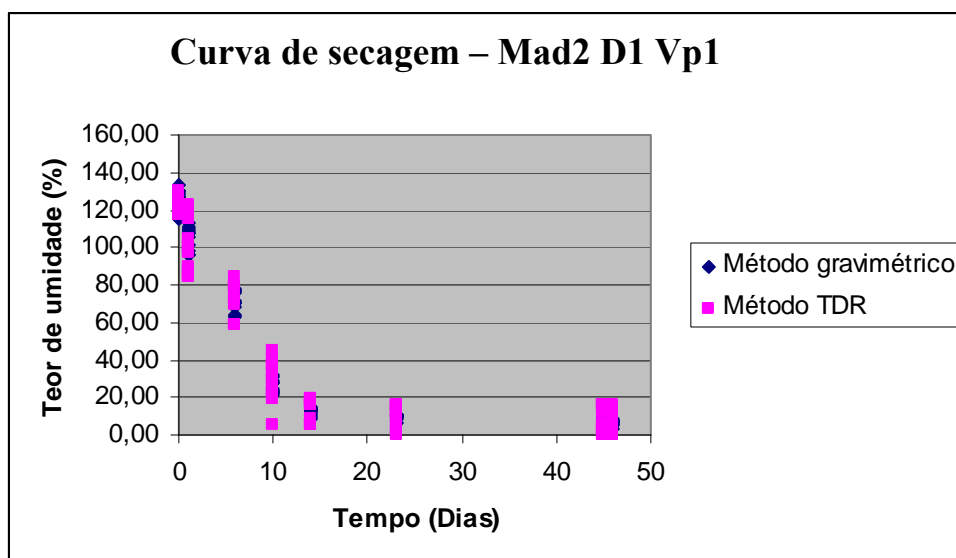
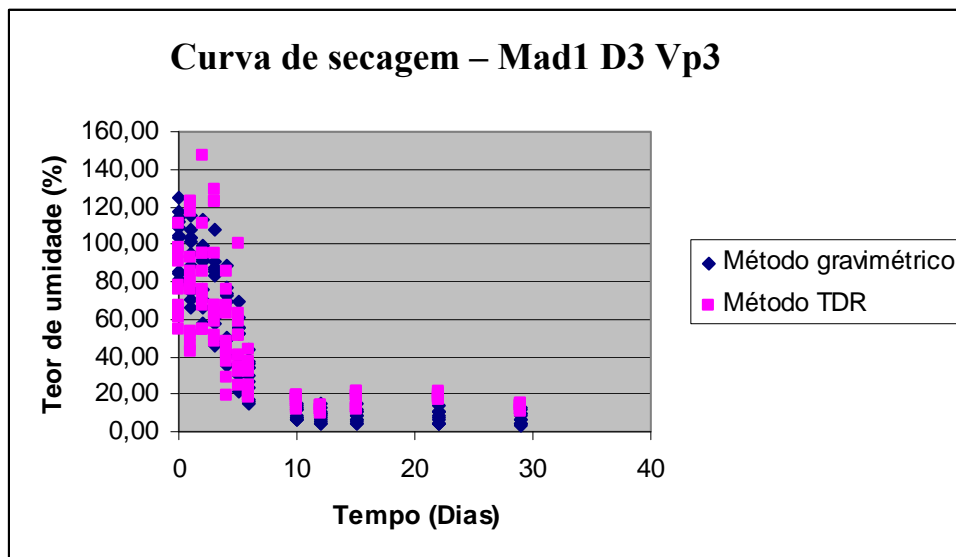
**Figura 29.** Curvas de secagem. Os pontos representam as medidas realizadas pelos métodos gravimétrico (padrão ouro ou referência) e TDR. Para **Mad1 D1 Vp3**, tem-se, madeira espécie *Pinus caribaea* var. *hondurensi*, com as probes distanciadas 10mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,99c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo) e para **Mad1 D2 Vp1**, tem-se, madeira espécie *Pinus caribaea* var. *hondurensi*, com as probes distanciadas 20mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,33c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



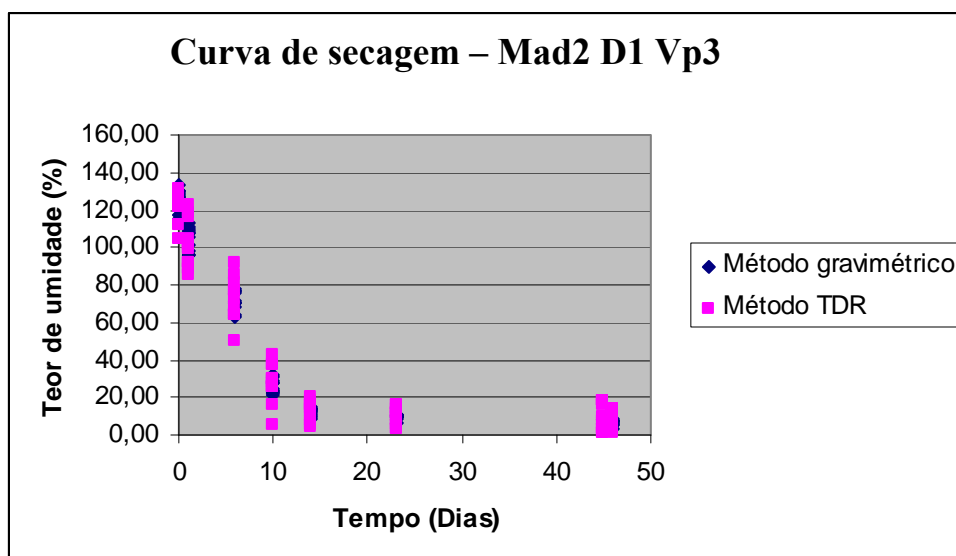
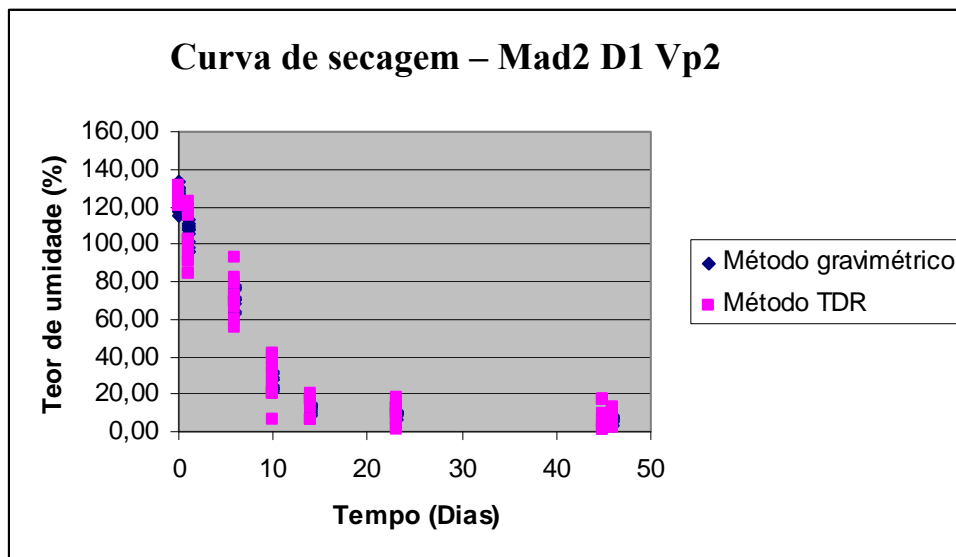
**Figura 30.** Curvas de secagem. Os pontos representam as medidas realizadas pelos métodos gravimétrico (padrão ouro ou referência) e TDR. Para **Mad1 D2 Vp2**, tem-se, madeira espécie *Pinus caribaea var. hondurensi*, com as probes distanciadas 20mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,66c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo) e para **Mad1 D2 Vp3**, tem-se, madeira espécie *Pinus caribaea var. hondurensi*, com as probes distanciadas 20mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,99c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



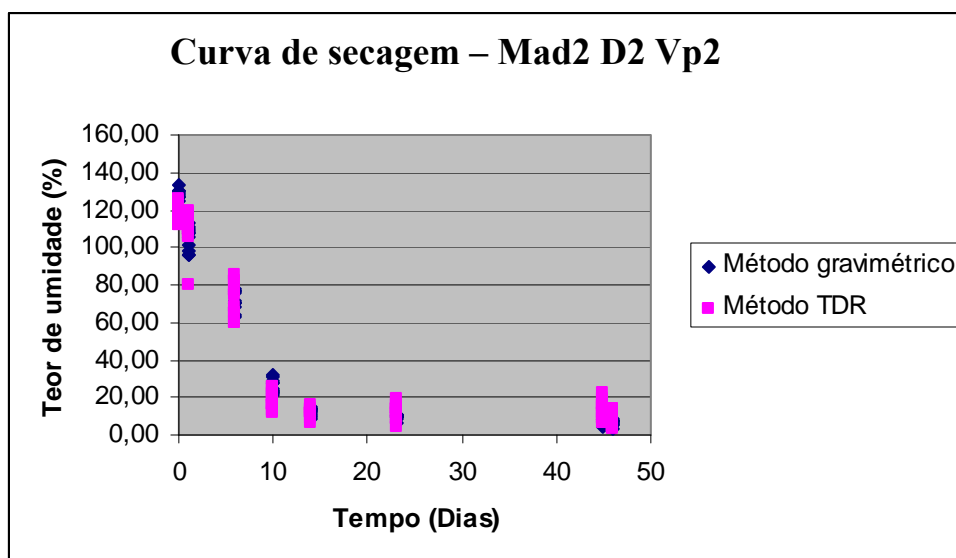
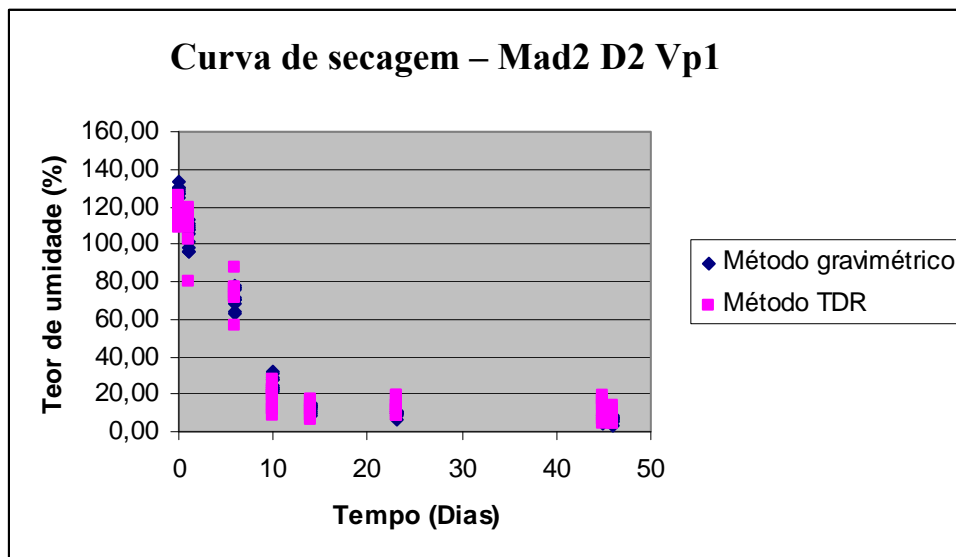
**Figura 31.** Curvas de secagem. Os pontos representam as medidas realizadas pelos métodos gravimétrico (padrão ouro ou referência) e TDR. Para **Mad1 D3 Vp1**, tem-se, madeira espécie *Pinus caribaea var. hondurensi*, com as probes distanciadas 30mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,33c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo) e para **Mad1 D3 Vp2**, tem-se, madeira espécie *Pinus caribaea var. hondurensi*, com as probes distanciadas 30mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,66c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



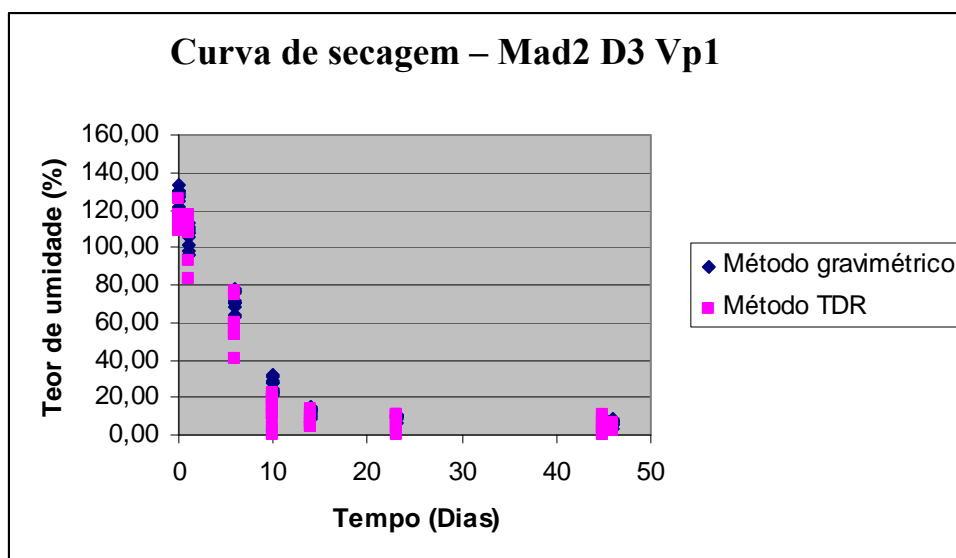
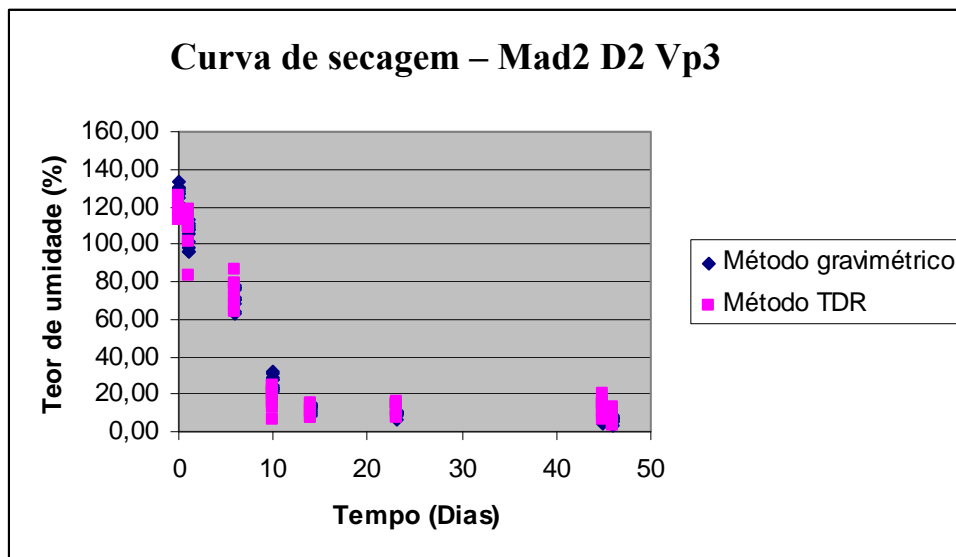
**Figura 32.** Curvas de secagem. Os pontos representam as medidas realizadas pelos métodos gravimétrico (padrão ouro ou referência) e TDR. Para **Mad1 D3 Vp3**, tem-se, madeira espécie *Pinus caribaea var. hondurensi*, com as probes distanciadas 30mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,99c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo) e para **Mad2 D1 Vp1**, tem-se, madeira espécie *Grevillea robusta (Cunn.)*, com as probes distanciadas 10mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,33c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



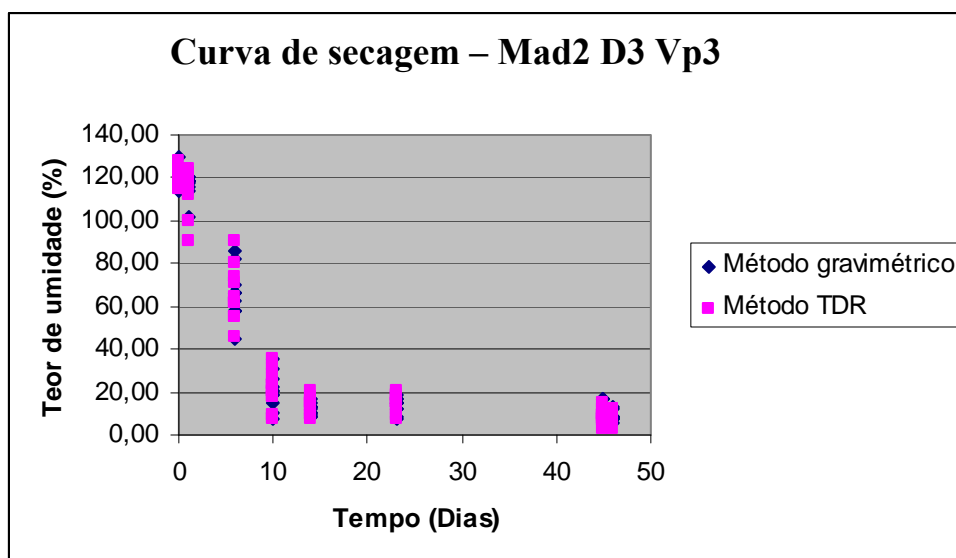
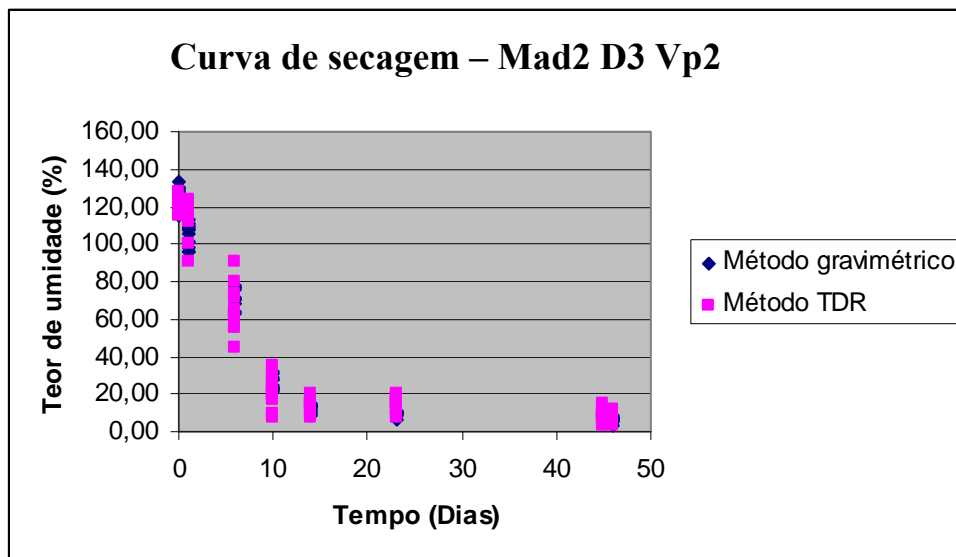
**Figura 33.** Curvas de secagem. Os pontos representam as medidas realizadas pelos métodos gravimétrico (padrão ouro ou referência) e TDR. Para **Mad2 D1 Vp2**, tem-se, madeira espécie *Grevillea robusta* (Cunn.), com as probes distanciadas 10mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,66c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo) e para **Mad2 D1 Vp3**, tem-se, madeira espécie *Grevillea robusta* (Cunn.), com as probes distanciadas 10mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,99c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



**Figura 34.** Curvas de secagem. Os pontos representam as medidas realizadas pelos métodos gravimétrico (padrão ouro ou referência) e TDR. Para **Mad2 D2 Vp1**, tem-se, madeira espécie *Grevillea robusta* (Cunn.), com as probes distanciadas 20mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,33c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo) e para **Mad2 D2 Vp2**, tem-se, madeira espécie *Grevillea robusta* (Cunn.), com as probes distanciadas 20mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,66c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



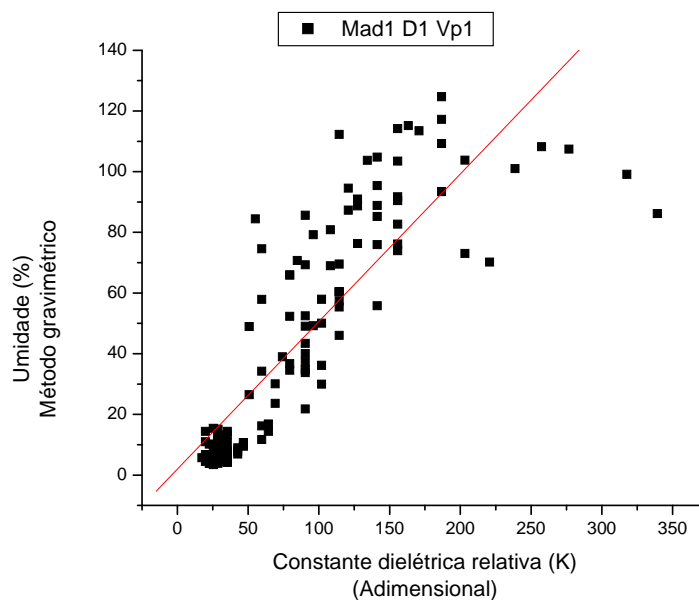
**Figura 35.** Curvas de secagem. Os pontos representam as medidas realizadas pelos métodos gravimétrico (padrão ouro ou referência) e TDR. Para **Mad2 D2 Vp3**, tem-se, madeira espécie *Grevillea robusta* (Cunn.), com as probes distanciadas 20mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,99c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo) e para **Mad2 D3 Vp1**, tem-se, madeira espécie *Grevillea robusta* (Cunn.), com as probes distanciadas 30mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,33c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



**Figura 36.** Curvas de secagem. Os pontos representam as medidas realizadas pelos métodos gravimétrico (padrão ouro ou referência) e TDR. Para **Mad2 D3 Vp2**, tem-se, madeira espécie *Grevillea robusta* (Cunn.), com as probes distanciadas 30mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,66c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo) e para **Mad2 D3 Vp3**, tem-se, madeira espécie *Grevillea robusta* (Cunn.), com as probes distanciadas 30mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,99c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).

## 9.2 APÊNDICE 2 - CURVAS DE CALIBRAÇÃO PARA A TDR

### APÊNDICE 2 CURVAS DE CALIBRAÇÃO PARA A TDR



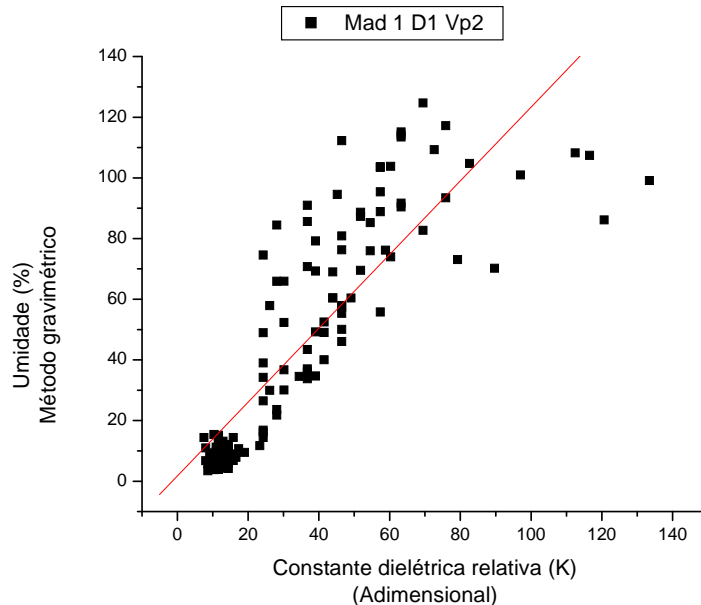
[21/10/2008 09:26 "/Graph1" (2454760)]

Linear Regression for Data1\_A:

$$Y = A + B \cdot X$$

Parameter	Value	Error	
A	1,97877	2,86292	
B	0,48637	0,02652	
R	SD	N	P
0,84923	19,76907	132	<0.0001

**Figura 37.** Regressão linear obtida pelo software Microcal Origin 6.0 e gráfico do teor de água em função da constante dielétrica relativa para Mad1 D1 Vp1, ou seja, madeira espécie *Pinus caribaea var. hondurensi*, com as probes distanciadas 10mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,33c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



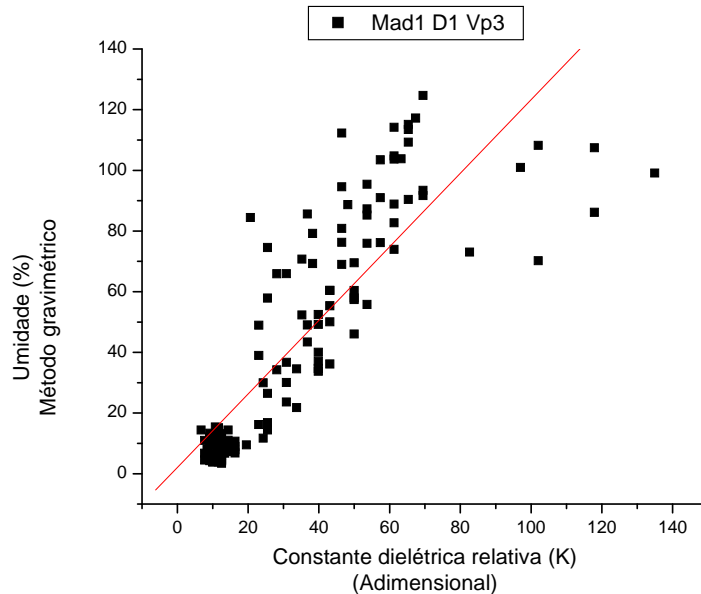
[18/10/2008 20:34 "/Graph1" (2454757)]

Linear Regression for Data1\_A:

$$Y = A + B \cdot X$$

Parameter	Value	Error	
A	1,76459	2,84593	
B	1,21601	0,06564	
R	SD	N	P
0,85164	19,62339	132	<0.0001

**Figura 38.** Regressão linear obtida pelo software Microcal Origin 6.0 e gráfico do teor de água em função da constante dielétrica relativa para Mad1 D1 Vp2, ou seja, madeira espécie *Pinus caribaea var. hondurensi*, com as probes distanciadas 10mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,66c. Onde  $c=3 \cdot 10^8$  m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



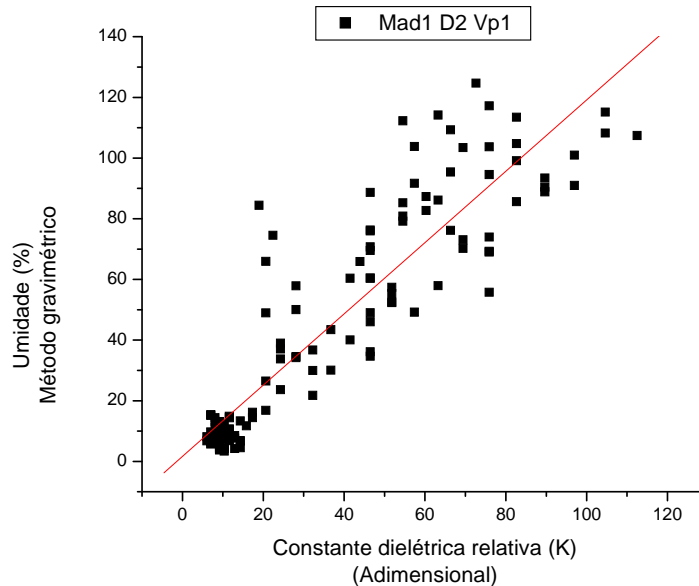
[18/10/2008 20:35 "/Graph1" (2454757)]

Linear Regression for Data1\_A:

$$Y = A + B \cdot X$$

Parameter	Value	Error	
A	2,07422	2,90887	
B	1,21213	0,06739	
R	SD	N	P
0,8446	20,0454	132	<0.0001

**Figura 39.** Regressão linear obtida pelo software Microcal Origin 6.0 e gráfico do teor de água em função da constante dielétrica relativa para Mad1 D1 Vp3, ou seja, madeira espécie *Pinus caribaea var. hondurensi*, com as probes distanciadas 10mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,99c. Onde  $c=3 \cdot 10^8$  m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



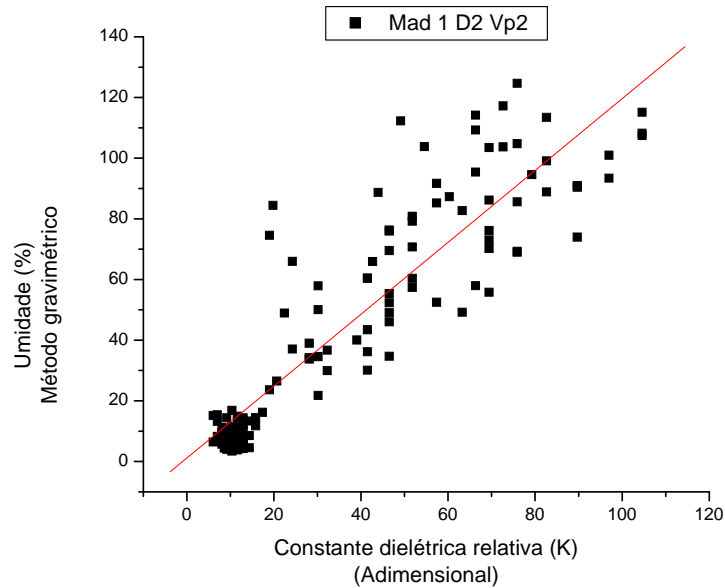
[18/10/2008 20:37 "/Graph1" (2454757)]

Linear Regression for Data1\_A:

$$Y = A + B \cdot X$$

Parameter	Value	Error	
A	1,62469	2,22338	
B	1,17557	0,04835	
R	SD	N	P
0,90538	15,89678	132	<0.0001

**Figura 40.** Regressão linear obtida pelo software Microcal Origin 6.0 e gráfico do teor de água em função da constante dielétrica relativa para Mad1 D2 Vp1, ou seja, madeira espécie *Pinus caribaea var. hondurensi*, com as probes distanciadas 20mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,33c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



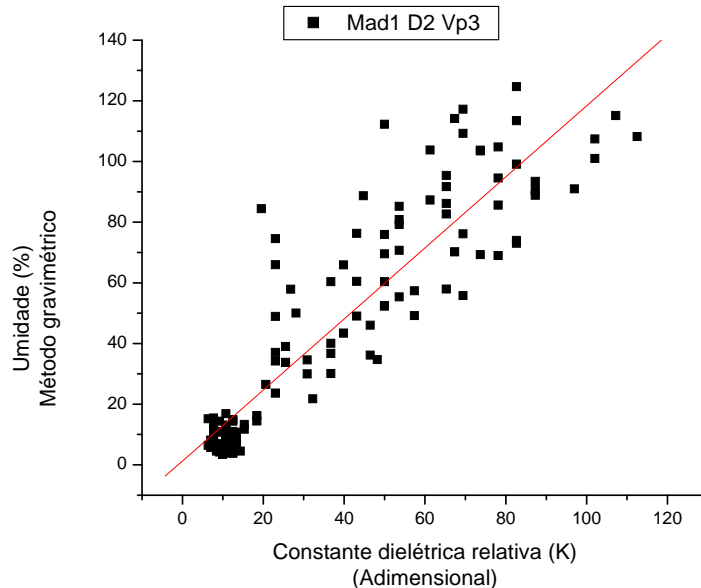
[18/10/2008 20:38 "/Graph1" (2454757)]

Linear Regression for Data1\_A:

$$Y = A + B \cdot X$$

Parameter	Value	Error	
A	1,13028	2,26813	
B	1,18513	0,04942	
R	SD	N	P
0,90312	16,07626	132	<0.0001

**Figura 41.** Regressão linear obtida pelo software Microcal Origin 6.0 e gráfico do teor de água em função da constante dielétrica relativa para Mad1 D2 Vp2, ou seja, madeira espécie *Pinus caribaea var. hondurensi*, com as probes distanciadas 20mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,66c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



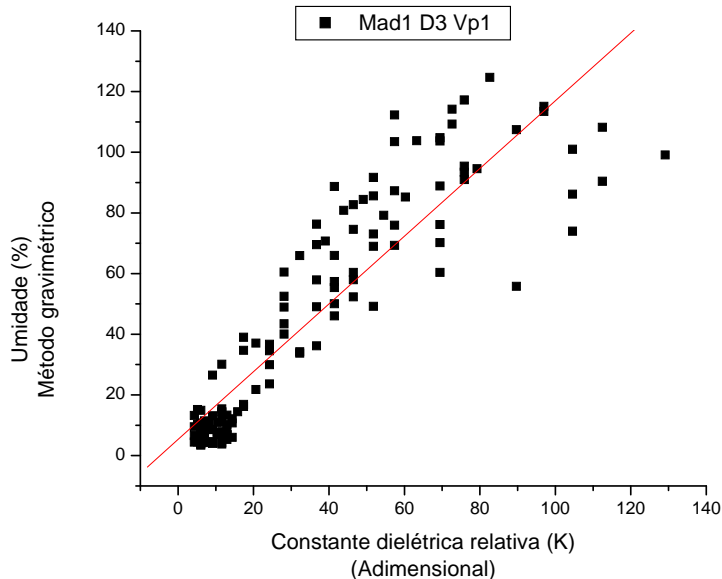
[18/10/2008 20:39 "/Graph1" (2454757)]

Linear Regression for Data1\_A:

$$Y = A + B \cdot X$$

Parameter	Value	Error	
A	1,22362	2,21693	
B	1,17122	0,04773	
R	SD	N	P
0,9069	15,77523	132	<0.0001

**Figura 42.** Regressão linear obtida pelo software Microcal Origin 6.0 e gráfico do teor de água em função da constante dielétrica relativa para Mad1 D2 Vp3, ou seja, madeira espécie *Pinus caribaea var. hondurensi*, com as probes distanciadas 20mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,99c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



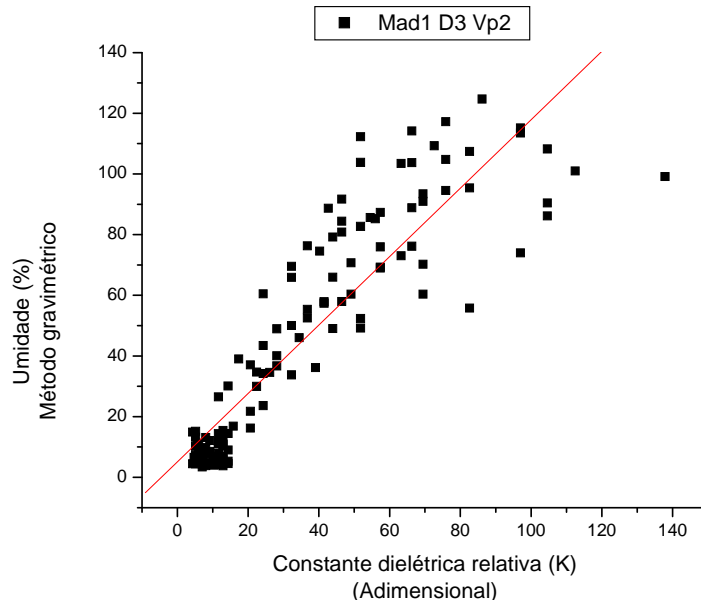
[18/10/2008 20:41 "/Graph1" (2454757)]

Linear Regression for Data1\_A:

$$Y = A + B \cdot X$$

Parameter	Value	Error	
A	5,29821	2,16128	
B	1,1169	0,04722	
R	SD	N	P
0,9008	16,25763	132	<0.0001

**Figura 43.** Regressão linear obtida pelo software Microcal Origin 6.0 e gráfico do teor de água em função da constante dielétrica relativa para Mad1 D3 Vp1, ou seja, madeira espécie *Pinus caribaea var. hondurensi*, com as probes distanciadas 30mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,33c. Onde  $c=3 \cdot 10^8$  m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



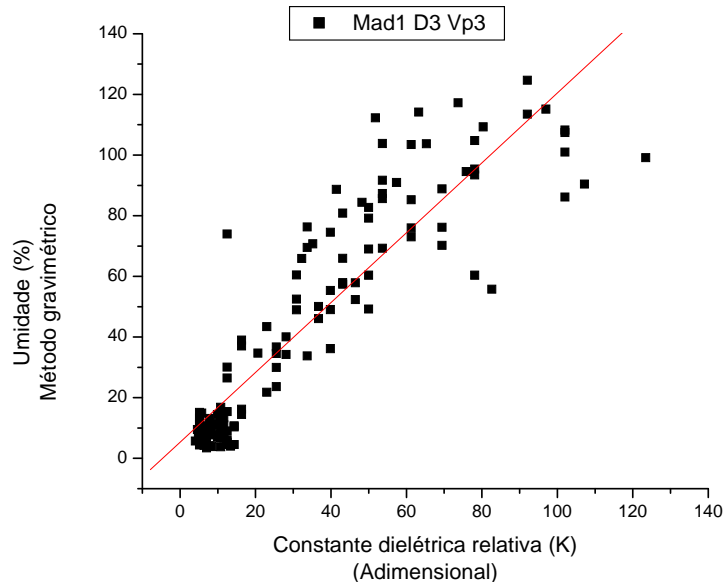
[18/10/2008 20:46 "/Graph1" (2454757)]

Linear Regression for Data1\_A:

$$Y = A + B \cdot X$$

Parameter	Value	Error	
A	5,09042	2,21742	
B	1,1277	0,04886	
R	SD	N	P
0,89655	16,58361	132	<0.0001

**Figura 44.** Regressão linear obtida pelo software Microcal Origin 6.0 e gráfico do teor de água em função da constante dielétrica relativa para Mad1 D3 Vp2, ou seja, madeira espécie *Pinus caribaea var. hondurensi*, com as probes distanciadas 30mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,66c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



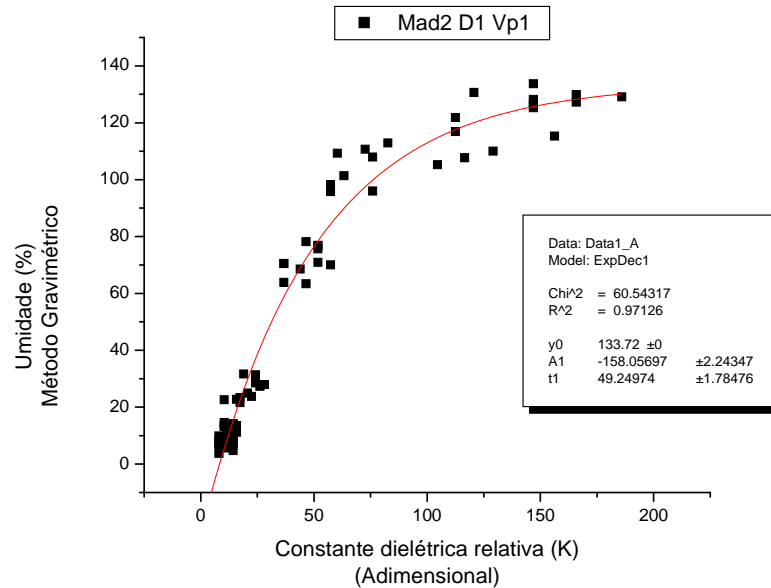
[18/10/2008 20:44 "/Graph1" (2454757)]

Linear Regression for Data1\_A:

$$Y = A + B \cdot X$$

Parameter	Value	Error	
A	5,28763	2,17982	
B	1,15163	0,04914	
R	SD	N	P
0,89924	16,37824	132	<0.0001

**Figura 45.** Regressão linear obtida pelo software Microcal Origin 6.0 e gráfico do teor de água em função da constante dielétrica relativa para Mad1 D3 Vp3, ou seja, madeira espécie *Pinus caribaea var. hondurensi*, com as probes distanciadas 30mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,99c. Onde  $c=3 \cdot 10^8$  m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



[16/10/2008 08:12 "/Graph1" (2454755)]

Fit Data1\_A to  $Y = Y_0 + A_1 \cdot e^{\left(\frac{-x}{t}\right)}$ :

Chi<sup>2</sup> 60,54317

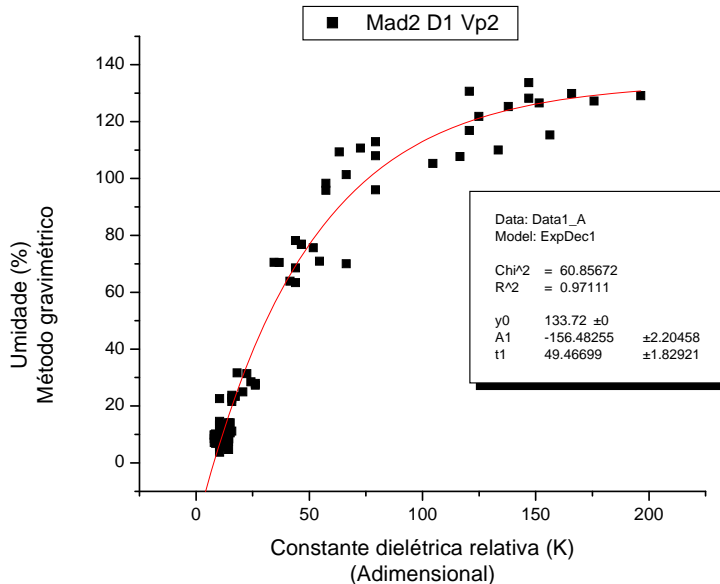
R<sup>2</sup> 0,97126

---

Y <sub>0</sub>	133,72	0
A <sub>1</sub>	-158,05697	2,24347
t <sub>1</sub>	49,24974	1,78476

---

**Figura 46.** Regressão obtida pelo software Microcal Origin 6.0 e gráfico do teor de água em função da constante dielétrica relativa para Mad2 D1 Vp1, ou seja, madeira espécie *Grevillea robusta* (Cunn.), com as probes distanciadas 10mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,33c. Onde  $c=3 \cdot 10^8$  m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



[16/10/2008 08:19 "/Graph1" (2454755)]

Fit Data1\_A to  $Y = Y_0 + A_1 \cdot e^{\left(\frac{-x}{t}\right)}$ :

Chi<sup>2</sup> 60,85672

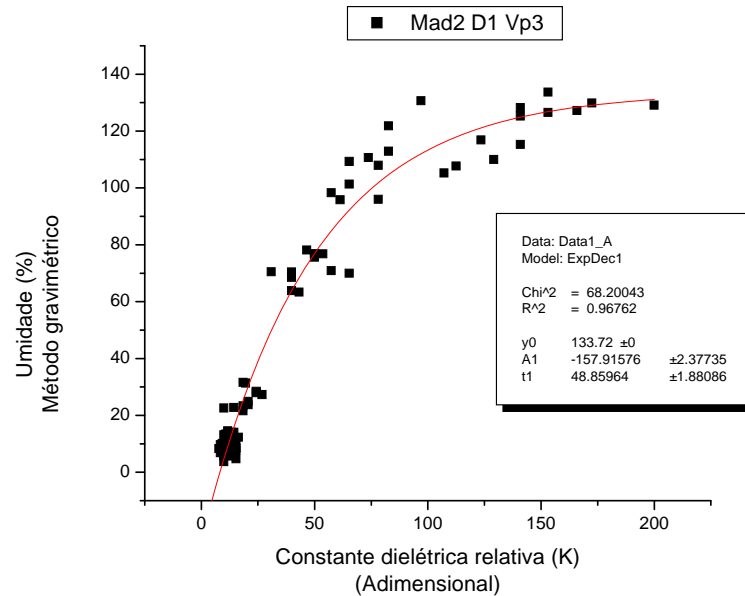
R<sup>2</sup> 0,97111

---

Y <sub>0</sub>	133,72	0
A <sub>1</sub>	-156,48255	2,20458
t <sub>1</sub>	49,46699	1,82921

---

**Figura 47.** Regressão obtida pelo software Microcal Origin 6.0 e gráfico do teor de água em função da constante dielétrica relativa para Mad2 D1 Vp2, ou seja, madeira espécie *Grevillea robusta* (Cunn.), com as probes distanciadas 10mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,66c. Onde  $c=3 \cdot 10^8$  m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



[16/10/2008 08:28 "/Graph1" (2454755)]

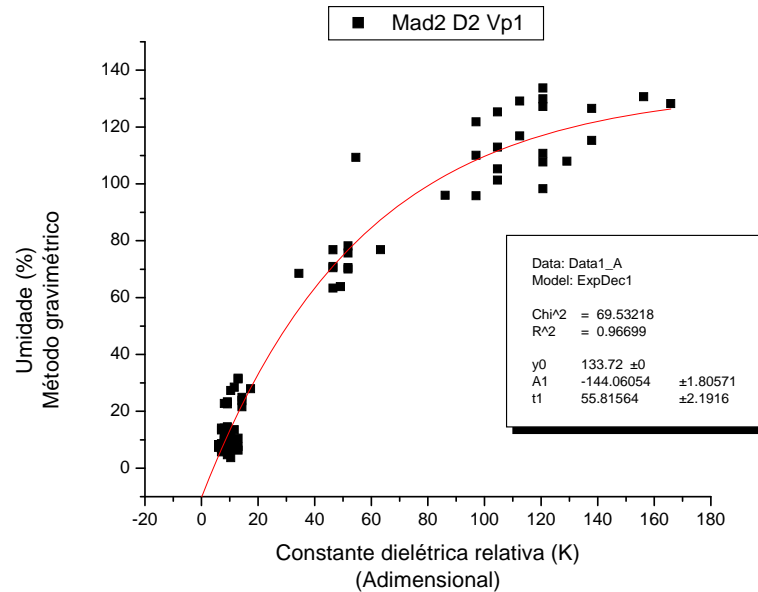
Fit Data1\_A to  $Y = Y_0 + A_1 \cdot e^{\left(\frac{-x}{t}\right)}$ :

Chi<sup>2</sup> 68,20043

R<sup>2</sup> 0,96762

Y <sub>0</sub>	133,72	0
A <sub>1</sub>	-157,91576	2,37735
t <sub>1</sub>	48,85964	1,88086

**Figura 48.** Regressão obtida pelo software Microcal Origin 6.0 e gráfico do teor de água em função da constante dielétrica relativa para Mad2 D1 Kb3, ou seja, madeira espécie *Grevillea robusta* (Cunn.), com as probes distanciadas 10mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,99c. Onde  $c=3 \cdot 10^8$  m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



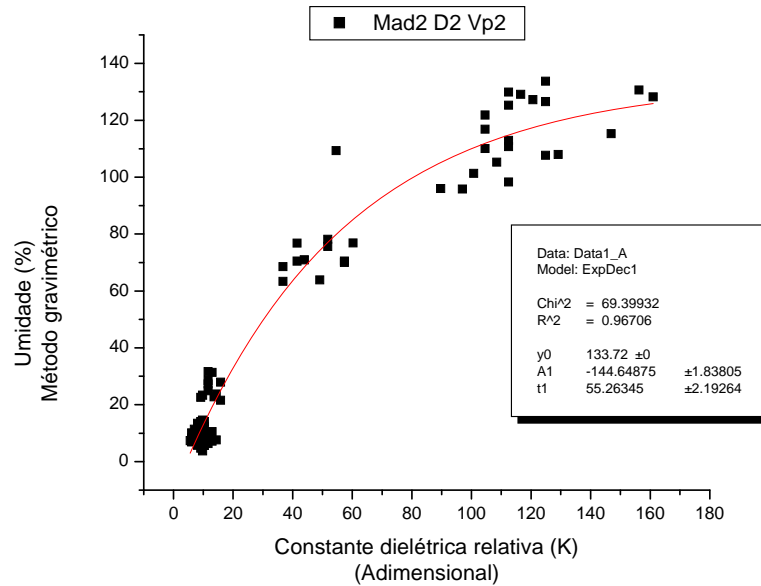
[16/10/2008 08:31 "/Graph1" (2454755)]

Fit Data1\_A to  $Y = Y_0 + A_1 \cdot e^{\left(\frac{-x}{t}\right)}$ :

Chi<sup>2</sup> 69,53218  
R<sup>2</sup> 0,96699

$Y_0$	133,72	0
$A_1$	-144,06054	1,80571
$t_1$	55,81564	2,1916

**Figura 49.** Regressão obtida pelo software Microcal Origin 6.0 e gráfico do teor de água em função da constante dielétrica relativa para Mad2 D2 Vp1, ou seja, madeira espécie *Grevillea robusta* (Cunn.), com as probes distanciadas 20mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,33c. Onde  $c=3 \cdot 10^8$  m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



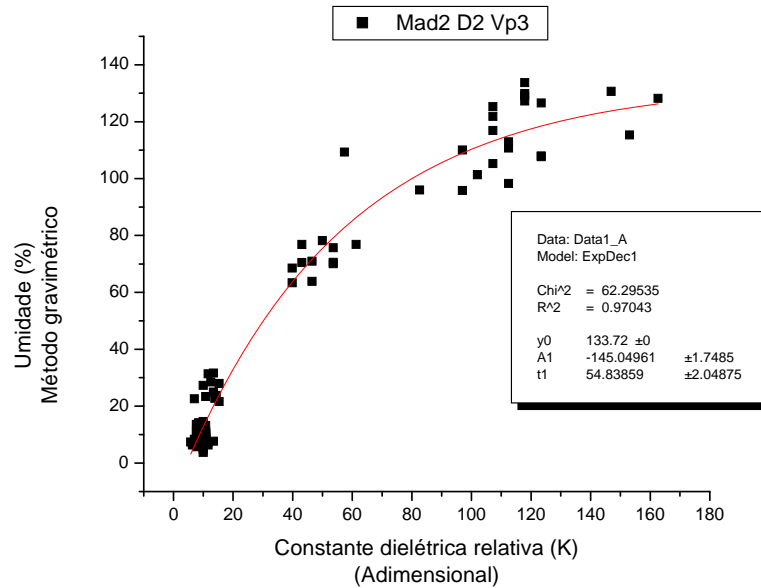
[16/10/2008 08:39 "/Graph1" (2454755)]

Fit Data1\_A to  $Y = Y_0 + A_1 \cdot e^{\left(\frac{-x}{t}\right)}$ :

Chi<sup>2</sup> 69,39932  
R<sup>2</sup> 0,96706

Y <sub>0</sub>	133,72	0
A <sub>1</sub>	-144,64875	1,83805
t <sub>1</sub>	55,26345	2,19264

**Figura 50.** Regressão obtida pelo software Microcal Origin 6.0 e gráfico do teor de água em função da constante dielétrica relativa para Mad2 D2 Vp2, ou seja, madeira espécie *Grevillea robusta* (Cunn.), com as probes distanciadas 20mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,66c. Onde  $c=3 \cdot 10^8$  m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



[17/10/2008 14:40 "/Graph1" (2454756)]

Fit Data1\_A to  $Y = Y_0 + A_1 \cdot e^{\left(\frac{-x}{t}\right)}$ :

Chi<sup>2</sup> 62,29535

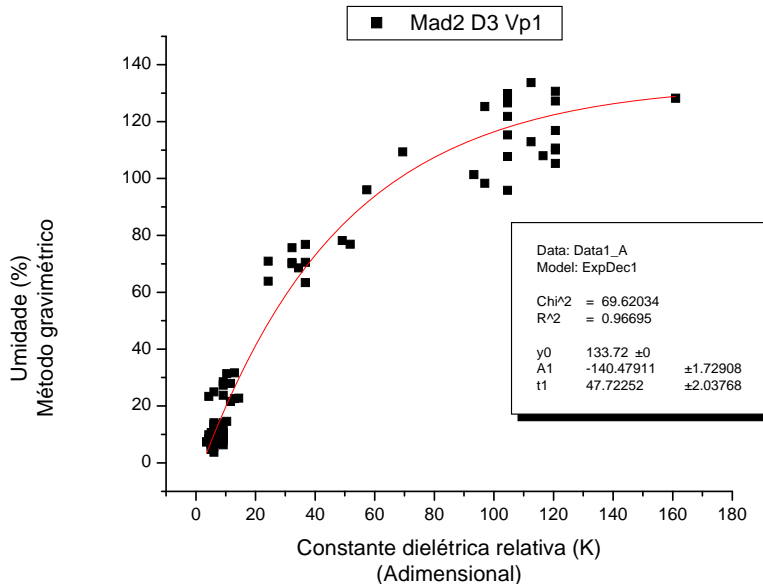
R<sup>2</sup> 0,97043

---

Y <sub>0</sub>	133,72	0
A <sub>1</sub>	-145,04961	1,7485
t <sub>1</sub>	54,83859	2,04875

---

**Figura 51.** Regressão obtida pelo software Microcal Origin 6.0 e gráfico do teor de água em função da constante dielétrica relativa para Mad2 D2 Vp3, ou seja, madeira espécie *Grevillea robusta* (Cunn.), com as probes distanciadas 20mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,99c. Onde  $c=3 \cdot 10^8$  m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



[16/10/2008 08:41 "/Graph1" (2454755)]

Fit Data1\_A to  $Y = Y_0 + A_1 \cdot e^{\left(\frac{-x}{t}\right)}$ :

Chi<sup>2</sup> 69,62034

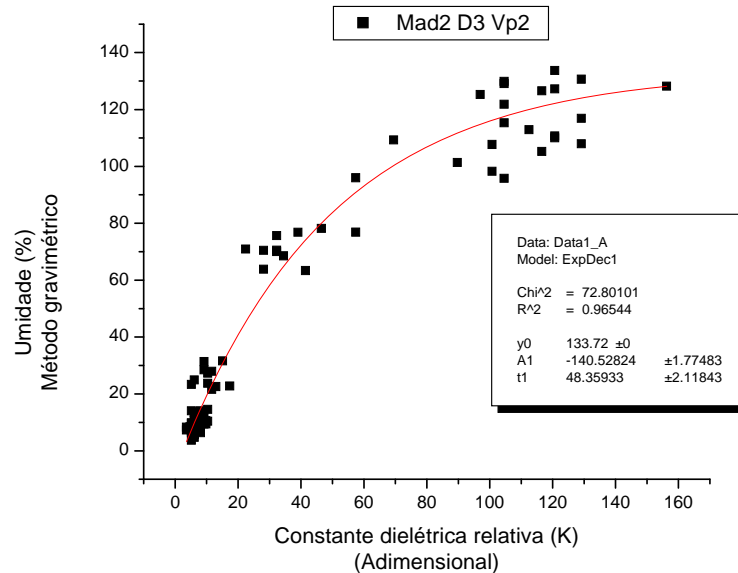
R<sup>2</sup> 0,96695

---

Y <sub>0</sub>	133,72	0
A <sub>1</sub>	-140,47911	1,72908
t <sub>1</sub>	47,72252	2,03768

---

**Figura 52.** Regressão obtida pelo software Microcal Origin 6.0 e gráfico do teor de água em função da constante dielétrica relativa para Mad2 D3 Vp1, ou seja, madeira espécie *Grevillea robusta* (Cunn.), com as probes distanciadas 30mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,33c. Onde  $c=3 \cdot 10^8$  m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



[16/10/2008 08:43 "/Graph1" (2454755)]

Fit Data1\_A to  $Y = Y_0 + A_1 \cdot e^{\left(\frac{-x}{t}\right)}$ :

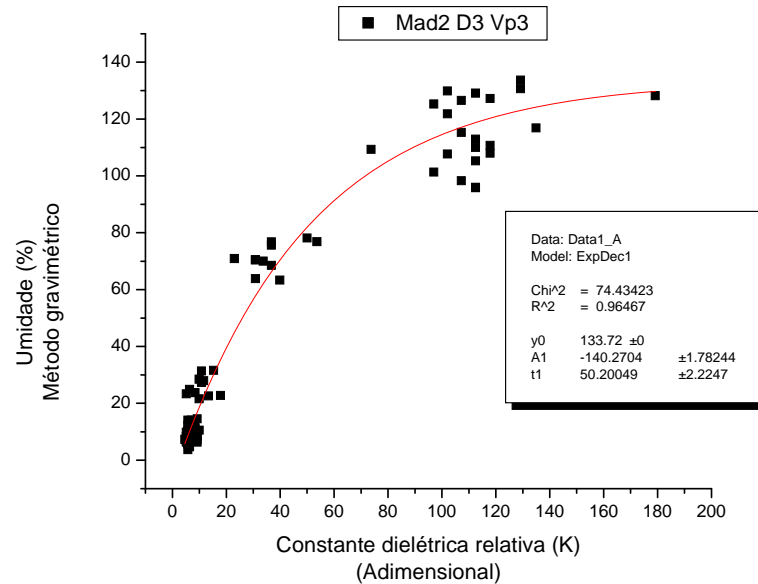
Chi^2 72,80101  
R^2 0,96544

---

$Y_0$	133,72	0
$A_1$	-140,52824	1,77483
$t_1$	48,35933	2,11843

---

**Figura 53.** Regressão obtida pelo software Microcal Origin 6.0 e gráfico do teor de água em função da constante dielétrica relativa para Mad2 D3 Vp2, ou seja, madeira espécie *Grevillea robusta* (Cunn.), com as probes distanciadas 30mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,66c. Onde  $c=3 \cdot 10^8$  m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



[16/10/2008 08:45 "/Graph1" (2454755)]

Fit Data1\_A to  $Y = Y_0 + A_1 \cdot e^{\left(\frac{-x}{t}\right)}$ :

Chi<sup>2</sup> 74,43423

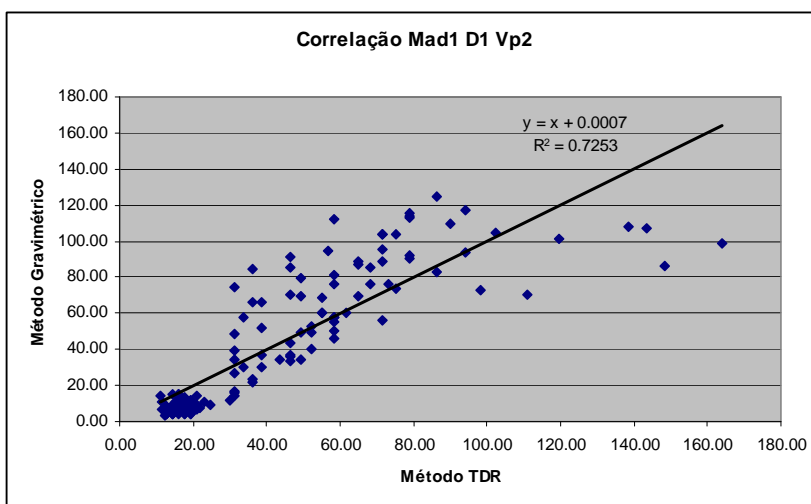
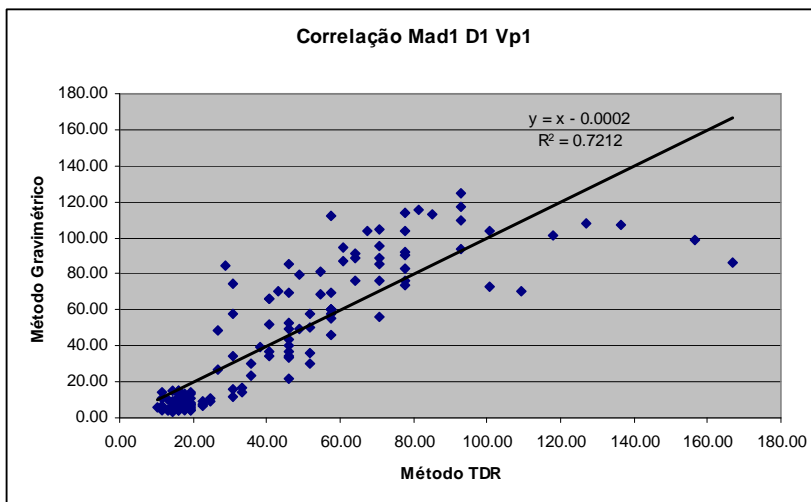
R<sup>2</sup> 0,96467

Y <sub>0</sub>	133,72	0
A <sub>1</sub>	-140,2704	1,78244
t <sub>1</sub>	50,20049	2,2247

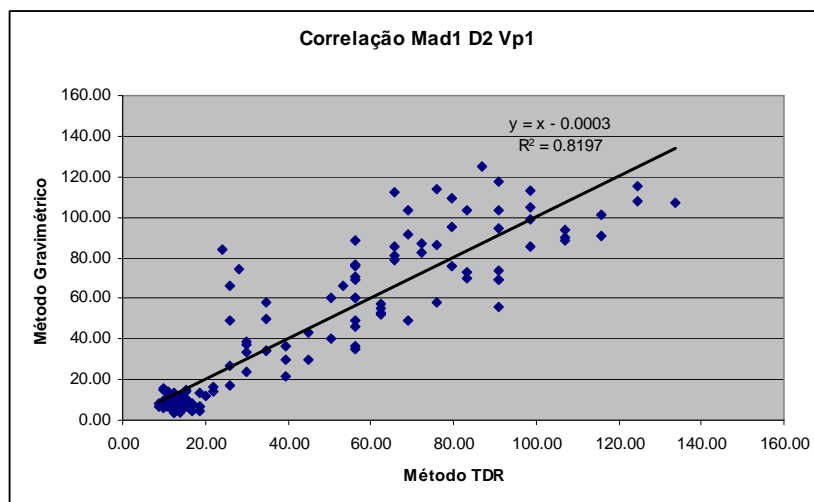
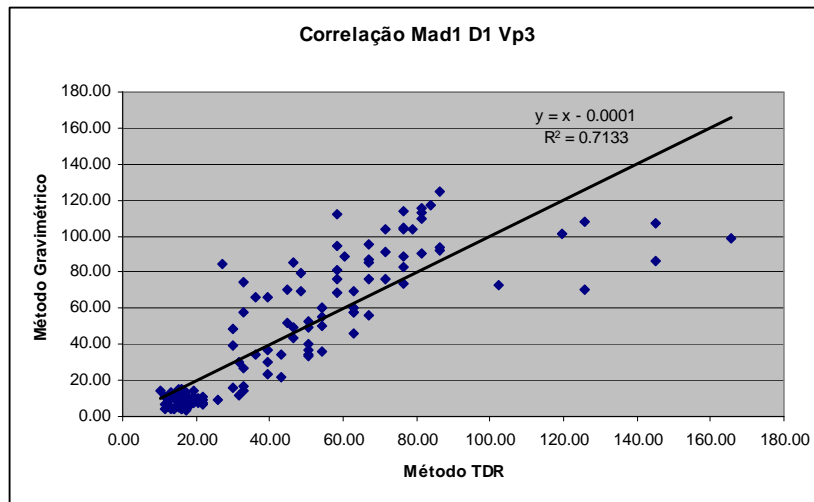
**Figura 54.** Regressão obtida pelo software Microcal Origin 6.0 e gráfico do teor de água em função da constante dielétrica relativa para Mad2 D3 Vp3, ou seja, madeira espécie *Grevillea robusta* (Cunn.), com as probes distanciadas 30mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,99c. Onde  $c=3 \cdot 10^8$  m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).

### 9.3 APÊNDICE 3 – CORRELAÇÃO ENTRE METODOLOGIAS

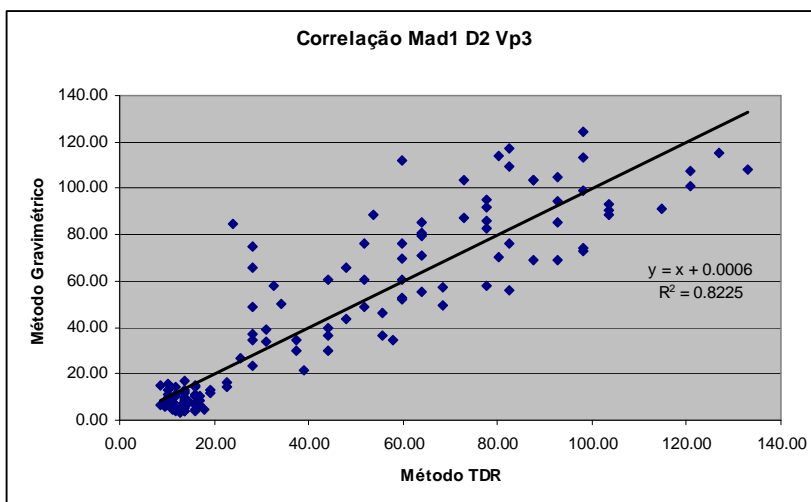
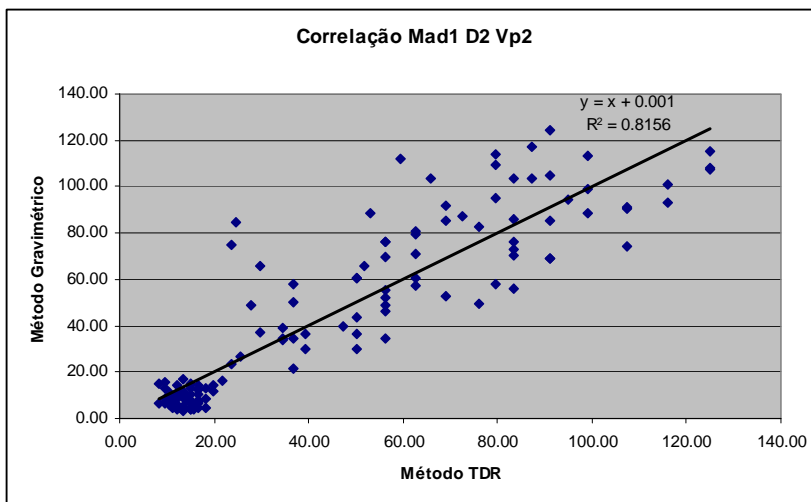
APÊNDICE 3  
CORRELAÇÃO ENTRE METODOLOGIAS:  
GRAVIMÉTRICO X TDR



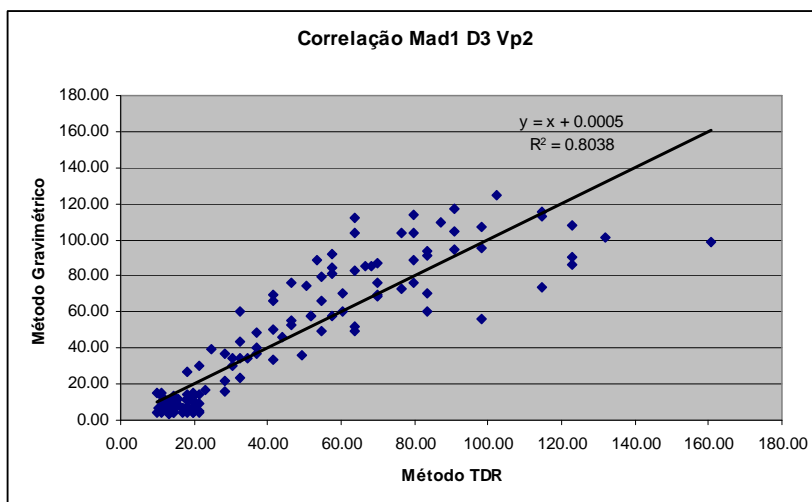
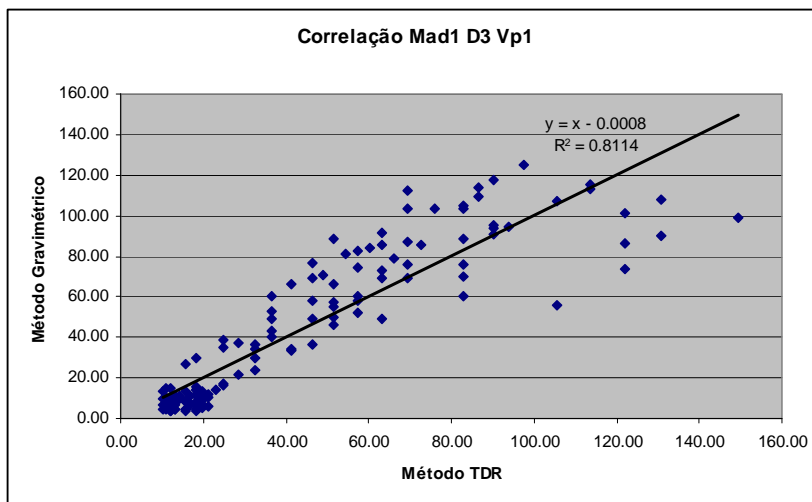
**Figura 55.** Correlação entre metodologias. Os pontos representam as medidas realizadas pelos métodos gravimétrico (padrão ouro ou referência) e TDR. Para **Mad1 D1 Vp1**, tem-se, madeira espécie *Pinus caribaea var. hondurensi*, com as probes distanciadas 10mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,33c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo) e para **Mad1 D1 Vp2**, tem-se, madeira espécie *Pinus caribaea var. hondurensi*, com as probes distanciadas 10mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,66c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



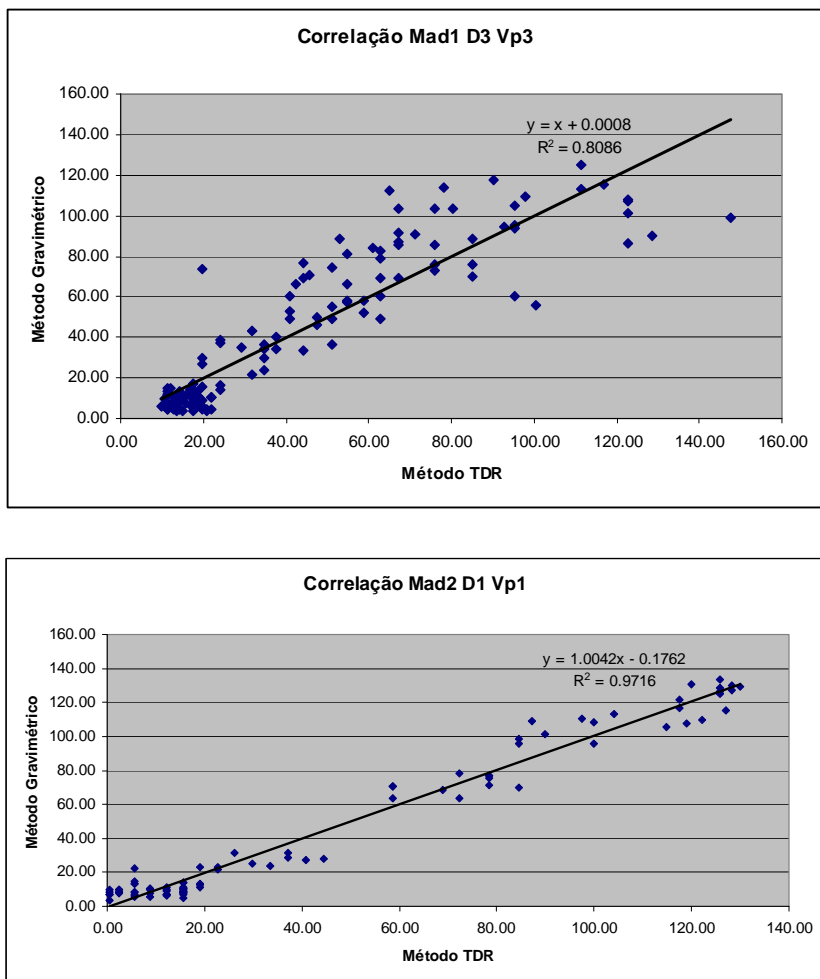
**Figura 56.** Correlação entre metodologias. Os pontos representam as medidas realizadas pelos métodos gravimétrico (padrão ouro ou referência) e TDR. Para **Mad1 D1 Vp3**, tem-se, madeira espécie *Pinus caribaea var. hondurensi*, com as probes distanciadas 10mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,99c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo) e para **Mad1 D2 Vp1**, tem-se, madeira espécie *Pinus caribaea var. hondurensi*, com as probes distanciadas 20mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,33c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



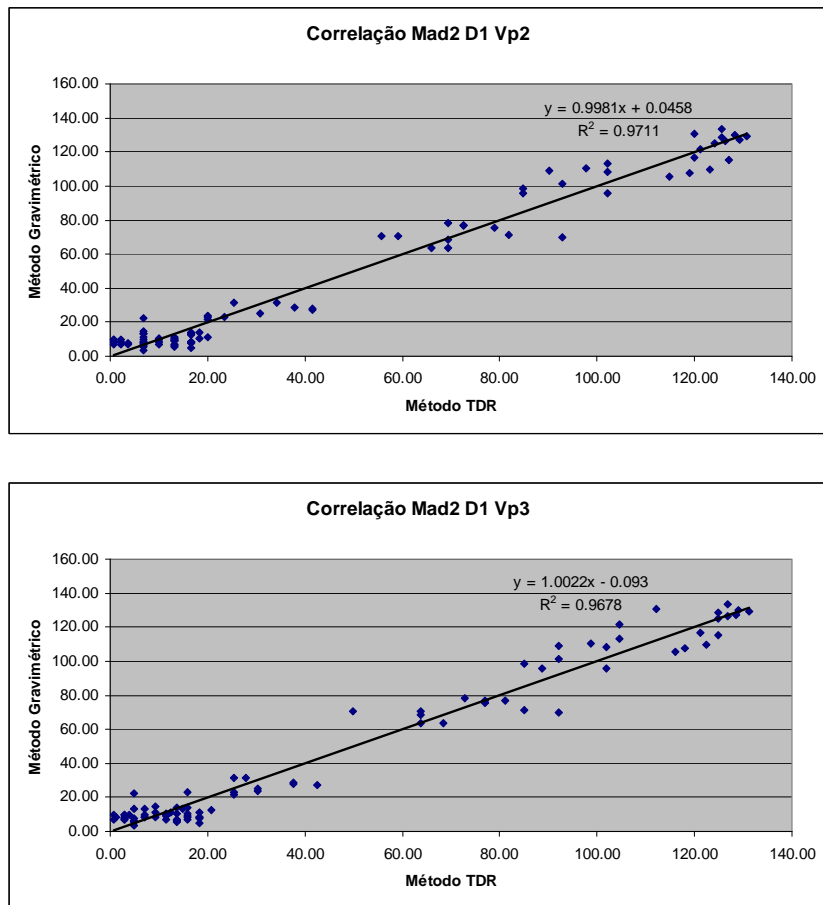
**Figura 57.** Correlação entre metodologias. Os pontos representam as medidas realizadas pelos métodos gravimétrico (padrão ouro ou referência) e TDR. Para **Mad1 D2 Vp2**, tem-se, madeira espécie *Pinus caribaea var. hondurensi*, com as probes distanciadas 20mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,66c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo) e para **Mad1 D2 Vp3**, tem-se, madeira espécie *Pinus caribaea var. hondurensi*, com as probes distanciadas 20mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,99c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



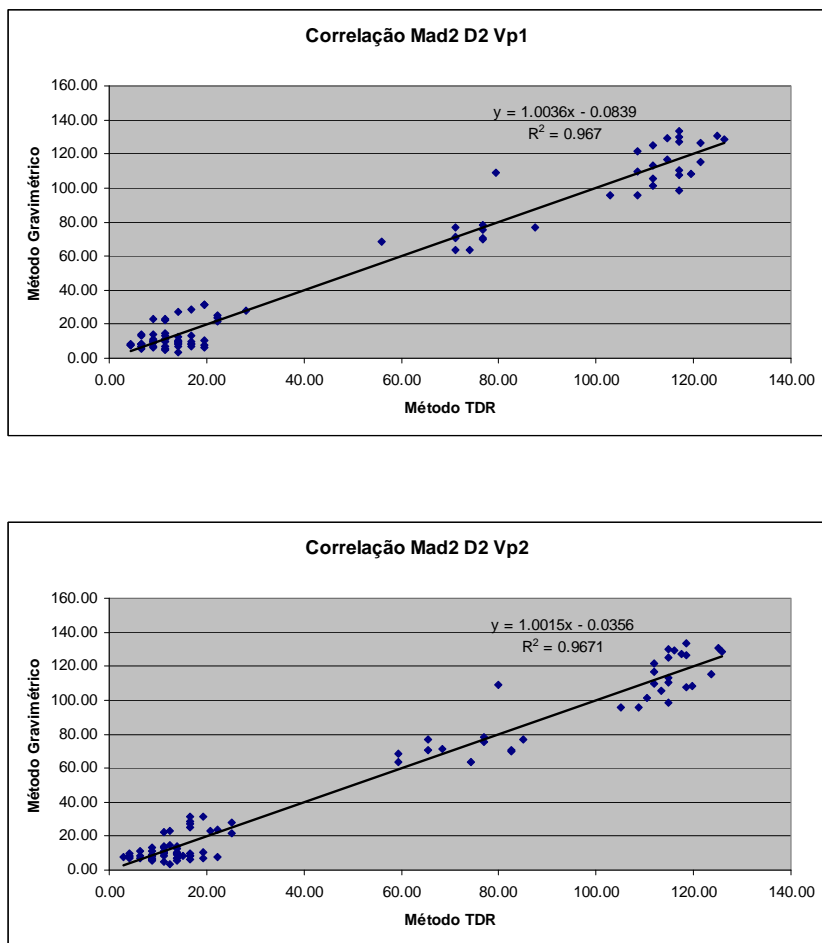
**Figura 58.** Correlação entre metodologias. Os pontos representam as medidas realizadas pelos métodos gravimétrico (padrão ouro ou referência) e TDR. Para **Mad1 D3 Vp1**, tem-se, madeira espécie *Pinus caribaea var. hondurensi*, com as probes distanciadas 30mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,33c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo) e para **Mad1 D3 Vp2**, tem-se, madeira espécie *Pinus caribaea var. hondurensi*, com as probes distanciadas 30mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,66c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



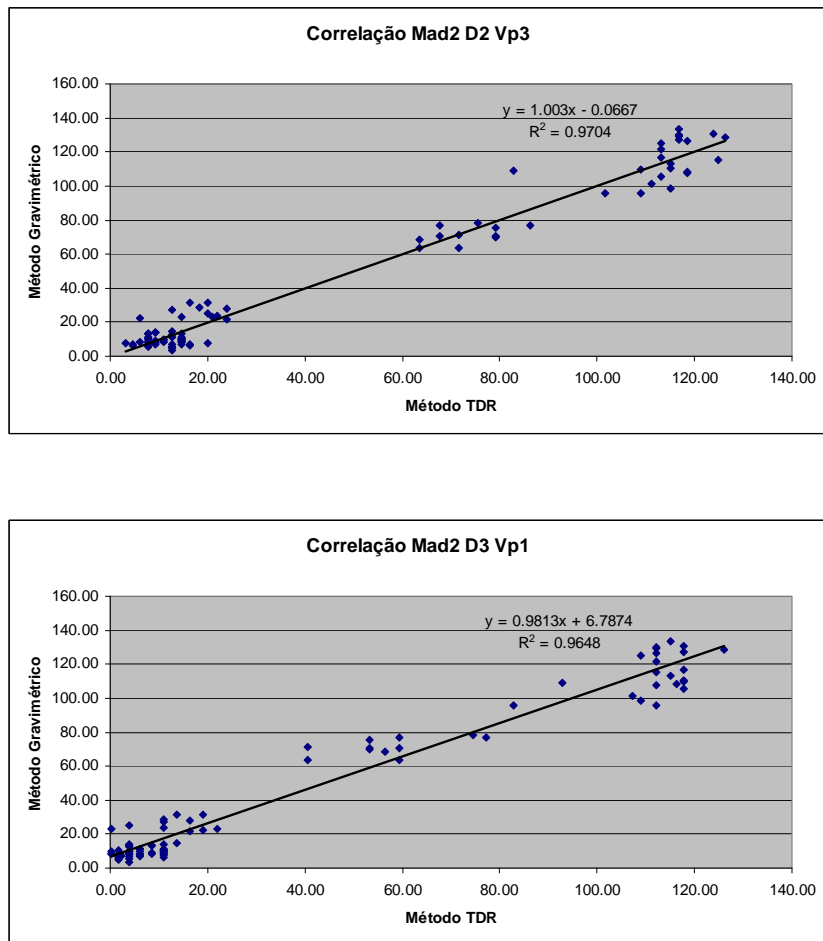
**Figura 59.** Correlação entre metodologias. Os pontos representam as medidas realizadas pelos métodos gravimétrico (padrão ouro ou referência) e TDR. Para **Mad1 D3 Vp3**, tem-se, madeira espécie *Pinus caribaea var. hondurensi*, com as probes distanciadas 30mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,99c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo) e para **Mad2 D1 Vp1**, tem-se, madeira espécie *Grevillea robusta (Cunn.)*, com as probes distanciadas 10mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,33c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



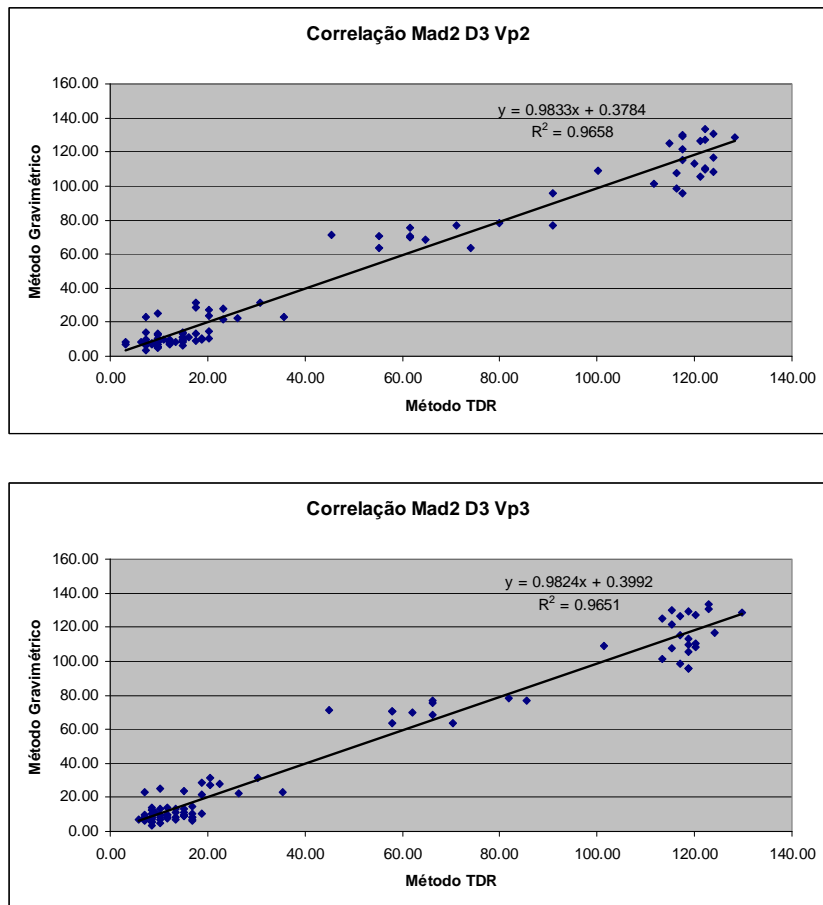
**Figura 60.** Correlação entre metodologias. Os pontos representam as medidas realizadas pelos métodos gravimétrico (padrão ouro ou referência) e TDR. Para **Mad2 D1 Vp2**, tem-se, madeira espécie *Grevillea robusta* (Cunn.), com as probes distanciadas 10mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,66c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo) e para **Mad2 D1 Vp3**, tem-se, madeira espécie *Grevillea robusta* (Cunn.), com as probes distanciadas 10mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,99c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



**Figura 61.** Correlação entre metodologias. Os pontos representam as medidas realizadas pelos métodos gravimétrico (padrão ouro ou referência) e TDR. Para **Mad2 D2 Vp1**, tem-se, madeira espécie *Grevillea robusta* (Cunn.), com as probes distanciadas 20mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,33c. Onde  $c=3.10^8$  m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo) e para **Mad2 D2 Vp2**, tem-se, madeira espécie *Grevillea robusta* (Cunn.), com as probes distanciadas 20mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,66c. Onde  $c=3.10^8$  m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



**Figura 62.** Correlação entre metodologias. Os pontos representam as medidas realizadas pelos métodos gravimétrico (padrão ouro ou referência) e TDR. Para **Mad2 D2 Vp3**, tem-se, madeira espécie *Grevillea robusta* (Cunn.), com as probes distanciadas 20mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,99c. Onde  $c=3.10^8$  m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo) e para **Mad2 D3 Vp1**, tem-se, madeira espécie *Grevillea robusta* (Cunn.), com as probes distanciadas 30mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,33c. Onde  $c=3.10^8$  m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).



**Figura 63.** Correlação entre metodologias. Os pontos representam as medidas realizadas pelos métodos gravimétrico (padrão ouro ou referência) e TDR. Para **Mad2 D3 Vp2**, tem-se, madeira espécie *Grevillea robusta* (Cunn.), com as probes distanciadas 30mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,66c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo) e para **Mad2 D3 Vp3**, tem-se, madeira espécie *Grevillea robusta* (Cunn.), com as probes distanciadas 30mm entre si e velocidade de propagação do pulso eletromagnético de 0,99c. Onde  $c=3.10^8$ m/s (valor aproximado da velocidade de propagação da luz no vácuo).