

SIDNEY PEREIRA

**TECNOLOGIA DA REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO PARA
A MEDIÇÃO DA UMIDADE DO SOLO**

Tese apresentada à **Universidade Federal de Viçosa**, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de “**Magister Scientiae**”.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2001

SIDNEY PEREIRA

**TECNOLOGIA DA REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO PARA
A MEDIÇÃO DA UMIDADE DO SOLO**

Tese apresentada à **Universidade Federal de Viçosa**, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de “**Magister Scientiae**”.

APROVADA: 26 de julho de 2001

Prof. Márcio Mota Ramos
(Conselheiro)

Prof. Fernando Falco Pruski.

Prof. Gutemberg Pereira Dias

Prof. José Emanuel Lopes Gomes

Prof. Delly Oliveira Filho, Ph.D.
(Orientador)

Dedico este trabalho

*A Jesus, o maior exemplo, o maior Irmão, o maior Amigo, o maior Sábio, o maior
conhecedor do Espírito Humano.*

A meus pais, Alair Reis Pereira e Iolanda Regina Pereira.

À Paula, minha esposa e companheira de lutas.

A Leonardo e Jéssica, nossos amados filhos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, a Jesus nosso Irmão, a toda minha família.

Ao Professor Delly, pela orientação, incentivo, dedicação, paciência, pelo cientista que é e por exemplificar tão bem, em suas atitudes corriqueiras, a mensagem cristã. Ao professor Márcio Mota por sua colaboração, nos emprestando um pouco de sua vasta experiência no campo científico, ao professor José Helvecio, por sua colaboração e aos demais professores do Departamento de Engenharia Agrícola que, de uma forma ou de outra, contribuíram para este trabalho.

Aos Professores Fernando F. Pruski, Gutemberg Pereira Dias, José Emanuel L. Gomes que, juntamente com os professores Delly e Márcio Mota, compuseram a banca examinadora deste trabalho.

Aos que participaram deste trabalho: Wathney Hermsdorff, por sua valiosa cooperação na construção do software aqui utilizado e, ainda pelas longas divagações filosóficas nos mais variados assuntos; Roberto A. Cecílio, pela preciosa amizade; Bruno F. Furtado e Cristhian Lao Vorobieff, estagiários da área de Energia na Agricultura, pela colaboração para a realização deste trabalho; Ana Esmeria, Patrícia das G. L. de Queiroz, Cristiano A. Souza e Luís Henrique pelas valiosas contribuições e amizade; aos funcionários Sr. Antonio e Francisco, pela gentileza em auxiliar-nos e pelos esplêndidos cafezinhos.

Aos amigos Carlos A. Teixeira, Isnard Ferraz, Paulo M. B. Monteiro e demais companheiros da área de Energia na Agricultura e de outras áreas.

Aos técnicos e funcionários Lucimar, Fernanda, Edna, Marcos, Galinari, Joel e tantos outros do Departamento de Engenharia Agrícola.

Aos amigos Espirituais, sempre nos incentivando positivamente e fazendo-nos lembrar que a verdadeira ciência é a do Amor.

A tantos outros que não foram nomeados em razão do risco de se cometer alguma injustiça, desde o pessoal da limpeza ao pessoal da banca de defesa e a todos que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho, o nosso *Muito Obrigado* e votos de muita Paz.

BIOGRAFIA

Sidney Pereira, filho de Alaor Reis Pereira e Iolanda Regina Pereira, nasceu em Ipatinga, MG, em 14 de setembro de 1972. Casado com Paula Margarita A. C. Bustamante, pai de Leonardo Enrique C. Pereira e Jéssica Regina C. Pereira.

Em dezembro de 1992, concluiu o Curso Técnico em Eletrônica Industrial, pelo Colégio Técnico de Coronel Fabriciano (atualmente Colégio Padre de Man), em Coronel Fabriciano, MG. Em agosto de 1999, concluiu o Curso de Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa – MG, tendo sido bolsista da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig).

Em agosto de 1999, iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, na área de Energia na Agricultura, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG, submetendo-se à defesa de tese em julho de 2001.

Em agosto de 2001, iniciou o Curso de Doutorado em Engenharia Elétrica, na área de Eletrificação Rural e Fontes Alternativas de Energia, na Universidade Federal de Uberlândia, em Uberlândia, MG.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE QUADROS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xiv
RESUMO.....	xix
ABSTRACT.....	xxi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Métodos diretos de medição de umidade do solo	2
1.1.1 Método padrão da estufa	2
1.1.2 Método das pesagens.....	3
1.2. Métodos indiretos de medição de umidade do solo	4
1.2.1. Tensiometria	4
1.2.2. Métodos eletrométricos	5
1.2.3. Dispersão de nêutrons.....	6
1.2.4. Reflectometria no domínio do tempo (TDR)	7
2. OBJETIVOS	8
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	9
3.1 Uso da tecnologia TDR para medição de umidade do solo	10
3.2. Uso da tecnologia TDR por meio de testadores de cabos metálicos	16
3.2.1. Princípio de funcionamento do testador de cabos metálicos.....	18
3.2.2. Uso do testador de cabos metálicos para medição de umidade do solo	20

3.3. Calibração do TDR para medição de umidade do solo.....	20
4. MATERIAL E MÉTODOS	25
4.1. O equipamento TDR para medição da umidade do solo	25
4.1.1. Osciloscópio	25
4.1.2. Gerador de pulsos	28
4.1.3. Cabo coaxial	28
4.1.4. Cabo de antena para TV	28
4.1.5. O casador de impedâncias	29
4.1.6. Conectores e sondas	30
4.2. Solos ensaiados	32
4.2.1. Características físicas dos solos.....	32
4.2.2. Homogeneização da umidade dos solos	33
4.2.3. Determinação da umidade volumétrica do solo	34
4.3. Sistema de aquisição de dados com equipamento TDR	38
4.4. Aquisição de dados com o TDR comercial.....	40
4.5. Tratamento estatístico	41
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
5.1. Impedância das sondas	43
5.2. Homogeneidade da umidade dos solos	44
5.3. Tempo de reflexão.....	50
5.4. Relação entre constante dielétrica e umidade volumétrica do solo	58
5.4.1. Análise estatística	65
5.5. Comparação entre sistema TDR desenvolvido e TDR comercial.....	69
6. CONCLUSÕES	79
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	81
8. BIBLIOGRAFIA	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1.	Esquema de sondas de hastes paralelas usadas na reflectometria no domínio do tempo e circuito elétrico equivalente, em que L é a indutância, R a resistência, G a condutância shunt e C a capacitância ao longo do elemento diferencial dz.....	14
Figura 3.2.	Elementos que compõem um testador de cabos metálicos.....	16
Figura 3.3.	Sinal gerado pelo testador de cabo Tektronicx 1502B ou C.....	17
Figura 3.4.	Curva da calibração empírica obtida por TOPP et al (1980) considerando onze diferentes tipos de solos, para um modelo polinomial cúbico.....	23
Figura 4.1.	Sistema para medição da umidade do solo utilizando o princípio da reflectometria no domínio do tempo.....	26
Figura 4.2.	Imagem do osciloscópio para sinal de onda quadrada fornecida pelo gerador de pulsos com frequência de 2 MHz, tensão pico a pico de 5,844 V, com ajustes de escala 1,0 V/cm para vertical e 200 ns/cm para horizontal.....	27
Figura 4.3.	Representação esquemática de um sinal alternado lançado ao longo de uma linha coaxial e conversão para sinal alternado balanceado por meio do casador de impedâncias.....	30
Figura 4.4.	Tempo de trânsito para reflexão no solo Latossolo Vermelho, comprimento de sonda de 0,15 m, diâmetro de 6,5 mm e umidade média θ de $0,078 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	39
Figura 5.1.	Constante dielétrica obtida com sondas de diâmetros de hastes de 3,2 mm nos recipientes contendo solo Areia Quartzosa.....	56

Figura 5.2.	Constante dielétrica obtida com sondas de diâmetros de hastes de 6,5 mm nos recipientes contendo solo Areia Quartzosa.....	56
Figura 5.3.	Constante dielétrica obtida com sondas de diâmetros de hastes de 3,2 mm nos recipientes contendo solo Latossolo Vermelho.....	57
Figura 5.4.	Constante dielétrica obtida com sondas de diâmetros de hastes de 6,5 mm nos recipientes contendo solo Latossolo Vermelho.....	57
Figura 5.5.	Umidade volumétrica em função da constante dielétrica do solo Areia Quartzosa para sondas de 0,10 (a) e 0,15 m (b) de comprimento com diâmetros de hastes de 3,2 mm.....	59
Figura 5.6.	Umidade volumétrica em função da constante dielétrica do solo Areia Quartzosa para sondas de 0,20 (a) e 0,25 m (b) de comprimento com diâmetros de hastes de 3,2 mm.....	59
Figura 5.7.	Umidade volumétrica em função da constante dielétrica do solo Areia Quartzosa para sondas de 0,30 (a) e 0,35 m (b) de comprimento com diâmetros de hastes de 3,2 mm.....	60
Figura 5.8.	Umidade volumétrica em função da constante dielétrica do solo Areia Quartzosa para sondas de 0,10 (a) e 0,15 m (b) de comprimento com diâmetros de hastes de 6,5 mm.....	60
Figura 5.9.	Umidade volumétrica em função da constante dielétrica do solo Areia Quartzosa para sondas de 0,20 (a) e 0,25 m (b) de comprimento com diâmetros de hastes de 6,5 mm.....	61
Figura 5.10.	Umidade volumétrica em função da constante dielétrica do solo Areia Quartzosa para sondas de 0,30 (a) e 0,35 m (b) de comprimento com diâmetros de hastes de 6,5 mm.....	61
Figura 5.11.	Umidade volumétrica em função da constante dielétrica do solo Latossolo Vermelho para sondas de 0,10 (a) e 0,15 m (b) de comprimento com diâmetros de hastes de 3,2 mm.....	62
Figura 5.12.	Umidade volumétrica em função da constante dielétrica do solo Latossolo Vermelho para sondas de 0,20 (a) e 0,25 m (b) de comprimento com diâmetros de hastes de 3,2 mm.....	62
Figura 5.13.	Umidade volumétrica em função da constante dielétrica do solo Latossolo Vermelho para sondas de 0,30 (a) e 0,35 m (b) de comprimento com diâmetros de hastes de 3,2 mm.....	63

Figura 5.14.	Umidade volumétrica em função da constante dielétrica do solo Latossolo Vermelho para sondas de 0,10 (a) e 0,15 m (b) de comprimento com diâmetros de hastes de 6,5 mm.....	63
Figura 5.15.	Umidade volumétrica em função da constante dielétrica do solo Latossolo Vermelho para sondas de 0,20 (a) e 0,25 m (b) de comprimento com diâmetros de hastes de 6,5 mm.....	64
Figura 5.16.	Umidade volumétrica em função da constante dielétrica do solo Latossolo Vermelho para sondas de 0,30 (a) e 0,35 m (b) de comprimento com diâmetros de hastes de 6,5 mm.....	64
Figura 5.17.	Constante dielétrica obtida com o TDR comercial e estimada com o sistema TDR desenvolvido, com sondas de 0,15 e 0,30 m e diâmetro de hastes de 6,5 mm, do solo Areia Quartzosa.....	72
Figura 5.18.	Constante dielétrica obtida com o TDR comercial e o sistema TDR desenvolvido, com sondas de 0,15 e 0,30 m e diâmetro de hastes de 6,5 mm, do solo Latossolo Vermelho.....	72
Figura 5.19.	Umidade volumétrica (U_v), $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, estimada pelo sistema TDR desenvolvido, pelo TDR comercial e determinada em função da densidade úmida e da umidade gravimétrica média, para sonda de 0,15 m com diâmetro de hastes de 6,5 mm, do solo Areia Quartzosa.....	73
Figura 5.20.	Umidade volumétrica (U_v), $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, estimada pelo sistema TDR desenvolvido, pelo TDR comercial e determinada em função da densidade úmida e da umidade gravimétrica média, para sonda de 0,30 m com diâmetro de hastes de 6,5 mm, do solo Areia Quartzosa.....	74
Figura 5.21.	Umidade volumétrica (U_v), $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, estimada pelo sistema TDR desenvolvido, pelo TDR comercial e determinada em função da densidade úmida e da umidade gravimétrica média, para sonda de 0,15 m com diâmetro de hastes de 6,5 mm, solo Latossolo Vermelho.....	75
Figura 5.22.	Umidade volumétrica (U_v), $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, estimada pelo sistema TDR desenvolvido, pelo TDR comercial e determinada em função da densidade úmida e da umidade gravimétrica média, para sonda de 0,30 m com diâmetro de hastes de 6,5 mm, solo Latossolo Vermelho.....	76

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1.	Constante dielétrica para alguns materiais à temperatura ambiente	13
Quadro 4.1.	Análise granulométrica e classe textural para dois solos: Areia Quartzosa e Latossolo Vermelho.....	32
Quadro 4.2.	Umidades retidas a diferentes tensões para os dois solos estudados.....	33
Quadro 5.1.	Impedâncias correspondentes para diâmetros de hastes de 3,2 (d_1) e 6,5 mm (d_2), em função do comprimento da sonda e da constante dielétrica do solo, para uma separação entre as hastes de 0,05 m.....	44
Quadro 5.2.	Umidade gravimétrica ($g.g^{-1}$) dentro dos recipientes utilizados para o solo Areia Quartzosa.....	45
Quadro 5.3.	Umidade gravimétrica ($g.g^{-1}$) dentro dos recipientes utilizados para o solo Latossolo Vermelho.....	46
Quadro 5.4.	Umidade em volume ($cm^3.cm^{-3}$) dentro dos recipientes, para o solo Areia Quartzosa e respectiva densidade úmida.....	48
Quadro 5.5.	Umidade em volume ($cm^3.cm^{-3}$) dentro dos recipientes, para o solo Latossolo Vermelho e respectiva densidade úmida.....	49
Quadro 5.6.	Máximo tempo de reflexão do pulso eletromagnético teórico e real para sondas com diâmetro d_1 de 3,2 mm e d_2 de 6,5 mm.....	50

Quadro 5.7.	Limites para o início (T_A) e o término (T_B) da reflexão do pulso eletromagnético para os solos Areia Quartzosa e Latossolo Vermelho, para sondas com diâmetro de hastes de 3,2 mm.....	51
Quadro 5.8.	Limites para o início (T_A) e o término (T_B) da reflexão do pulso eletromagnético para os solos Areia Quartzosa e Latossolo Vermelho, para sondas com diâmetro de hastes de 6,5 mm.....	51
Quadro 5.9.	Constantes dielétricas obtidas com sondas de 3,2 mm de diâmetro, nos comprimentos 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30 e 0,35 m, no solo Areia Quartzosa.....	52
Quadro 5.10.	Constantes dielétricas obtidas com sondas de 6,5 mm de diâmetro, nos comprimentos 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30 e 0,35 m, no solo Areia Quartzosa.....	53
Quadro 5.11.	Constantes dielétricas obtidas com sondas de 3,2 mm de diâmetro, nos comprimentos 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30 e 0,35 m, no solo Latossolo Vermelho.....	54
Quadro 5.12.	Constantes dielétricas obtidas com sondas de 6,5 mm de diâmetro, nos comprimentos 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30 e 0,35 m, no solo Latossolo Vermelho.....	55
Quadro 5.13.	Resumo das análises de variância das regressões entre a constante dielétrica e a umidade volumétrica para o solo Areia Quartzosa, sondas com diâmetros de hastes de 3,2 mm.....	65
Quadro 5.14.	Resumo das análises de variância das regressões entre a constante dielétrica e a umidade volumétrica para o solo Areia Quartzosa, sondas com diâmetros de hastes de 6,5 mm.....	66
Quadro 5.15.	Resumo das análises de variância das regressões entre a constante dielétrica e a umidade volumétrica para o solo Latossolo Vermelho, sondas com diâmetros de hastes de 3,2 mm.....	66
Quadro 5.16.	Resumo das análises de variância das regressões entre a constante dielétrica e a umidade volumétrica para o solo Latossolo Vermelho, sondas com diâmetros de hastes de 6,5 mm.....	67
Quadro 5.17.	Umidades gravimétrica e volumétrica do solo Areia Quartzosa, determinadas com sondas de 0,15 e 0,30 m, com diâmetros de hastes de 6,5 mm e densidade úmida do solo nas colunas.....	69

Quadro 5.18	Umidades gravimétrica e volumétrica do solo Latossolo Vermelho, determinadas com sondas de 0,15 e 0,30 m, com diâmetros de hastes de 6,5 mm e densidade úmida do solo nas colunas.....	70
Quadro 5.19.	Constante dielétrica obtida com o TDR comercial e estimada com o sistema TDR desenvolvido, com sondas de 0,15 e 0,30 m e diâmetro de hastes de 6,5 mm, do solo Areia Quartzosa.....	71
Quadro 5.20.	Constante dielétrica obtida com o TDR comercial e estimada com o sistema TDR desenvolvido, com sondas de 0,15 e 0,30 m e diâmetro de hastes de 6,5 mm, do solo Latossolo Vermelho.....	71
Quadro 5.21.	Erro médio relativo entre a umidade medida para o equipamento TDR comercial e o desenvolvido em relação à umidade volumétrica real determinada gravimetricamente.....	77

LISTA DE SÍMBOLOS

M_1	massa do recipiente mais solo, g;
M_2	massa do recipiente mais solo seco em estufa, g;
U_p, U_g	umidade em peso de uma amostra de solo, $g \cdot g^{-1}$;
M_3	massa do recipiente utilizado para coletar a amostra de solo, g;
M	peso-padrão do solo para determinação pelo método das pesagens, g;
d_s	densidade real do solo, decimal;
M'	massa da amostra de solo mais água em um balão de 500 ml (método das pesagens), g;
U	peso da umidade do solo (método das pesagens), decimal;
U_s	umidade do solo na base seca, decimal;
R	resistência elétrica, Ω ;
V	diferença de potencial elétrico, V;
I	corrente elétrica, A;
Q	carga elétrica, C;
C_0	capacitância de um capacitor ideal (vácuo), F;
A	área das placas de um capacitor, m^2 ;
s	distância entre as placas de um capacitor, m;

ϵ_0	permissividade do vácuo, F/m.;
C	capacitância, F;
ϵ	permissividade de um material, F/m;
K	permissividade relativa do dielétrico, ou constante dielétrica relativa ϵ/ϵ_0 ;
ka	constante dielétrica (aparente), decimal;
c	velocidade da luz no vácuo;
v	velocidade de propagação de um pulso eletromagnético ao longo das hastes utilizadas pela tecnologia TDR, m/s;
t	tempo de trânsito de um pulso eletromagnético ao longo das hastes utilizadas pela tecnologia “TDR”, s;
l, L	comprimento das hastes utilizadas pela tecnologia “TDR”, m ;
σ	condutividade elétrica do solo, S/m;
L	indutância das hastes (eletrodo), H;
G	condutância entre as hastes utilizadas pela tecnologia “TDR”, S;
dz	elemento diferencial ao longo das hastes utilizadas pela tecnologia “TDR”;
V_T	tensão do pulso de entrada aplicado nas hastes, V;
V_R	tensão do pulso refletido pelas hastes, V;
k'	parte real da constante dielétrica (capacitiva), decimal;
k''	parte imaginária da constante dielétrica;
θ	umidade volumétrica, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$;
z_1	impedância do cabo onde propaga-se a onda refletida, Ω ;
z_2	impedância após a falha (ou rompimento) do cabo, Ω .;
$a, b, c \text{ e } d$	parâmetros estimados de uma equação polinomial;
k_s	constante dielétrica dos sólidos do solo, decimal;

k_{ar}	constante dielétrica do ar, decimal;
k_w, k_{ag}	constante dielétrica da água;
n	porosidade total do solo, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$;
β	parâmetro relacionado com a geometria do meio porosol;
α	modelo de calibração empírica proposta por Birchak et al.;
z	impedância da sonda (hastes) utilizada na tecnologia “TDR”, Ω ;
s	espaçamento entre as sondas utilizadas na tecnologia “TDR”, m;
d	diâmetro das sondas utilizadas na tecnologia “TDR”, m;
CA	fonte de tensão alternada. V;
d_1	diâmetro de 3,2 mm das hastes utilizadas;
d_2	diâmetro de 6,5 mm das hastes utilizadas;
AQ	solo Areia Quartzosa;
LV	solo Latossolo Vermelho;
ρ_u	densidade úmida do solo, decimal;
m_T	massa do recipiente mais solo, g;
v_T	volume total do recipiente contendo a amostra de solo, cm^3 ;
m_s	massa de solo, g;
m_{ag}	massa de água, g;
m_{ar}	massa de ar, g;
γ_{ag}	massa específica da água, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$;
A	ponto que indica, no gráfico, o início da reflexão em uma sonda “TDR”;
B	ponto que indica, no gráfico, o fim da reflexão em uma sonda “TDR”;
T_A	início do tempo de reflexão em uma sonda “TDR”, s;
T_B	fim do tempo de reflexão em uma sonda “TDR”, s;

$\Delta T_{\text{água}}$	tempo de reflexão para sonda imersa na água s;
ΔT_{ar}	tempo de reflexão para sonda ao ar, s;
ΔT_{max}	máximo tempo de reflexão que pode ocorrer para uma determinada sonda, s;
$T_{\text{Bágua}}$	ponto que indica, no gráfico, o fim da reflexão quando uma sonda “TDR” qualquer está imersa em água, s;
e_{rm}	erro médio relativo entre a umidade real do solo e a estimada, %;
θ_i	umidade real do solo no recipiente i , $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$;
θe_i	umidade estimada do solo no recipiente i , $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$;
$z(d_1)$	impedância das hastes de diâmetro de 3,2 mm, Ω ;
$z(d_2)$	impedância das hastes de diâmetro de 6,5 mm, Ω ;
ka_{10}	constante dielétrica obtida com uma sonda de 0,10 m;
ka_{15}	constante dielétrica obtida com uma sonda de 0,15 m;
ka_{20}	constante dielétrica obtida com uma sonda de 0,20 m;
ka_{25}	constante dielétrica obtida com uma sonda de 0,25 m;
ka_{30}	constante dielétrica obtida com uma sonda de 0,30 m;
ka_{35}	constante dielétrica obtida com uma sonda de 0,35 m;
Td_{1AQ}	indica o resumo da análise de variância das regressões com o conjunto de dados obtidos de diferentes sondas com diâmetro d_1 para o solo Areia Quartzosa;
Td_{2AQ}	indica o resumo da análise de variância das regressões com o conjunto de dados obtidos de diferentes sondas com diâmetro d_2 para o solo Areia Quartzosa;
Td_{1LV}	indica o resumo da análise de variância das regressões com o conjunto de dados obtidos de diferentes sondas com diâmetro d_1 para o solo Latossolo Vermelho;
Td_{2LV}	indica o resumo da análise de variância das regressões com o conjunto de dados obtidos de diferentes sondas com diâmetro d_2 para o solo Latossolo Vermelho;

R^2_{aj} coeficiente de determinação ajustado, decimal;

θ_R, U_v real umidade volumétrica real, decimal; e

U_v umidade em volume estimada, decimal.

RESUMO

PEREIRA, Sidney, M. S., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2001. **Tecnologia da reflectometria no domínio do tempo para a medição da umidade do Solo**. Orientador: Delly Oliveira Filho. Conselheiros: Márcio Mota Ramos e José Helvecio Martins.

A tecnologia reflectometria no domínio do tempo (*Time Domain Reflectometry* – TDR), utilizada para medição de umidade do solo, consiste em determinar o valor da constante dielétrica do mesmo. Este valor é baseado no tempo de emissão/reflexão (tempo de trânsito) de um pulso eletromagnético, emitido por um gerador de pulsos, em hastes metálicas paralelas que servem como “guias de ondas”. O valor da constante dielétrica aparente será a do material entre as hastes metálicas, ou seja, a da matriz do solo. Como o solo é um sistema trifásico, tem-se que a constante dielétrica k para o ar é a unidade, para os componentes sólidos entre 2 e 4 e, para a água k é igual a 80. A constante dielétrica aparente é obtida pela relação: $k_a = ((c t)/(2 L))^2$, em que c é a velocidade da luz no vácuo, t o tempo de trânsito e L o comprimento das hastes metálicas. Este estudo teve como objetivo determinar a correlação existente entre a constante dielétrica aparente e o conteúdo de água para um solo de textura argilosa e outro de textura arenosa, por meio de ajuste de modelo do tipo polinômio cúbico e comparar os resultados, obtidos por meio dessas equações, com um equipamento TDR comercial. Foi proposto um sistema TDR para medição da umidade do solo composto por: osciloscópio; gerador

de pulsos eletromagnéticos; cabo coaxial de 50 Ω ; cabo de antena de TV; casador de impedâncias; sondas (hastes metálicas paralelas) com comprimentos de 0,10, 0,15, 0,20, 0,25, 0,30 e 0,35 m, com dois diâmetros de hastes ($d_1 = 3,2$ mm e $d_2 = 6,5$ mm). Para o solo arenoso, o melhor ajuste ocorreu para a sonda de 0,30 m de comprimento, com diâmetro de hastes de 3,2 mm, obtendo um coeficiente de determinação ajustado R^2 de 0,954. Para o solo argiloso, o melhor ajuste ocorreu para a sonda de 0,30 m de comprimento, com diâmetro de hastes de 3,2 mm, obtendo-se um coeficiente de determinação ajustado R^2 de 0,923. Quando comparado com um equipamento TDR comercial, o sistema TDR proposto para a determinação da umidade do solo, no intervalo de umidade compreendido entre a capacidade de campo e o ponto de murcha, proporcionou melhores coeficientes de determinação para a sonda de 0,30 m, nos dois solos e comprimentos de sondas estudados. O sistema TDR proposto estimou a umidade do solo argiloso com erro médio relativo de 6,6%, para sonda de 0,30 m, enquanto que o sistema TDR comercial apresentou um erro médio relativo de 58,3%, para as mesmas condições, em que umidade real foi determinada em estufa.

ABSTRACT

PEREIRA, Sidney, M. S., Universidade Federal de Viçosa, July 2001. **Tecnology of the time domain reflectometry for measuring the soil humidity**. Adviser: Delly Oliveira Filho. Committee members: Márcio Mota Ramos and José Helvecio Martins.

The technology of the time domain reflectometry, TDR, used for measuring soil humidity, consists of determining the dielectric constant value of the soil. This value is based on the emission/reflection time (transit time) of an electromagnetic pulse emitted by a pulse generator, in paralleled metallic guides operating as " wave guides ". The value of the apparent dielectric constant will be that of the material between the metallic guides, that is, the one of the soil matrix. Since the soil is a system with three phases, the dielectric air constant, k , is said to be the unity for the solid components between 2 and 4, while for water k equals to 80. The apparent dielectric constant is obtained by the relationship: $k_a = ((c t)/(2 L))^2$, where c is the light speed on vacuum, t the transit time, and L the length of the metallic guides. This study aimed at the determination of the correlation between the apparent dielectric constant and water content for a clayish-textured soil and a sandy-textured soil as well, by adjusting the model of the cubic polynomial type, as well as to compare the results obtained by these equations with a commercial TDR equipment. To measure the soil humidity a TDR system was proposed, which consists of: oscilloscope; electromagnetic pulse generator; coaxial cable of 50 Ω ; TV antenna

cable; impedance matching; probes (paralleled metallic guides) with 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 and 0.35 m lengths and two-diameter guides ($d_1 = 3.2$ mm and $d_2 = 6.5$ mm). For the sandy soil, the best adjustment was obtained with a 30 cm-long probe with 32 mm-diameter guides, then obtaining an adjusted R^2 determination coefficient of 0.954. For the clayish soil, the best adjustment was obtained with a 30 cm-long probe with a 3.2 mm-diameter guides, so obtaining an adjusted R^2 determination coefficient of 0.923. The TDR system proposed for determination of the soil humidity, within the humidity range between the field capacity and the wilting murcha point, provided the best determination coefficients for the 0.30 m probe in both soils and the studied probe lengths, compared with a commercial TDR equipment. The proposed TDR system estimated the clayish-soil humidity with relative error average of 6.6%, for the 0.30 m probe , while the commercial TDR system presented a relative error average of 58.3% for the same conditions under which the real humidity was oven-determined.

1. INTRODUÇÃO

Com a crise atual, o uso dos recursos energia elétrica e água para irrigação torna-se cada vez mais restrito e de alto custo, tornando-se prioritário otimizar a utilização destes recursos, tanto no contexto estratégico de reservas energéticas quanto sob o ponto de vista ecológico. Para tanto, técnicas devem ser desenvolvidas e aplicadas no campo, para que os processos agrícolas tornem-se eficientes e os produtores competitivos.

Neste contexto, a determinação da umidade em solos destinados à produção agrícola é de vital importância para o manejo adequado da água e, conseqüentemente, da energia necessária para a pressurização dos sistemas de irrigação. Por sua vez, o manejo eficiente de sistemas de irrigação favorece o desenvolvimento adequado das plantas e contribui para o aumento da produção e a preservação do meio ambiente. No Brasil, mesmo os usuários de grandes áreas irrigadas, em sua maioria, não fazem o manejo adequado da água de irrigação, e o monitoramento automático é feito quase que, exclusivamente, no âmbito dos centros de pesquisa.

Podem-se classificar os métodos de determinação de umidade do solo em diretos e indiretos. Enquanto nos métodos diretos é necessário promover a retirada da água do solo, nos indiretos determinam-se as propriedades físicas que são dependentes da quantidade de água contida no solo.

1.1 Métodos diretos de medição de umidade do solo

Os métodos diretos mais utilizados para a determinação da umidade do solo são: padrão (estufa) e o das pesagens. Consistem na determinação direta da massa de água, em peso, contida em uma amostra de solo, relacionando-a com a massa de solo seco.

1.1.1 Método padrão da estufa

A determinação da umidade do solo, utilizando o método padrão da estufa, consiste em retirar amostras do solo à profundidade desejada, acondicionando-as em recipientes hermeticamente fechados, e identificando-os. Em seguida, as amostras de solo e o recipiente são levados para o laboratório, onde serão pesados, obtendo-se o peso M_1 . O recipiente é aberto e colocado, junto com a amostra, em estufa a 105 - 110 °C por, no mínimo, 24 horas. Após a secagem, retira-se o recipiente, pesa-se o conjunto novamente e obtém-se o peso M_2 . A diferença de valor entre as pesagens corresponde à massa de água contida na amostra. A umidade em peso, na base seca, é a razão entre a massa de água e a massa de solo seco, conforme a equação

$$Up = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} \quad (1.1)$$

em que M_3 é a massa do recipiente que contém a amostra quando vazio (BERNARDO, 1996).

Este método de determinação de umidade é preciso e considerado padrão para determinação de umidade do solo. Possui um custo relativamente alto, uma vez que necessita de uma estufa com controle de temperatura de $\pm 5^\circ\text{C}$ e balança de precisão.

1.1.2 Método das pesagens

É um método de precisão relativamente alta, quando comparado com o padrão. Sua principal vantagem consiste em permitir determinações rápidas da umidade do solo.

Consiste em determinar o peso-padrão (M) do solo e a densidade real do solo (d_s) que se deseja amostrar. Para obter o peso padrão, seca-se o solo em estufa a 105 – 110 °C por 24 horas, retirando-se uma amostra de 100 gramas. Em seguida, coloca-se essa amostra em um balão de 500 ml de capacidade, completa-se o volume restante do balão com água e pesa-se o conjunto, determinando-se o peso-padrão. Para obter o valor da umidade de qualquer gleba da qual foi retirada a amostra padrão, basta retirar uma amostra e pesar 100 g da mesma, colocá-la no balão de 500 mL e completar o volume restante com água, bem como pesar o conjunto e determinar o peso (M'). Por meio da equação 1.2, calcula-se o peso da umidade (U).

$$U = (M - M') \frac{d_s}{d_s - 1} \quad (1.2)$$

Para converter o valor obtido da equação 1.2 em umidade U_s na base seca, utiliza-se a equação

$$U_s = \frac{U}{1 - U} \quad (1.3)$$

Este método demanda menor uso de equipamentos que o da estufa, uma vez que a estufa é utilizada apenas em uma única determinação. Sua maior desvantagem consiste no fato de uma grande área possuir faixas heterogêneas de solo, ou características diferentes, o que pode resultar em um grande número de áreas com diferentes tipos de solos para o controle da umidade, o que requererá o

estabelecimento de diferentes determinações de densidade das partículas e do peso padrão (BERNARDO, 1996).

1.2. Métodos indiretos de medição de umidade do solo

Os métodos indiretos de determinação da umidade do solo baseiam-se em propriedades químicas ou físicas, que são função do conteúdo de água do solo. Exigem uma calibração com o método padrão da estufa. Entre os métodos indiretos, podem-se citar: tensiometria, eletrometria, dispersão de nêutrons e reflectometria no domínio do tempo (TDR), dentre outros.

1.2.1. Tensiometria

A tensiometria é um método indireto para a determinação da umidade e direto para medição da tensão de água retida no solo.

O tensiômetro consiste de uma cápsula porosa, geralmente cerâmica, ligada por meio de um tubo a um manômetro. A tensão máxima obtida, teoricamente, é 101,3 kPa, na prática, porém, só é possível medir tensões até 80 kPa. Acima deste valor, o ar penetra pelos poros da cápsula e as medições perdem a precisão.

Seu uso é muito difundido, pois, é de fácil operação. A faixa de tensão de até 70 kPa corresponde à faixa de umidade de interesse agrônômico para um grande número de culturas (MAROUELLI et al., 1996) . Em outras palavras, grande parte da água disponível nos solos cultivados está retida abaixo deste limite de tensão. Em solos arenosos, os tensiômetros medem o correspondente a cerca de 70 % da água disponível às plantas, e em solos argilosos cerca de 40 %.

Outra vantagem do uso do tensiômetro é seu baixo custo de aquisição, enquanto sua principal desvantagem consiste na necessidade de se conhecer a curva característica de retenção de água no solo.

1.2.2. Métodos eletrométricos

Os métodos eletrométricos para a medição da umidade do solo baseiam-se na variabilidade das características físicas do solo (como a resistência elétrica) em função do conteúdo de água. Dentre os métodos eletrométricos, destacam-se os de Bouyoucos e o de Colman.

O método de Bouyoucos é baseado na variação da resistência elétrica entre dois eletrodos inseridos em um bloco poroso, em geral de gesso, que possui uma resistência variando em função da umidade absorvida do meio onde se encontra. A resistência elétrica é medida indiretamente, por meio de medidor de corrente, aplicando-se a lei de Ohm

$$R = \frac{V}{I} \quad (1.4)$$

em que

- R = resistência elétrica, Ω ;
- V = diferença de potencial, V; e
- I = corrente, A.

Como a diferença de potencial é conhecida e a corrente é medida, é possível calcular a resistência elétrica. Para um solo saturado, a resistência medida com o ohmímetro é próxima a 450 Ω , para a capacidade de campo em torno de 640 Ω e para o ponto de murcha em torno de 25.000 Ω (KLAR, 1991). O medidor Bouyoucos é calibrado para leituras diretas da percentagem de água disponível no solo, indicando se o solo está próximo ao ponto de murcha ou à capacidade de campo. Sua desvantagem concentra-se no fato de ser, em geral, calibrado para uso em qualquer solo, o que faz com que não apresente uma boa precisão, além de problemas tais como deterioração do bloco e ocorrência de histerese.

O método de Colman é baseado no mesmo princípio elétrico do método anterior, diferindo-se por possuir uma placa porosa de fibra de vidro envolvida por

duas finas placas de metal perfurado. Possibilita a correção da resistência elétrica, em função da temperatura e deve ser calibrado para cada tipo de solo. A calibração pode ser baseada no conteúdo de água ou na tensão de água do solo, sendo preferível calibrá-lo em função da tensão de água. Este método é mais preciso, em comparação com o de Bouyoucos (BERNARDO, 1996).

1.2.3. Dispersão de nêutrons

O princípio de funcionamento das sondas de nêutrons baseia-se no emprego de fontes radioativas (amerício e berilo) para emitir nêutrons rápidos, que entram em choque com o hidrogênio das moléculas de água presentes no solo. O meio moderador ou termalizador (o solo) recebe os nêutrons rápidos, passando-os a nêutrons térmicos ou lentos.

Após termalizados pelos átomos de hidrogênio, os nêutrons são contados por um detector. O número de nêutrons termalizados é diretamente proporcional ao conteúdo de água no solo. Na prática, o alcance dos nêutrons é até 0,25 m sendo, porém, que a maior incidência ocorre a 50 mm em torno da fonte de nêutrons (KLAR, 1991).

A sonda de nêutrons possui a vantagem de fazer medições em umidade volumétrica, sendo eficiente quando utilizada em um grande volume de solo (DASBERG e DALTON, 1985). Apresenta como vantagem a rapidez nas determinações e a precisão de resultados. Dentre as desvantagens, podem-se citar: alto custo do equipamento; emite radiação ionizante, o que pode ser perigoso se não for bem manuseado; os resultados podem ser alterados por outras fontes de hidrogênio presentes no solo como matéria orgânica em decomposição, raízes e seres vivos em geral.

1.2.4. Reflectometria no domínio do tempo (TDR)

O TDR (reflectometria no domínio do tempo), é um método para medição do conteúdo de água, em volume, em meios porosos (DALTON et al., 1984). Baseia-se na emissão/reflexão de um pulso elétrico, que se propaga ao longo de uma sonda (hastes paralelas) inserida no solo para determinar a constante dielétrica aparente do solo, que sofre uma variação expressiva com o conteúdo de água (SALA e TORRENTS, 1997).

O TDR tem-se mostrado promissor para determinações *in situ* da umidade do solo. Pode ser utilizado para medidas simultâneas da umidade e da condutividade elétrica do solo (DALTON, 1987).

Dentre outras, destacam-se as seguintes vantagens da determinação da umidade do solo via método TDR, entre outras: (i) medidas em tempo real; (ii) praticamente independente da textura, temperatura e salinidade (TOPP e DAVIS, 1982); (iii) não destrói a amostra nem a estrutura do solo; (iv) conveniência para a multiplexização e automação, por permitir medidas isoladas em diversos locais com apenas um medidor e diversas sondas (SPAANS e BAKER, 1993).

Dentre as desvantagens do uso deste método está o alto custo do equipamento.

2. OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo geral desenvolver um sistema elétrico para medição da umidade do solo por meio da determinação de sua constante dielétrica, utilizando o princípio da reflectometria no domínio do tempo (TDR).

Assim sendo, o trabalho abrange os seguintes objetivos específicos:

- ✓ determinar a correlação existente entre a constante dielétrica e o conteúdo de água para solos argilosos e arenosos;
- ✓ determinar o diâmetro e o comprimento de sondas com melhor desempenho para utilização com o TDR; e
- ✓ comparar o desempenho do TDR proposto com o comercial para os dois tipos de solos estudados.

3. REVISÃO DE LITERATURA

A reflectometria no domínio do tempo, comumente designada “TDR”, é uma técnica que vem sendo usada desde as primeiras décadas do século passado para determinar a localização no espaço e, ou, características de vários objetos, tais como a forma, o tamanho e a densidade. Uma forma de conhecimento popular do uso do TDR data da terceira década do século passado, quando foi largamente difundido o uso de radares. Um radar é constituído por um transmissor de rádio, que emite uma pulsação na frequência das microondas e de baixa energia, uma antena direcional e um receptor de rádio sensível. Depois que o transmissor emite a pulsação, o receptor capta o sinal refletido por um objeto distante, como avião ou navio. Medindo o tempo entre a pulsação emitida e o eco, e conhecendo a velocidade da onda no meio, a distância para o objeto refletido pode ser calculada facilmente. Análise detalhada do eco pode ainda revelar detalhes adicionais do objeto refletido, como a forma e o tamanho (ANDREWS, 1994).

Entre as décadas de 30 e 40 do século passado, esta técnica passou a ser utilizada para testar discontinuidades em cabos elétricos, inicialmente em cabos coaxiais destinados à telefonia. Em cabos elétricos, o princípio de funcionamento assemelha-se a um radar de “circuito fechado”; quando um pulso é emitido em linhas paralelas (ou coaxiais), ocorre uma reflexão característica dependente da impedância do sistema e da constante dielétrica do material que faz o isolamento entre os cabos. Como essa constante é fixa e conhecida, a reflexão pode variar apenas quando há uma variação na impedância dos cabos. Se os cabos romperem, haverá uma variação na impedância do sistema e, conseqüentemente, um novo valor

para a reflexão do sinal enviado. Assim, por meio da técnica TDR, é possível localizar com boa exatidão, em redes de distribuição elétrica, possíveis rompimentos dos cabos empregados.

A técnica TDR passou a ser utilizada como meio para determinar a constante dielétrica em líquidos, no fim da década de 60, por Feellner-Fedegg, citado por GOMIDE (1998). Desde então, esta técnica passou a ser utilizada para determinação da constante dielétrica em diversos materiais. No início da década de 80, ela foi utilizada para determinação de propriedades físicas do solo, quando se verificou que a constante dielétrica possuía uma relação acentuada com o conteúdo de água, e em menor grau, com a composição e densidade do mesmo (TOPP et al., 1980).

Numerosos trabalhos foram desenvolvidos para medição da umidade do solo por meio da determinação da constante dielétrica, com os equipamentos testadores de cabos elétricos associados a outros equipamentos eletrônicos. Atualmente, encontram-se disponíveis no mercado equipamentos que utilizam o princípio da reflectometria no domínio do tempo exclusivamente para determinação da umidade do solo, podendo ainda determinar, simultaneamente, a salinidade deste, fazer medições em tempo real, comunicar com computadores remotos, enfim, com as facilidades operacionais que a tecnologia permite.

3.1 Uso da tecnologia TDR para medição de umidade do solo

A técnica da reflectometria no domínio do tempo, aplicada na medição de umidade do solo, consiste em determinar o valor da constante dielétrica do mesmo. A constante dielétrica é função da umidade do solo. Este valor é baseado no tempo de emissão/reflexão de um pulso eletromagnético, emitido por um gerador de pulsos, em hastes metálicas paralelas que servem como “guias de ondas”. Neste caso, a constante dielétrica determinada será a do material entre as hastes metálicas, ou seja, a do solo.

A configuração de duas hastes paralelas assemelha-se à construção de um capacitor, em que o material dielétrico entre as placas é o solo. A partir desta

analogia pode-se demonstrar, simplificada e resumidamente, como obter o valor da constante dielétrica. Demonstrações mais detalhadas a respeito deste tópico podem ser encontradas em: Von Hippel e Kittel, conforme citam DALTON e VAN GENUCHTEN (1986); EISBERG e LERNER (1983).

Um capacitor ideal no vácuo armazena cargas elétricas nas placas, quando submetido a uma ddp (diferença de potencial) conforme a equação

$$Q = C_0 V \quad (3.1)$$

em que

- Q = carga elétrica, C;
- C_0 = capacitância (vácuo), F; e
- V = diferença de potencial, V.

A capacitância C_0 de um capacitor ideal, construído com placas planas e paralelas de área A e uma separação d entre suas placas, é calculada pela equação

$$C_0 = \frac{A}{s} \varepsilon_0 \quad (3.2)$$

em que

- A = área das placas, m^2 ;
- s = distância entre as placas, m; e
- ε_0 = permissividade do vácuo, F/m.

Quase todos os capacitores, na realidade, em vez de vácuo (ou ar) entre as placas contêm um material dielétrico (ou isolante elétrico). Este é utilizado a fim de aumentar a capacitância do capacitor que, então, será obtida conforme a equação

$$C = \frac{A}{s} \varepsilon \quad (3.3)$$

em que

C = capacitância, F; e

ε = permissividade do material dielétrico, F/m.

A relação entre a capacitância C_0 de um capacitor ideal e capacitância C de um capacitor com um dielétrico entre suas placas é obtida, conforme a equação seguinte.

$$C = C_0 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = K C_0 \quad (3.4)$$

O termo K , definido pela proporção entre a permissividade do material dielétrico, ε , e a permissividade do vácuo, ε_0 , é chamado permissividade relativa do dielétrico, ou constante dielétrica relativa, termo mais comum na literatura especializada. O Quadro 3.1 apresenta os valores das constantes dielétricas para alguns materiais à temperatura ambiente. O valor de K é sempre maior que a unidade, para qualquer material dielétrico. Para um material condutor elétrico, K assume valores elevados.

De acordo com a teoria eletromagnética, a velocidade de propagação de um pulso eletromagnético ao longo de eletrodos (hastes), inseridos em um solo com uma constante dielétrica aparente ka , é uma fração da velocidade da luz no vácuo, c . A equação 3.5 expressa esta aproximação.

$$v = \frac{c}{\sqrt{ka}} \quad (3.5)$$

A velocidade do pulso também pode ser determinada pela duração do tempo de trânsito “ t ” durante o percurso $2l$, em que l é o comprimento da haste, em metros, conforme a equação seguinte.

$$v = \frac{2l}{t} \quad (3.6)$$

Quadro 3.1 Constante dielétrica para alguns materiais à temperatura ambiente

Material	Constante dielétrica, K
Água	80
Ar (seco)	1,0006
Glicerina	56
Mica	3 a 7
Polietileno	2,25
Vácuo	1
Vidro	5 a 10

Fonte: EISBERG e LERNER, 1983.

Combinando as equações 3.5 e 3.6, pode-se determinar a aproximação para o valor da constante dielétrica aparente do solo (ka), equação 3.7. O termo “constante dielétrica aparente do solo” foi utilizado por ser o solo composto por três fases, isto é, fase sólida (matriz do solo), líquida e gasosa, sendo que, cada fase apresenta partículas com diferentes valores para a constante dielétrica relativa. Doravante, será utilizado apenas o termo “constante dielétrica” para designar ka , como é mais comumente encontrado na literatura especializada.

$$ka = \left(\frac{ct}{2l} \right)^2 \quad (3.7)$$

Estas relações somente são válidas quando a condutividade elétrica entre as hastes paralelas, que servem como guias do pulso, é nula. Já para solos com salinidade e umidade elevadas, as equações 3.5 a 3.7 são, geralmente, aceitas como primeiras aproximações.

Para explicar o comportamento de atenuação que ocorre no sinal eletromagnético em solos salinos, Dalton, em 1984, citado por DASBERG e DALTON (1985) utilizou a teoria da “linha de transmissão paralela” e apresentou uma relação (equação 3.8) que permite calcular a condutividade elétrica, σ , para solos úmidos. A Figura 3.1 mostra o circuito equivalente para uma linha de transmissão paralela, em que: L e R são a indutância e a resistência do eletrodo, em série; C e G a capacitância e a condutância entre os eletrodos, respectivamente, ao longo do elemento diferencial dz .

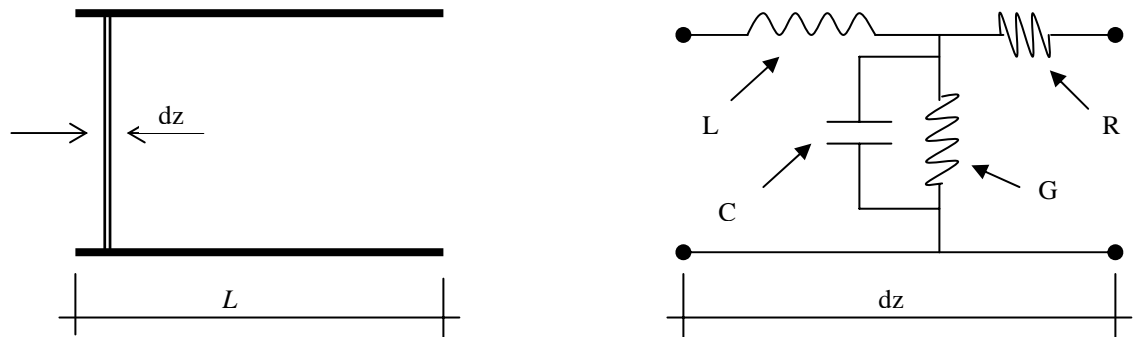
$$\sigma = \frac{\sqrt{K}}{120\pi l} \ln\left(\frac{V_T}{V_R}\right) \quad (3.8)$$

em que

σ = condutividade elétrica, S/m;

V_T = tensão do pulso de entrada, V; e

V_R = tensão do pulso refletido, V.



Fonte: DALTON e VAN GENUCHTEN (1986), adaptado.

Figura 3.1. Esquema de sondas de hastes paralelas usadas na reflectometria no domínio do tempo e circuito elétrico equivalente, em que L é a indutância, R a resistência, G a condutância shunt e C a capacitância ao longo do elemento diferencial dz .

Quando uma tensão alternada é aplicada, surge a variável complexa, explicando as perdas dielétricas que ocorrem no meio onde estão inseridas as sondas. A constante dielétrica pode ser calculada pela equação

$$k = k' - jk'' \quad (3.9)$$

em que k' é a parte real da constante dielétrica (capacitiva), e k'' é a parte imaginária, também definida como fator de perda relativa, que aumenta com a perda de energia e j é $\sqrt{-1}$. A parte imaginária da constante dielétrica aparece na condução elétrica, dissipando energia, no movimento dos dipolos das moléculas de água, que revertem sua orientação de acordo com o campo elétrico a que estão submetidos.

Para a água, considerando altas frequências, o valor da componente imaginária pode ser desprezado (NISSEN et al., 1998). DALTON (1992) e DASBERG e NADLER (1987) notaram que a salinidade do solo influenciou a atenuação do sinal TDR, mas não sua velocidade de propagação, motivo pelo qual a equação 3.7 tem sido empregada para determinação da constante dielétrica para uma grande variedade de solos. NADLER et al (1999) demonstraram que os níveis de salinidade do solo entre 8 a 26 dS.m⁻¹ não afetam a estimativa da constante dielétrica.

TOPP et al. (1980), TOPP e DAVIS (1982), DASBERG e DALTON (1985) e DALTON et al. (1990) concluíram que a determinação da umidade volumétrica θ é, primordialmente, função da constante dielétrica k_a .

A relação encontrada entre a umidade volumétrica e a constante dielétrica foi praticamente constante, para solos com teor de argila variando de 9 a 66% (TOPP et al., 1980). Foi verificado também que a temperatura, a densidade e salinidade do solo não tiveram efeitos significativos sobre a relação entre a constante dielétrica e a umidade. As relações entre a umidade e constante dielétrica, para quatro solos, foram correlacionadas, encontrando-se o seguinte resultado:

$$\theta = -5,3 \times 10^{-2} + 2,92 \times 10^{-2} k_a - 5,5 \times 10^{-4} k_a^2 + 4,3 \times 10^{-6} k_a^3 \quad (3.10)$$

O erro na estimativa da umidade foi 0,013 cm³cm⁻³ (1,3%), quando quatro solos foram considerados em conjunto. O erro para a determinação da umidade pode

ser reduzido para $\pm 0,010 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (1,0%) se for considerado apenas um tipo de solo (TOPP et al., 1980).

3.2. Uso da tecnologia TDR por meio de testadores de cabos metálicos

Os primeiros equipamentos desenvolvidos para uso da técnica de reflectometria no domínio do tempo, para medição da umidade do solo, eram constituídos por um conjunto que compunha o chamado testador de cabos metálicos. Esse conjunto era composto basicamente de: gerador de pulsos, cabo coaxial, amostrador de tensão e um osciloscópio (Figura 3.2).

Para melhor compreensão das funções dos elementos desse conjunto, que compõem o testador de cabos metálicos, o funcionamento e a função de cada elemento serão descritos separadamente.

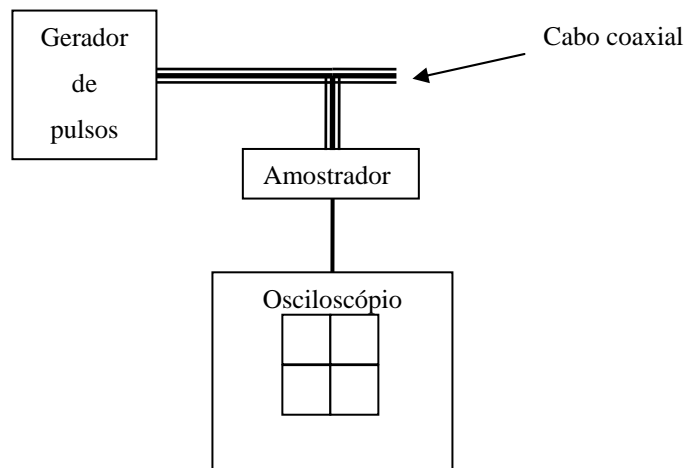


Figura 3.2. Elementos que compõem um testador de cabos metálicos.

O gerador de pulsos tem como função gerar as ondas eletromagnéticas. Uma onda eletromagnética consiste de um campo elétrico e outro magnético. A maioria dos solos é não magnético, o que faz com a que a parte magnética, normalmente, não seja de interesse. Entretanto, a parte elétrica da onda é influenciada pelas propriedades do solo, especialmente pelo conteúdo de água presente no mesmo.

Para testadores de cabos do Tektronicx 1502B ou C, que são os mais comumente utilizados para uso da técnica TDR para medição da umidade dos solos, o pulso gerado tem formato quadrado e é transmitido por um intervalo de tempo de $10 \mu\text{s}$, e em ciclos repetitivos com intervalo de tempo de $60 \mu\text{s}$ (Figura 3.3).

O cabo coaxial tem a função de fazer a conexão entre o gerador de pulso e o amostrador. A malha protetora do cabo coaxial é conectada ao terra do circuito e, portanto, com um potencial de zero volts (0 V). As ondas eletromagnéticas produzidas são lançadas, pelo gerador de pulsos, no condutor central do cabo coaxial com valores de tensão de $0,225 \text{ V}$ entre o condutor e a malha protetora.

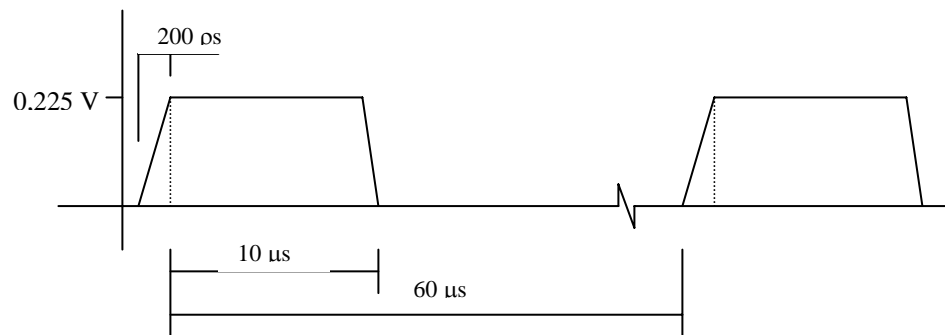


Figura 3.3. Sinal gerado pelo testador de cabo Tektronicx 1502B ou C.

O amostrador de tensão é conectado ao gerador de ondas por meio de um cabo coaxial de 50Ω . As ondas eletromagnéticas, emitidas pelo gerador, viajam à velocidade da luz, se não houver material entre os cabos. Se o material entre os cabos for o polietileno, as ondas viajam com 66% da velocidade da luz.

Assim, o intervalo de tempo entre a transmissão dos pulsos eletromagnéticos e sua percepção pelo amostrador é muito pequeno. Um amostrador geralmente consiste de dois componentes principais, isto é, um medidor de precisão de tempo e um voltímetro de precisão.

O osciloscópio tem como função mostrar, graficamente, as medidas de tensão e tempo simultaneamente, obtidas no amostrador, por meio de uma tela de saída que pode ser de cristal líquido ou um tubo de raios catódicos.

3.2.1. Princípio de funcionamento do testador de cabos metálicos

Quando as ondas eletromagnéticas são lançadas em um cabo conectado ao testador de cabos metálicos, qualquer mudança nas propriedades elétricas do cabo causará reflexão parcial ou total das ondas.

A amplitude da reflexão, em volts, depende do tipo da mudança. Mudanças nas propriedades elétricas do cabo causam mudanças na impedância. Impedância é a relação entre a tensão e a corrente em um elemento submetido à uma corrente alternada, e é medida em ohms. A maioria dos cabos coaxiais comuns possui uma impedância de 50 ohms.

As ondas refletidas, que voltam para a fonte que as gerou, são sobrepostas às ondas transmitidas do gerador de pulsos (embutido no testador de cabos), ocorrendo uma variação na tensão do pulso. O voltímetro de precisão do amostrador percebe a mudança na tensão entre o condutor e proteção deste e, o dispositivo cronometrador do amostrador registra o intervalo de tempo entre o começo da transmissão das ondas e o início da reflexão (NISSEN e MOLDRUP, 1994).

Quando duas ondas com a mesma frequência são sobrepostas, a amplitude da tensão da onda resultante depende da defasagem ou não entre as ondas. As ondas refletidas possuem amplitudes de tensão em função da mudança de impedância experimentada pelos cabos. Se as ondas eletromagnéticas passam por meios com maior impedância, as ondas refletidas tenderão a estar em fase com as ondas entrantes. Se ondas eletromagnéticas passam por meios com menor impedância, é porque as ondas refletidas tenderão a estar em defasagem com as ondas transmitidas.

A situação em que uma onda eletromagnética sofre uma mudança no valor da impedância que cause a reflexão total da onda, poderá ocorrer em dois casos: (a) quando o cabo está aberto, ou seja, a impedância tende para o infinito; e, (b) quando o condutor e proteção são curto-circuitados, ou seja, a impedância tende para 0. A amplitude da tensão da onda refletida é, em ambos os casos, igual à onda de entrada.

Entretanto, a amplitude da tensão resultante da onda, quando ocorre a sobreposição entre a onda de entrada com a onda refletida, é totalmente diferente

nos dois casos. No caso (a), em que a onda refletida está em fase com a onda de entrada, a amplitude da tensão resultante é duas vezes a amplitude da onda de entrada. No caso (b), onde a onda refletida está em defasagem total com a onda de entrada, a amplitude resultante é 0. Portanto, se o amostrador percebe um aumento na tensão, é porque existe um aumento, em algum lugar, na impedância ao longo do cabo que está sendo testado, mas, se o testador de cabos metálicos percebe uma diminuição na tensão é porque ocorreu uma diminuição, em algum lugar, na impedância ao longo do cabo que está sendo testado.

Da tensão medida é possível determinar a mudança na impedância que causou a reflexão. A amplitude da reflexão pode ser calculada pela equação 3.11, se a tensão inicial do pulso de entrada, as impedâncias do cabo antes (cabo contínuo) e após a mudança (após um rompimento do cabo, por exemplo), forem conhecidas.

$$V_R = V_0 \left(\frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \right) \quad (3.11)$$

em que

V_R = amplitude do pulso refletido, V;

V_0 = amplitude do pulso de entrada, V;

z_1 = impedância do cabo onde propaga a onda refletida, Ω ; e

z_2 = impedância após a falha, Ω .

Como as ondas eletromagnéticas viajam com velocidade elevada, o início das ondas pode alcançar o fim de um cabo coaxial de 900 m, ser refletido e retornar ao testador de cabo metálico dentro de 10 μ s, se o dielétrico (isolante) utilizado for o polietileno.

A Tektronix especificou que os testadores de cabos metálicos 1502B ou C podem testar cabos de até 500 m, pois, assim é garantido que o intervalo entre as ondas transmitidas e refletidas estariam dentro de 10 μ s, que é o período em que o equipamento gera os pulsos. Isto é necessário porque o princípio de funcionamento baseia-se inteiramente em que as ondas refletidas são sobrepostas com as

transmitidas. Caso contrário, as falhas (mudanças na impedância) não seriam detectadas. A pausa que dura $50 \mu\text{s}$ garante que as ondulações restantes não atinjam o novo pulso, que seria lançado pelo testador de cabos. Por meio do intervalo de tempo medido, é possível calcular a distância à qual ocorreu a mudança na impedância do cabo, se a velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas no cabo for conhecida.

3.2.2. Uso do testador de cabos metálicos para medição de umidade do solo

A velocidade de propagação (v) de ondas eletromagnéticas em uma linha de transmissão é função da constante dielétrica do material que está entre os condutores.

Não é prático substituir o dielétrico entre condutores coaxiais por solo. Na realidade, o que se faz é conectar o cabo coaxial em hastes metálicas paralelas, para que sirvam de “guias de onda” do pulso eletromagnético e inseri-las no solo. Obtendo o valor do tempo da reflexão ocorrida nas hastes metálicas, pode-se estimar a constante dielétrica aparente do solo (k_a), conforme a equação 3.7. Uma vez que a constante dielétrica do solo é função dos materiais que o compõem, e sendo este um sistema trifásico, têm-se os seguintes valores para as constantes dielétricas (k): ar, $k = 1$; partículas sólidas, $3 < k < 7$ (dependendo do tipo de solo); e água, $k = 80,4$ (SERRARENS et al., 2000).

Utilizando o testador de cabos para determinação do tempo da reflexão, tem-se que a constante dielétrica aparente do solo será, predominantemente, uma função do conteúdo de água no solo, uma vez que o comprimento da linha de transmissão (guias da onda ou, ainda, as hastes metálicas) é constante.

3.3. Calibração do TDR para medição de umidade do solo

A grande dificuldade no uso da técnica de reflectometria no domínio do tempo, para a medição da umidade do solo, é sua calibração. Atualmente, não existe

um modelo admitido como padrão de calibração mas existem pesquisas que visam sistematizar essa calibração (TOPP e DAVIS, 1982; WHITE et al., 1994; ROTH et al., 1990).

De acordo com TOPP et al. (1980), as variáveis que afetam a constante dielétrica do solo são: textura, densidade, estrutura, teor de sais solúveis, temperatura e frequência da onda eletromagnética utilizada. Concluíram que, para frequências entre 1 e 20 GHz, a variável que afeta preponderantemente a constante dielétrica aparente do solo seria o conteúdo de água no mesmo.

Segundo Davis e Annan, citados por NISSEN e MOLDRUP (1994) e AMATO e RICHTIE (1995), sob uma variação de frequência entre 1 MHz a 1 GHz, a parte real da constante dielétrica do solo apresentaria dependência, quase que exclusivamente, do conteúdo de água no mesmo. Uma vez que a constante dielétrica da água assume valores predominantes para solos úmidos, as demais fases do solo tornam-se irrelevantes para a medida da constante dielétrica aparente, o que faz com que as variáveis, como a textura e composição do solo, sejam de menor importância na calibração do equipamento TDR.

A dificuldade de encontrar um modelo padrão consiste, entre outros fatores, na composição atípica de alguns solos. Dados obtidos por meio de calibrações feitas em laboratórios podem ser encontrados na literatura (TOPP e DAVIS, 1982; DIRKSEN e DASBERG, 1993). No momento, admite-se que uma única calibração não é suficiente. TOPP et al. (1980) e ROTH et al. (1992) mostraram que são necessárias calibrações diferentes, para solos com minerais ferrosos ou orgânicos.

Segundo ROBINSON et al. (1994), a presença de óxido de ferro e minerais de óxido de titânio influenciam a determinação da constante dielétrica por meio da tecnologia TDR e a subsequente estimação do conteúdo de água. Dentre os minerais citados por esses autores, a magnetita mostra um maior efeito, causando uma sobrestimação do conteúdo de água de até 60%, quando se usa o modelo de calibração obtido por TOPP et al. (1980), se o solo possui até de 15% deste mineral. Também foi observado que a hematita pode influenciar a medida da constante dielétrica. Os autores recomendam pesquisa adicional para avaliar a influência da

presença destes minerais no solo, em uma calibração para o uso da tecnologia TDR para medição da umidade deste.

A umidade fornecida pela tecnologia TDR é uma medida da média da umidade ao longo das sondas inseridas no solo (TOPP e DAVIS, 1982; DALTON, 1992). Para certificar este resultado, DALTON (1987) utilizou solos de diferentes granulometrias e umidades, confinados em recipientes. Após a adição de água, os recipientes foram hermeticamente fechados. Foi esperado um período de 30 dias para uniformização da umidade em todo o perfil do solo contido no recipiente, antes da determinação da umidade do solo

TOMMASELLI (1997), em estudo comparando as respostas de um equipamento TDR comercial com a umidade volumétrica obtida pelo método padrão da estufa, utilizou recipiente contendo solo úmido homogeneizado manualmente e com um tempo de espera de um dia para a aquisição de dados.

Existem diversos modelos para calibração do TDR, sendo que o proposto por TOPP et al. (1980) tem sido usado como referência. TOPP et al. (1980), admitindo que a constante dielétrica aparente do solo seria apenas uma função do conteúdo de água no mesmo, determinaram que a relação de dependência entre as duas variáveis (constante dielétrica aparente e conteúdo de água) poderia ser representada por uma equação polinomial de terceiro grau,

$$\theta = a + b k + c k^2 + d k^3 \quad (3.12)$$

em que a, b, c e d são os parâmetros estimados, obtidos com dados oriundos de onze solos testados.

Portanto, o modelo proposto por TOPP et al. (1980) foi obtido empiricamente. A Figura 3.4 apresenta o resultado deste modelo em forma de gráfico. O modelo desconsidera as demais variáveis do solo, mas ajusta-se bem a solos homogêneos e é utilizado por diversos fabricantes de equipamentos TDR a fim de medir a umidade do solo, pois ajusta-se bem em solos minerais com conteúdo de água menor que $0,5 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$.

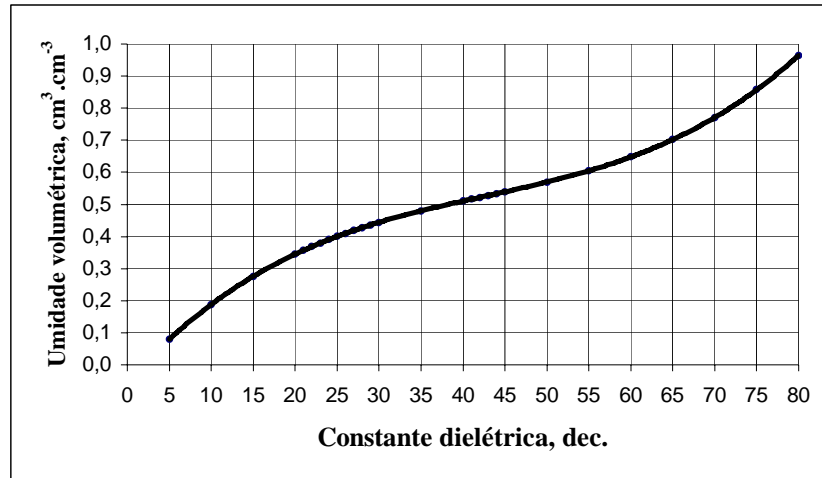


Figura 3.4. Curva da calibração empírica obtida por TOPP et al. (1980) considerando onze diferentes tipos de solos, para um modelo polinomial cúbico.

Outro modelo de calibração, proposto por Or e Wraith (GOMIDE, 1998), baseia-se em propriedades físicas do solo e no aspecto trifásico deste, considerando individualmente as propriedades dielétricas constituintes do complexo ar-solo-água, conforme a equação

$$\theta = \frac{k_a^\beta - (1-n)k_s^\beta - nk_{ar}^\beta}{k_w^\beta - k_{ar}^\beta} \quad (3.13)$$

em que

k_s = constante dielétrica dos sólidos do solo, decimal;

k_{ar} = constante dielétrica do ar, decimal;

k_w = constante dielétrica da água, decimal;

n = porosidade total do solo, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; e

β = parâmetro relacionado com a geometria do meio poroso, decimal.

Considerando o valor de 0,5 para o parâmetro β , em meios porosos bifásicos e isotrópicos, 81, 4 e 1 para a constante dielétrica da água, do solo e do ar, respectivamente a equação fica simplificada, conforme demonstra a equação seguinte.

$$\theta = \frac{\sqrt{k_a} - (2 - n)}{8} \quad (3.14)$$

A Equação 3.14 produz um resultado similar ao de TOPP et al. (1980), para uma faixa do conteúdo de água de até $0,5 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, podendo ainda ser utilizada para uma maior faixa de umidade. Este modelo é considerado semi-empírico.

DIRKSEN e DASBERG (1993) utilizaram um modelo puramente físico para calibração do TDR, em onze diferentes tipos de solo. Este modelo, derivado das equações de Maxwell, descreve o solo como uma mistura de quatro fases homogêneas aleatoriamente distribuídas. Essas quatro fases seriam: sólida, líquida livre, gasosa e água adsorvida. A desvantagem deste modelo está no grande número de parâmetros a serem determinados segundo os próprios autores, que compararam os resultados com a calibração obtida por TOPP et al. (1980) e com uma outra calibração empírica denominada modelo α , proposta por Birchak e colaboradores, sua vantagem esta na obtenção de resultados melhores que os obtidos nas demais calibrações testadas.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado nos laboratórios de Instrumentação e de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais.

4.1. O equipamento TDR para medição da umidade do solo

O equipamento TDR montado para medição da umidade do solo era composto de: osciloscópio de 500 MHz (modelo HP 54610B, HP), gerador de pulsos (modelo 12562/D, EMG), cabo coaxial, cabo de antena para TV, casador de impedâncias, conectores e sondas, conforme ilustrado na Figura 4.1. Segue-se uma breve descrição destes componentes, separadamente.

4.1.1. Osciloscópio

O osciloscópio é um dos instrumentos mais versáteis e práticos usados em eletrônica. Este instrumento possibilita avaliar a variação temporal de um sinal elétrico, como a tensão, e exibe o gráfico desta em função do tempo. O eixo horizontal (eixo x) é o eixo dos tempos ou base de tempo, o eixo vertical (eixo y) é o eixo das amplitudes dos sinais medidos, conforme Figura 4.2.

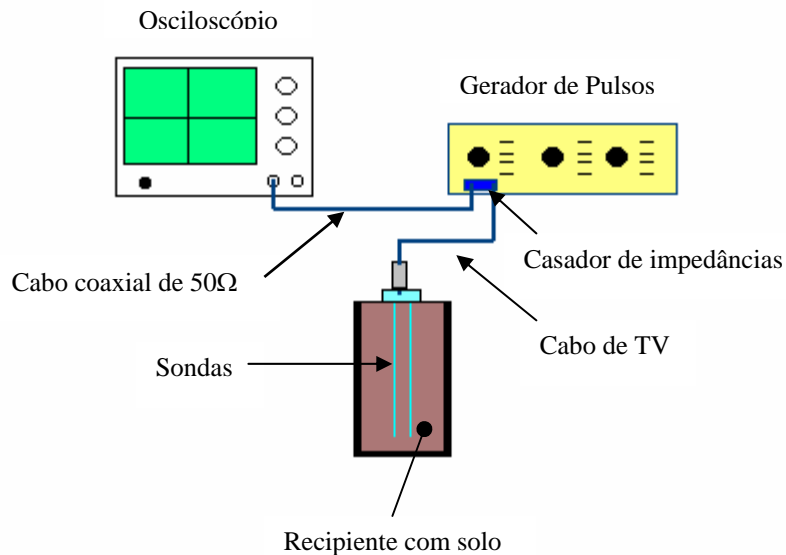


Figura 4.1. Sistema para medição da umidade do solo utilizando o princípio da reflectometria no domínio do tempo.

Dentre outras, o osciloscópio tem as seguintes características:

- Duas entradas verticais (*in*) - onde se conecta(m) o(s) sinal(is) a ser(em) medido(s), com opção para sinais CA ou CC e impedâncias de entrada de $50\ \Omega$ ou $1\text{M}\Omega$;
- Seletor de amplitude vertical (*variable V/div*) - controle escalonado de ajuste do ganho do amplificador vertical e, conseqüentemente, a amplitude do sinal na tela em V/cm ou volts por divisão, com ajuste máximo para $50\ \text{V/cm}$ e mínimo de $2\ \text{mV/cm}$;
- Seletor de base de tempo (*time/div*) - controla o tempo de varredura horizontal, por meio de um ajuste escalonado, com limites entre $1\ \text{s/cm}$, ou segundos por divisão, até $1\ \text{ns/cm}$ ($1,0 \times 10^{-9}\ \text{s/cm}$);
- Posição vertical (*position y*) - controle de ajuste do sinal em relação ao deslocamento do feixe no eixo y da tela;
- Posição horizontal (*position x*) - controle de ajuste do sinal em relação ao deslocamento do feixe no eixo x da tela;
- Controle automático de sincronismo (*auto scale*) - se o sinal de entrada tem uma forma de onda periódica, o aparelho ajusta automaticamente a amplitude vertical

- e a base de tempo, de forma que uma varredura completa do ciclo seja exibida na tela;
- g. Leitura automática de valores do sinal analisado: frequência, período e tensão pico a pico;
 - h. Cursores com posições controladas para tempo e tensão, para delimitação de trechos de interesse do sinal analisado.

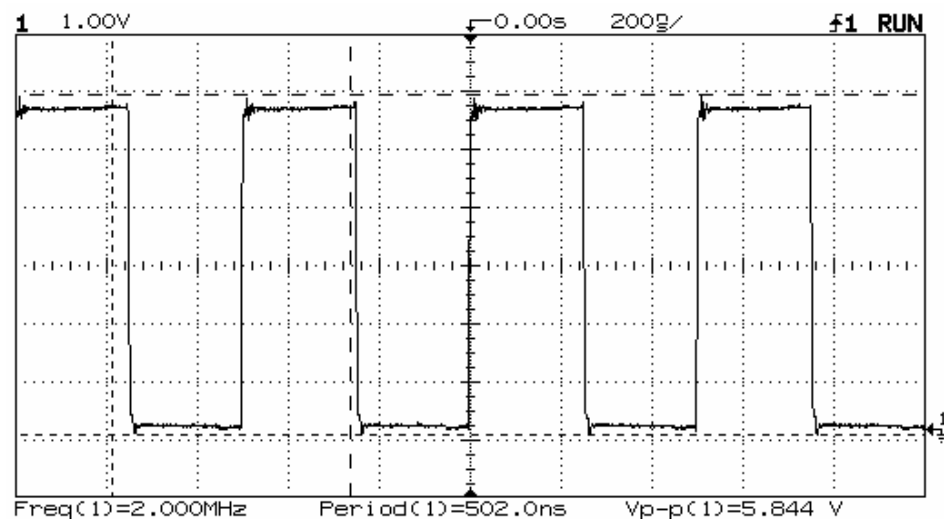


Figura 4.2. Imagem do osciloscópio para sinal de onda quadrada fornecida pelo gerador de pulsos com frequência de 2 MHz, tensão pico a pico de 5,844 V, com ajustes de escala 1,0 V/cm para vertical e 200 ns/cm para horizontal.

O osciloscópio possui interface para comunicação com microcomputadores, o que permite que os sinais detectados pelo aparelho sejam enviados para um computador. Um software específico foi desenvolvido para converter cada sinal (ou forma de onda) visualizado na tela do osciloscópio em 2000 pares ordenados, que foram armazenados em uma planilha eletrônica para posterior análise.

4.1.2. Gerador de pulsos

O gerador de pulsos, utilizado neste estudo, foi cedido pelo Departamento de Física da Universidade Federal de Viçosa. Dentre outras, suas características são:

- a. Saída em frequência variável de 1 Hz a 100 MHz;
- b. Forma de onda quadrada com controle de patamar (largura do pulso), subida rápida (*risetime*) em torno de 5,6 ns, sinal de saída com tensão variável entre 5 e 10 volts;
- c. Pulso quadrado padronizado em 5,844 volts pico a pico; e
- d. Impedância de saída de 50 Ω .

A forma de onda quadrada exibida na Figura 4.2 foi a padrão, utilizada neste estudo e, portanto, com 5,844 volts pico a pico, frequência de 2 MHz e uma subida de pico em aproximadamente 5,6 ns.

4.1.3. Cabo coaxial

O cabo coaxial de 50 Ω foi utilizado para fazer a conexão entre o osciloscópio e o gerador de pulsos. Este cabo foi selecionado por apresentar menor distorção, ou influência, nas reflexões do sinal.

4.1.4. Cabo de antena para TV

O cabo de conexão utilizado neste trabalho foi o de antena de TV, paralelo, de 300 Ω , com cerca de 1 m de comprimento. Embora possuindo uma impedância maior que o cabo coaxial de 50 Ω , apresentou-se como o mais viável, tecnicamente, para fazer a conexão das sondas ao casador de impedâncias. Este, por sua vez, era conectado ao gerador de pulsos por meio de uma derivação em “T”. O outro terminal da derivação “T” era conectado ao osciloscópio.

TOPP (1987), DALTON e VAN GENUTCHTEN (1986) também utilizaram este tipo de cabo, pois, ele reduz as reflexões sucessivas do sinal de entrada.

4.1.5. O casador de impedâncias

Quando um sinal de corrente alternada propaga-se em uma linha de transmissão coaxial, o centro do condutor “carrega” o sinal e a malha protetora é aterrada (potencial 0 V). Desta forma, um sinal que se propaga em um condutor é considerado não-balanceado (com referência à terra). Numa linha de transmissão paralela, os dois condutores “carregam” o sinal em igual magnitude, mas com sinais opostos, se o referencial for a terra.

Para converter um sinal não-balanceado para balanceado, um casador de impedâncias é inserido entre a linha coaxial e a linha paralela (Figura 4.3). Se o casador de impedância não for utilizado, o sinal poderá mudar gradualmente, mudando de não-balanceado para balanceado, mas esta configuração está sujeita a erros e geralmente não é recomendada (TOPP e DAVIS, 1982).

Outra função do casador de impedâncias seria tornar compatíveis linhas de transmissão com diferentes impedâncias. As características de um casador são especificadas em termos da relação entre as impedâncias de entrada e saída. A Figura 4.3 mostra um casador de impedâncias típico 1:1.

A magnitude e o sinal da reflexão sofrida em sondas TDR, para medição da umidade do solo, depende da magnitude do casador de impedâncias; portanto, casadores 1:1 ou 1:4 teriam diferentes reflexões para uma dada combinação de cabos e sondas. A impedância z para linhas de transmissão paralelas (sondas) em um meio preponderantemente não-condutivo (solo) é função de constante dielétrica k_a e pode ser calculada pela Equação 4.1, segundo Grant e Philips, citados por SPAANS e BAKER (1993), HUISMAN e BOUTEN (1999), NOBORIO et al. (1999), válida para $2s \gg d$, ou

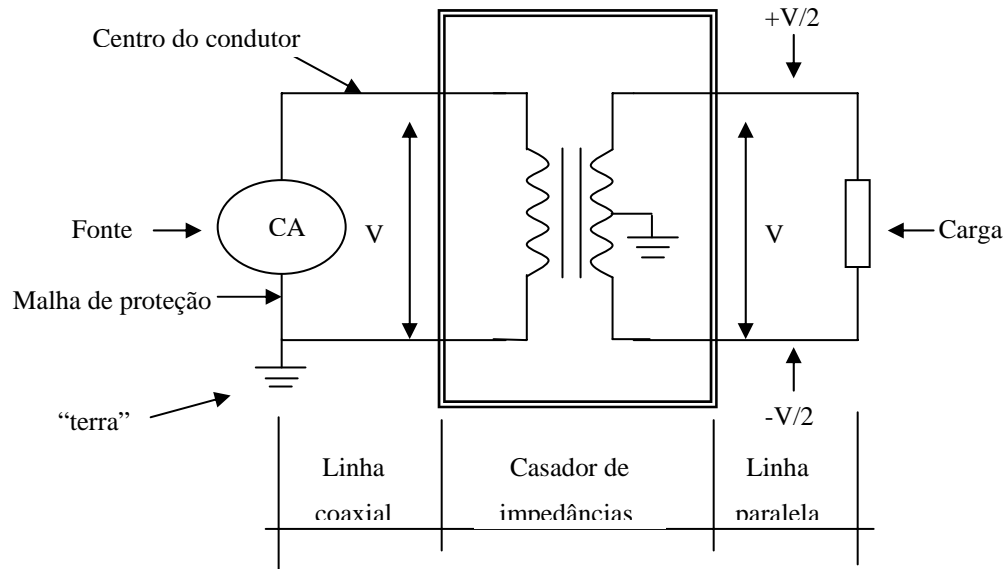
$$z = \frac{120}{\sqrt{ka}} \ln\left(\frac{2s}{d}\right) \quad (4.1)$$

em que

z = impedância da sonda, Ω ;

s = espaçamento entre as sondas, m; e

d = diâmetro das sondas, m.



Fonte: SPAANS e BAKER, 1993, adaptado.

Figura 4.3. Representação esquemática de um sinal alternado lançado ao longo de uma linha coaxial e conversão para sinal alternado balanceado por meio do casador de impedâncias.

4.1.6. Conectores e sondas

As sondas TDR para medição da umidade do solo podem ser classificadas de acordo com sua construção. Em princípio, as hastes podem ser construídas com um material não-magnético e com condutividade elétrica muito maior do que a do meio em que serão inseridas (DALTON, 1992).

As sondas são consideradas padrão, quando construídas com duas hastes paralelas contínuas, revestidas com material isolante ou não. Uma variação do

modelo padrão são as sondas providas de múltiplos sensores para diversas profundidades (SERRARENS et al., 2000). Existem ainda, dentre outras, as sondas que emulam cabo coaxial, construídas com quatro hastes, sendo três destas consideradas como blindagem (conectadas à malha de proteção do cabo coaxial) e uma haste central como o positivo, segundo Zegelin et al., Crestana e Hermann, citados por GOMIDE (1998).

Os conectores têm como função fazer o acoplamento entre o cabo de TV e as diversas sondas. No trabalho, os fios do cabo de TV foram soldados a dois conectores do tipo “pino banana” e, em cada haste da sonda foi atarraxado, nas extremidades que não ficavam enterradas no solo, um conector tipo “sindal”. Na outra extremidade deste último conector foi aparafusado um fio rígido com cerca de 20 mm e, na extremidade deste foi soldado um outro “pino banana”, que facilmente poderia ser conectado e desconectado ao cabo de TV.

Este procedimento foi necessário, uma vez que um grande número de acoplamentos seria feito durante o experimento, e também para evitar reflexões desnecessárias que poderiam ocorrer em conexões mais simples.

As sondas utilizadas como “guias do pulso” foram construídas no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Foram construídos dois conjuntos de sondas, sendo seis com diâmetro d_1 de 3,2 mm e outras seis com um diâmetro d_2 de 6,5 mm. Cada sonda era composta duas hastes paralelas, espaçadas entre si de 50 mm. Para cada conjunto de sondas, foram construídas peças com comprimentos de 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30 e 0,35 m.

A condição de paralelismo das sondas não é crítica, quando se quer apenas medir umidade do solo, porém, torna-se essencial para medição da condutividade elétrica do mesmo (STEIN e KANE, 1983).

Para manter as hastes paralelas entre si com uma certa “robustez mecânica”, que suportasse esforço ao penetrar no solo, foram utilizados segmentos de tubos hidráulicos de PVC, com 12 e 19 mm de diâmetro, para as sondas com os diâmetros d_1 e d_2 , respectivamente. Os segmentos de PVC com 70 mm comprimento foram preenchidos com massa epóxi para conferir rigidez ao conjunto. A massa

epóxi foi manuseada de forma a não possibilitar o contato físico entre as hastes dentro do cano, o que poderia causar reflexões indesejáveis.

4.2. Solos ensaiados

4.2.1. Características físicas dos solos

Os solos utilizados neste estudo foram coletados nos municípios de Coimbra e São Geraldo, em locais próximos à rodovia. Foram selecionados dois solos homogêneos: Areia Quartzosa (AQ) e Latossolo Vermelho (LV), com diferentes características granulométricas. O Quadro 4.1 apresenta a análise granulométrica e a classificação textural dos solos. Essas análises foram realizadas no Laboratório de Solos, pertencente ao Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa.

Quadro 4.1. Análise granulométrica e classe textural para dois solos: Areia Quartzosa e Latossolo Vermelho

Solo	Areia grossa dag/kg	Areia fina dag/kg	Silte dag/kg	Argila dag/kg	Classe textural
Areia Quartzosa	54,0	40,0	4,0	2,0	Areia
Latossolo Vermelho	17,0	12,0	7,0	64,0	Muito argilosa

A curva de retenção de água no solo foi determinada com o extrator de pressão de Richards, utilizando-se amostras deformadas. Os pontos de interesse da curva de retenção, para este estudo, concentram-se entre as umidades correspondentes ao ponto de murcha à de capacidade de campo dos solos. O Quadro 4.2 apresenta as percentagens de água retidas nos solos submetidos às pressões de 0,01; 0,03; 0,1; 0,5 e 1,5 MPa.

4.2.2. Homogeneização da umidade dos solos

Para assegurar que a umidade do solo fosse uniforme ao longo do comprimento das sondas, optou-se por trabalhar com solo confinado em recipientes.

Quadro 4.2. Umidades retidas a diferentes tensões para os dois solos estudados

Solo	Umidade do solo base seca, %				
	Pressão, MPa				
	0,01	0,03	0,1	0,5	1,5
Areia Quartzosa	17,4	9,7	6,9	4,4	3,7
Latossolo Vermelho	37,3	29,7	27,0	23,9	20,4

Conforme a recomendação de TOMMASELLI (1997), para que a medição da umidade do solo seja confiável, torna-se necessário no mínimo a determinação de vinte valores da constante dielétrica e as respectivas umidades do solo, distribuídos uniformemente entre o ponto de umidade residual e o ponto de saturação do solo durante o delineamento da curva de calibração da tecnologia TDR. Para obter esses pontos uniformemente distribuídos, foi adotada a metodologia descrita a seguir.

Os solos foram secos ao ar, destorroados e peneirados em malhas de 2 mm. Após a serem peineirados, as amostras foram armazenadas em recipientes construídos especialmente para este fim. Os recipientes foram constituídos de segmentos de tubos de PVC de 200 mm de diâmetro externo e altura de 0,40 m. A base foi concretada com uma argamassa de traço forte, com 30 mm de altura, para que não se perdesse umidade pela base do recipiente. Cada recipiente, portanto, possuía uma altura útil 0,37 m de solo.

Antes de fazer o preenchimento dos recipientes determinou-se a umidade residual. O intervalo entre a umidade residual e a capacidade de campo foi dividido em 20 partes, obtendo-se a umidade que cada solo contido no recipiente deveria possuir. Subtraindo-se da umidade desejada, o valor da umidade residual, calculou-se a quantidade de água a ser adicionada ao solo de cada recipiente, multiplicando a

diferença pelo peso do solo. A massa de água foi cuidadosamente aspergida sobre a massa de solo e, logo após a mistura, peneirada por duas vezes consecutivas, em malhas de 2 mm e, finalmente, depositada de volta ao recipiente. Vale ressaltar que além dos cuidados tomados na construção dos recipientes, o fundo destes foi coberto com material plástico para que a massa de solo úmida não entrasse em contato com a argamassa. Após a deposição do solo no recipiente, este foi vedado com plástico e cinta elástica e deixado em repouso por, no mínimo, 10 dias para que houvesse a homogeneização da umidade em todo o perfil .

Para determinação da umidade de saturação dos solos, foram utilizados recipientes de PVC com 200 mm de diâmetro externo, com base de PVC perfurada e com uma malha porosa em sua parte interna disposta no fundo do recipiente. Foram utilizados dois recipientes imersos em água até uma altura da coluna correspondente a 2/3 de solo, por três dias, antes da aquisição de dados.

Determinou-se, também, a constante dielétrica dos dois tipos de solos secos em estufa a 105 – 110 °C, por 72 horas. Antes da aquisição de dados, esperou-se por um período de 6 horas, para que o solo atingisse a temperatura ambiente.

4.2.3. Determinação da umidade volumétrica do solo

Para calcular o conteúdo volumétrico de água do solo contido nos recipientes, após a aquisição de dados com o sistema TDR desenvolvido, determinou-se a densidade úmida do solo ρ_u e a umidade gravimétrica U_g de cada amostra.

Para calcular a umidade em volume, a partir da densidade úmida, utilizou-se a equação

$$\rho_u = \frac{m_T}{v_T} = \frac{m_s + m_{ag} + m_{ar}}{v_T} = \frac{m_s + m_{ag}}{v_T} \quad (4.2)$$

em que

- ρ_u = densidade úmida, decimal;
- m_T = massa total, g;
- v_T = volume total, cm^3 ;
- m_s = massa de solo, g;
- m_{ag} = massa de água, g; e
- m_{ar} = massa de ar, g.

A massa de ar m_{ar} foi desconsiderada e a umidade gravimétrica foi calculada, utilizando-se a seguinte equação

$$U_g = \frac{m_{ag}}{m_s} \quad (4.3)$$

em que U_g é a umidade gravimétrica, $\text{g}^3 \cdot \text{g}^{-3}$. Logo,

$$m_{ag} = U_g m_s \quad (4.4)$$

substituindo a equação 4.4 em 4.2 obtém-se a equação

$$\rho_u = \frac{m_s + m_s U_g}{v_T} = \frac{m_s (1 + U_g)}{v_T} \quad (4.5)$$

A umidade em volume foi calculada, empregando-se a equação

$$\theta = \frac{v_{ag}}{v_T} \quad (4.6)$$

em que θ é a umidade volumétrica, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. Isolando o volume total, da equação 4.6, tem-se a equação

$$v_T = \frac{v_{ag}}{\theta} \quad (4.7)$$

e o volume de água pode ser calculado por

$$v_{ag} = \frac{m_{ag}}{\gamma_{ag}} \quad (4.8)$$

em que, γ_{ag} é a massa específica da água, g.cm^{-3} . Substituindo a equação 4.4 na equação 4.8, obtém-se,

$$v_{ag} = \frac{m_{ag}}{\gamma_{ag}} = \frac{U_g m_s}{\gamma_{ag}} \quad (4.9)$$

O volume de água também pode ser calculado, substituindo a equação 4.9 na equação 4.7, obtendo-se

$$v_T = \frac{U_g m_s}{\theta \gamma_{ag}} \quad (4.10)$$

substituindo a equação 4.10 na equação 4.5, obtém-se a equação 4.11 que expressa a densidade úmida em função da umidade volumétrica, da massa específica da água e da umidade gravimétrica,

$$\rho_u = \frac{m_s (1 + U_g)}{\left(\frac{U_g m_s}{\theta \gamma_{ag}} \right)} = \frac{\theta \gamma_{ag} (1 + U_g)}{U_g} \quad (4.11)$$

colocando a equação 4.11 em função da umidade em volume, e dividindo o segundo termo da equação pela umidade gravimétrica U_g , tem-se a equação

$$\theta = \frac{\rho_u U_g}{\gamma_{ag} (1 + U_g)} \div U_g = \frac{\rho_u}{\gamma_{ag} \left(1 + \frac{1}{U_g}\right)} \quad (4.12)$$

considerando a massa específica da água igual 1g.cm^{-3} , tem-se, finalmente, a umidade em volume em função da umidade gravimétrica e da densidade úmida do solo, conforme a equação

$$\theta = \frac{\rho_u}{\left(1 + \frac{1}{U_g}\right)} \quad (4.13)$$

Como a constante dielétrica foi correlacionada com a umidade em volume, e sendo esta uma função da densidade úmida e da umidade gravimétrica, foi utilizada balança com precisão de 1 g para medir o peso úmido (do recipiente com solo) e feita a determinação da umidade gravimétrica utilizando o método padrão de estufa.

Para determinação da umidade gravimétrica do solo, foram coletadas quatro amostras de cada recipiente, às profundidades de 0,05, 0,10, 0,20 e 0,30 m. Para a determinação da umidade média, utilizando-se o TDR, procedeu-se da seguinte forma:

- (a) para sondas de 0,10 e 0,15 m, utilizou-se a média dos valores de umidade gravimétrica obtidos a 5 e 10 cm de profundidade;
- (b) para sondas de 0,20 e 0,25 m, utilizou-se a média dos valores de umidade gravimétrica obtidos a 0,05; 0,10 e 0,20 m de profundidade; e
- (c) para sondas de 30 e 35 cm, utilizou-se a média dos valores de umidade gravimétrica obtidos a 0,05; 0,10; 0,20 e 0,30 m de profundidade.

4.3. Sistema de aquisição de dados com equipamento TDR

O sistema de aquisição de dados com o equipamento TDR para medição de umidade do solo consiste de um osciloscópio, que converte as curvas por ele analisadas em 2000 pares ordenados. Para obtenção da curva de calibração do TDR, determinou-se a constante dielétrica com cada uma das 12 sondas construídas.

As sondas eram cuidadosamente inseridas no recipiente, isoladas e em posição diferente das anteriores para evitar interferências. Após a instalação da sonda, faziam-se três leituras consecutivas do pulso refletido, armazenando as informações em planilha eletrônica. Este procedimento gerou um total de 1656 arquivos.

Com os pulsos refletidos, coletados com o TDR, foi necessário calcular o tempo de reflexão ocorrido para, posteriormente, obter-se o valor da constante dielétrica do solo. O tempo de reflexão do pulso, ou tempo de trânsito, consiste em determinar os pontos nos quais ocorreram o início e o fim da reflexão. Nomeando o início da reflexão como ponto A e o fim como ponto B, no gráfico, conforme Figura 4.4, o tempo de reflexão t será a diferença entre T_A e T_B .

Um critério essencial para medição da umidade do solo, utilizando-se a tecnologia TDR, é a habilidade em identificar os pontos A e B. O ponto A pode ser determinado como aquele que fica inalterado na curva, seja quais forem as condições de salinidade e umidade; já o ponto B é correspondente, em tempo, à mínima tensão e pode desaparecer, sob algumas condições, DALTON (1992).

Neste estudo, o ponto B, que determina o fim da reflexão, foi definido de acordo com o tempo correspondente ao menor valor de tensão para um determinado intervalo, conforme apresentado na Figura 4.4. Esse valor, para cada pulso, foi determinado via software.

O software desenvolvido possui a função de identificar e contar quantas vezes ocorre o valor mínimo de tensão dentro de um intervalo predeterminado. Para obter o tempo da reflexão t , calcula-se a média dos valores correspondentes ao tempo, em ns, para a primeira observação do mínimo valor de tensão (ponto B) e para o tempo

correspondente à última observação deste. Com o tempo médio entre a primeira e última observação do valor mínimo de tensão e o valor predeterminado do ponto A, foi finalmente calculado, pelo software, o valor do tempo da reflexão t e, a partir deste, a constante dielétrica do solo.

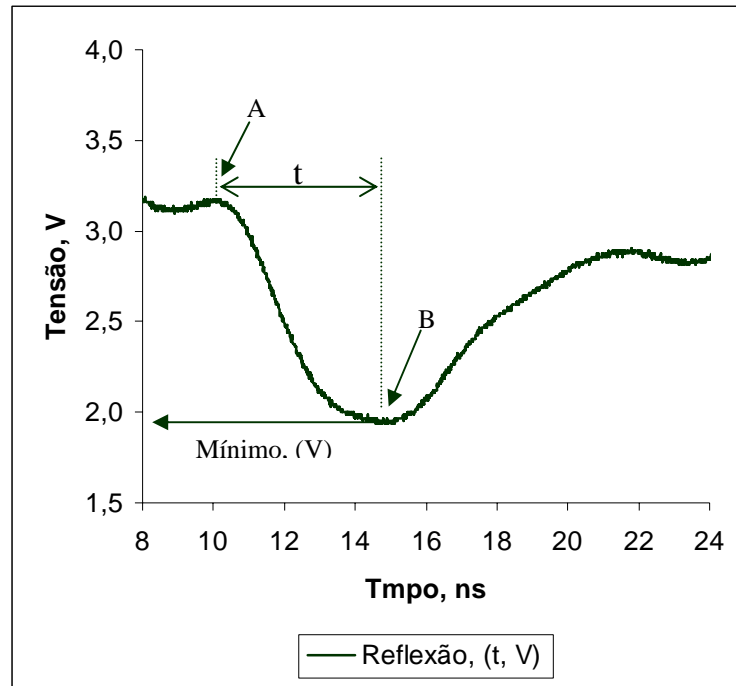


Figura 4.4. Tempo de trânsito para reflexão no solo Latossolo Vermelho, comprimento de sonda de 0,15 m, diâmetro de 6,5 mm e unidade média θ de $0,078 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$.

O software desenvolvido calcula os seguintes valores: (i) mínima tensão observada; (ii) número de ocorrências em que este valor é observado; e (iii) tempo de reflexão t . Para simplificação da construção do programa, optou-se construí-lo de forma que ele analisasse apenas os dados de um tipo de sonda, para um dado diâmetro e em um tipo de solo por vez.

Para definir o início da reflexão, ou ponto A, calculou-se a máxima variação do tempo de reflexão (ΔT_{max}), que poderia ocorrer para uma determinada sonda. O intervalo de tempo para máxima reflexão teórica foi obtido, rearranjando-se a Equação 3.7, ou seja, calculando o tempo de reflexão em função do comprimento da sonda e da constante dielétrica da água. Admitindo o valor da constante dielétrica da

água k_{ag} igual a 80, o que corresponderia a uma umidade em volume de 1 (ou 100%), segundo a curva de ajuste de TOPP et al. (1980), calculou-se o tempo de reflexão correspondente ($\Delta T_{\text{água}}$). Procedendo da mesma forma, para o ar, admitindo k_{ar} igual 1, obteve-se o valor da mínima reflexão (ΔT_{ar}). A diferença entre os tempos de reflexão para k_{ag} igual a 80 e k_{ar} igual a 1 seria o máximo intervalo de reflexão (ΔT_{max}) que poderia ocorrer para uma determinada sonda.

Para a determinação de valores reais do tempo de trânsito, as sondas foram imersas em água pura e obteve-se a imagem gerada pelo osciloscópio, convertida em pares ordenados e posteriormente analisada, repetindo este procedimento para as sondas ao ar. A diferença encontrada dos tempos de reflexão foi considerada como o intervalo máximo que poderia ocorrer para aquela sonda (ΔT_{max}). De posse do valor deste intervalo e do valor do fim da reflexão, quando a sonda encontra-se imersa na água ($T_{B\text{água}}$), obtido no eixo do tempo (eixo das abscissas da Figura 4.4.), calculou-se qual seria o valor do ponto A, ou seja, do início da reflexão, por meio da equação

$$T_A = T_{B\text{água}} - \Delta T_{\text{max}} \quad (4.14)$$

em que

T_A = início da reflexão, s;

ΔT_{max} = intervalo máximo de reflexão, s; e

$T_{B\text{água}}$ = valor do fim da reflexão para sondas imersas em água, s.

4.4. Aquisição de dados com o TDR comercial

Utilizou-se também um TDR comercial, modelo Trase System I, com sondas de aço inoxidável e diâmetro de hastes de 6,5 mm, distanciadas de 0,05 m, com comprimentos de 0,15 e 0,30 m. Este equipamento, entre outras opções, fornece simultaneamente os valores de constante dielétrica k_a e da umidade, em volume, do solo.

Foram analisadas, nesta etapa do trabalho, as correlações geradas para duas sondas utilizadas pelo sistema TDR desenvolvido, com diâmetro d_2 (6,5 mm), e comparadas com as respostas obtidas com outras duas sondas, de mesmo comprimento e diâmetro, utilizadas pelo TDR comercial (Trase System I), tendo ambos como referencial a umidade volumétrica obtida pelo método padrão.

Foram feitas três repetições de medidas de umidade para cada sonda selecionada, nos dois equipamentos TDR, para os solos Areia Quartzosa e Latossolo Vermelho. Os valores de k_a e θ foram coletados e armazenados em planilha eletrônica.

O intervalo de umidade testado neste experimento, encontrava-se compreendido entre a capacidade de campo e o ponto de murcha, para ambos os solos.

Para a determinação da umidade média utilizando o TDR comercial, procedeu-se da seguinte forma:

- (a) para sonda de 0,15 m, utilizou-se a média dos valores de umidade gravimétrica, obtidos a 0,05 e 0,15 m de profundidade; e
- (b) para sonda de 0,30 m, utilizou-se a média dos valores de umidade gravimétrica obtidos a 0,05; 0,15 e 0,30 m de profundidade.

4.5. Tratamento estatístico

O modelo de ajuste selecionado para correlação entre a constante dielétrica e a umidade volumétrica do solo foi do tipo polinomial cúbico. Neste modelo, foi considerada como variável independente a constante dielétrica do solo e como dependente o conteúdo de água no solo.

Para o cálculo da constante dielétrica, utilizou-se a média do tempo de reflexão obtida nas três repetições realizadas com o sistema TDR desenvolvido para cada sonda em cada um dos 23 recipientes. Foi considerada, para o conteúdo de água em volume, a umidade média em volume para cada tipo de solo.

Os pares de dados relativos à constante dielétrica do solo, calculada com o tempo de reflexão t , e a sua umidade volumétrica, para cada tipo de sonda e solo, foram submetidos à análise de variância, pelo teste F, ao nível de 1% probabilidade. Os parâmetros estimados foram testados com a hipótese de nulidade para parâmetro igual a zero, pelo teste t de Student. Determinou-se também o coeficiente de determinação ajustado para as regressões obtidas. O software “GENES” (Genética Quantitativa e Estatística Experimental, versão 0.1.0) foi utilizado nessas análises.

A fim de verificar qual o melhor ajuste para o conjunto de dados observados, foi utilizado também o software “CurveExpert”, versão 1.2. Este programa tem a característica de testar diversos modelos de ajuste, indicando qual é o melhor.

Para comparar o sistema TDR desenvolvido com o TDR comercial, obteve-se, em uma mesma figura, as curvas de ajuste entre umidade fornecida pelo sistema TDR desenvolvido versus umidade real e umidade fornecida pelo TDR comercial versus a umidade real. Para melhor visualização dos resultados obtidos, foi inserida, na mesma figura, a curva que representaria a umidade real, numa relação 1:1.

O erro médio relativo entre as umidades fornecidas pelo sistema TDR desenvolvido e com o equipamento TDR comercial, em relação à umidade real, foi obtido com a média do somatório entre o módulo da diferença do valor real de umidade e o estimado, divididos pelo somatório do valor real de umidade, conforme a seguinte equação

$$e_{rm} = \frac{\sum_{i=1}^n |\theta_i - \theta e_i|}{\sum_{i=1}^n \theta_i} \times 100 \quad (4.15)$$

em que

e_{rm} = Erro médio relativo, %;

θ_i = umidade real do solo no recipiente i , $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; e

θe_i = umidade estimada do solo no recipiente i , $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Impedância das sondas

As impedâncias das hastes foram determinadas, e são encontradas no Quadro 5.1. Os valores encontrados estão de acordo com DALTON (1992), que demonstrou que o uso de um casador de impedâncias 1:4, nos valores de 50:200 Ω , forneceu resultados satisfatórios para as variações de impedância ocorridas nas hastes metálicas, na condição de solo úmido.

O casador de impedância de 75:300 Ω , mesmo não sendo o mais indicado para todas as umidades, é um componente indispensável para o funcionamento do sistema. Para a situação de solo saturado, ou próximo a essa situação, ocorreu uma maior atenuação do sinal, impedindo a análise do mesmo.

Quadro 5.1. Impedâncias correspondentes para diâmetros de hastes de 3,2 (d_1) e 6,5 mm (d_2), em função do comprimento da sonda e da constante dielétrica do solo, para uma separação entre as hastes de 0,05 m

θ	ka	z (d_1)	z (d_2)
$\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	decimal	Ω	Ω
0,444	30	75,4	59,9
0,400	25	82,6	65,6
0,345	20	92,4	73,3
0,276	15	106,6	84,7
0,188	10	130,6	103,7
0,080	5	184,7	146,7
0,055	4	206,5	164,0
0,030	3	238,5	189,4
0,003	2	292,1	231,9

5.2. Homogeneidade da umidade dos solos

O método utilizado para se ter a umidade do solo homogênea em todo o perfil mostrou-se eficiente, uma vez que ao longo do recipiente a umidade gravimétrica apresentou-se praticamente constante, variando menos de $0,01 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ para quase a totalidade dos recipientes, conforme Quadros 5.2 e 5.3, para os solos estudados. Obteve-se, também, uma distribuição de umidade uniformemente espaçada entre a umidade residual do solo seco ao ar e de saturação, como desejado. O recipiente número um apresentou a umidade do solo seco em estufa e os recipientes 22 e 23, a umidade de saturação.

Quadro 5.2. Umidade gravimétrica (g.g^{-1}) dentro dos recipientes utilizados para o solo Areia Quartzosa

Umidade Gravimétrica, g.g^{-1}						
Recipiente	Comprimento de sondas, m					
	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35
1	0,0021	0,0021	0,0017	0,0017	0,0020	0,0020
2	0,0106	0,0106	0,0099	0,0099	0,0096	0,0096
3	0,0133	0,0133	0,0134	0,0134	0,0135	0,0135
4	0,0255	0,0255	0,0251	0,0251	0,0251	0,0251
5	0,0308	0,0308	0,0313	0,0313	0,0310	0,0310
6	0,0376	0,0376	0,0379	0,0379	0,0384	0,0384
7	0,0487	0,0487	0,0497	0,0497	0,0503	0,0503
8	0,0543	0,0543	0,0530	0,0530	0,0538	0,0538
9	0,0650	0,0650	0,0633	0,0633	0,0635	0,0635
10	0,0687	0,0687	0,0690	0,0690	0,0694	0,0694
11	0,0781	0,0781	0,0785	0,0785	0,0783	0,0783
12	0,0895	0,0895	0,0891	0,0891	0,0894	0,0894
13	0,0871	0,0871	0,0881	0,0881	0,0877	0,0877
14	0,0946	0,0946	0,0942	0,0942	0,0936	0,0936
15	0,1040	0,1040	0,1031	0,1031	0,1024	0,1024
16	0,1062	0,1062	0,1068	0,1068	0,1068	0,1068
17	0,1093	0,1093	0,1107	0,1107	0,1124	0,1124
18	0,1198	0,1198	0,1197	0,1197	0,1200	0,1200
19	0,1187	0,1187	0,1201	0,1201	0,1214	0,1214
20	0,1563	0,1563	0,1588	0,1588	0,1620	0,1620
21	0,1353	0,1353	0,1352	0,1352	0,1361	0,1361
22	0,1563	0,1563	0,1588	0,1588	0,1620	0,1620
23	0,1783	0,1783	0,1833	0,1833	0,1915	0,1915

Quadro 5.3. Umidade gravimétrica (g.g^{-1}) dentro dos recipientes utilizados para o solo Latossolo Vermelho

Recipiente	Umidade Gravimétrica, g.g^{-1}					
	Comprimento de sondas, m					
	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35
1	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
2	0,0452	0,0452	0,0456	0,0456	0,0460	0,0460
3	0,0774	0,0774	0,0792	0,0792	0,0793	0,0793
4	0,0996	0,0996	0,0981	0,0981	0,0979	0,0979
5	0,1165	0,1165	0,1175	0,1175	0,1174	0,1174
6	0,1396	0,1396	0,1397	0,1397	0,1397	0,1397
7	0,1548	0,1548	0,1539	0,1539	0,1569	0,1569
8	0,1662	0,1662	0,1665	0,1665	0,1655	0,1655
9	0,1851	0,1851	0,1844	0,1844	0,1850	0,1850
10	0,2189	0,2189	0,2183	0,2183	0,2213	0,2213
11	0,2311	0,2311	0,2343	0,2343	0,2380	0,2380
12	0,2500	0,2500	0,2492	0,2492	0,2499	0,2499
13	0,2722	0,2722	0,2745	0,2745	0,2748	0,2748
14	0,2932	0,2932	0,2943	0,2943	0,2956	0,2956
15	0,3135	0,3135	0,3136	0,3136	0,3130	0,3130
16	0,3251	0,3251	0,3256	0,3256	0,3232	0,3232
17	0,3371	0,3371	0,3387	0,3387	0,3385	0,3385
18	0,3463	0,3463	0,3483	0,3483	0,3490	0,3490
19	0,3101	0,3101	0,3094	0,3094	0,3078	0,3078
20	0,3120	0,3120	0,3149	0,3149	0,3167	0,3167
21	0,3959	0,3959	0,3959	0,3959	0,3967	0,3967
22	0,3807	0,3807	0,3897	0,3897	0,4019	0,4019
23	0,3931	0,3931	0,3972	0,3972	0,4102	0,4102

Para a umidade em volume, a uniformidade ao longo dos recipientes seguiu o mesmo padrão para que a umidade obtida gravimetricamente. Entretanto, a umidade em volume não distribuiu-se uniformemente espaçada entre a umidade residual e a

saturação do solo. Tal fato é devido aos diferentes valores de densidade úmida, encontrados nos diversos recipientes. No Latossolo Vermelho ocorreu uma variação entre 1,0 e 1,47 g.cm⁻³, para o solo seco em estufa e saturado, respectivamente, e na Areia Quartzosa, uma variação de 1,04 a 1,55 g.cm⁻³. Nos Quadro 5.4 e 5.5 são apresentados os valores da umidade gravimétrica convertida em umidade volumétrica, de acordo com a respectiva densidade úmida, em cada recipiente.

Quadro 5.4. Umidade em volume ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) dentro dos recipientes, para o solo Areia Quartzosa e respectiva densidade úmida

Recipiente	Umidade em volume, $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$						Densidade úmida decimal
	Comprimento de sondas, m						
	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	
1	0,0026	0,0026	0,0022	0,0022	0,0025	0,0025	1,27
2	0,0135	0,0135	0,0127	0,0127	0,0122	0,0122	1,29
3	0,0168	0,0168	0,0170	0,0170	0,0171	0,0171	1,29
4	0,0304	0,0304	0,0299	0,0299	0,0299	0,0299	1,22
5	0,0378	0,0378	0,0384	0,0384	0,0380	0,0380	1,27
6	0,0437	0,0437	0,0440	0,0440	0,0446	0,0446	1,21
7	0,0536	0,0536	0,0546	0,0546	0,0552	0,0552	1,15
8	0,0584	0,0584	0,0572	0,0572	0,0579	0,0579	1,13
9	0,0688	0,0688	0,0672	0,0672	0,0674	0,0674	1,13
10	0,0717	0,0717	0,0719	0,0719	0,0723	0,0723	1,11
11	0,0792	0,0792	0,0796	0,0796	0,0794	0,0794	1,09
12	0,0878	0,0878	0,0874	0,0874	0,0877	0,0877	1,07
13	0,0901	0,0901	0,0910	0,0910	0,0907	0,0907	1,12
14	0,0946	0,0946	0,0942	0,0942	0,0936	0,0936	1,09
15	0,1005	0,1005	0,0997	0,0997	0,0991	0,0991	1,07
16	0,0994	0,0994	0,0999	0,0999	0,1000	0,1000	1,04
17	0,1082	0,1082	0,1095	0,1095	0,1110	0,1110	1,10
18	0,1171	0,1171	0,1170	0,1170	0,1172	0,1172	1,09
19	0,1131	0,1131	0,1143	0,1143	0,1153	0,1153	1,07
20	0,1213	0,1213	0,1231	0,1231	0,1246	0,1246	1,09
21	0,1286	0,1286	0,1285	0,1285	0,1293	0,1293	1,08
22	0,1428	0,1428	0,1448	0,1448	0,1473	0,1473	1,06
23	0,2340	0,2340	0,2395	0,2395	0,2485	0,2485	1,55

Quadro 5.5. Umidade em volume ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) dentro dos recipientes, para o solo Latossolo Vermelho e respectiva densidade úmida

Recipiente	Umidade em volume, $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$						Densidade úmida decimal
	Comprimento de sondas, m						
	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	
1	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	1,00
2	0,0455	0,0455	0,0459	0,0459	0,0462	0,0462	1,05
3	0,0783	0,0783	0,0799	0,0799	0,0800	0,0800	1,09
4	0,0995	0,0995	0,0981	0,0981	0,0979	0,0979	1,10
5	0,1189	0,1189	0,1198	0,1198	0,1197	0,1197	1,14
6	0,1392	0,1392	0,1393	0,1393	0,1393	0,1393	1,14
7	0,1511	0,1511	0,1503	0,1503	0,1529	0,1529	1,13
8	0,1590	0,1590	0,1593	0,1593	0,1584	0,1584	1,12
9	0,1743	0,1743	0,1737	0,1737	0,1742	0,1742	1,12
10	0,1892	0,1892	0,1888	0,1888	0,1909	0,1909	1,05
11	0,2011	0,2011	0,2034	0,2034	0,2060	0,2060	1,07
12	0,2138	0,2138	0,2133	0,2133	0,2137	0,2137	1,07
13	0,2350	0,2350	0,2365	0,2365	0,2367	0,2367	1,10
14	0,2431	0,2431	0,2438	0,2438	0,2446	0,2446	1,07
15	0,2610	0,2610	0,2611	0,2611	0,2607	0,2607	1,09
16	0,2669	0,2669	0,2671	0,2671	0,2657	0,2657	1,09
17	0,2710	0,2710	0,2719	0,2719	0,2718	0,2718	1,07
18	0,2834	0,2834	0,2846	0,2846	0,2851	0,2851	1,10
19	0,2694	0,2694	0,2689	0,2689	0,2679	0,2679	1,14
20	0,2854	0,2854	0,2874	0,2874	0,2886	0,2886	1,20
21	0,3547	0,3547	0,3547	0,3547	0,3552	0,3552	1,25
22	0,4057	0,4057	0,4126	0,4126	0,4218	0,4218	1,47
23	0,3944	0,3944	0,3973	0,3973	0,4066	0,4066	1,40

5.3. Tempo de reflexão

O máximo tempo de reflexão (ΔT_{\max}) teórica e o máximo tempo de reflexão real, encontrados para as doze sondas, são apresentados no Quadro 5.6.

Quadro 5.6. Máximo tempo de reflexão do pulso eletromagnético teórico e real para sondas com diâmetro d_1 de 3,2 mm e d_2 de 6,5 mm

L, m	ΔT_{\max} teórico, ns	ΔT_{\max} real d_1 , ns	ΔT_{\max} real d_2 , ns
0,10	5,30	4,72	4,64
0,15	7,94	5,30	5,82
0,20	10,59	9,93	7,97
0,25	13,24	12,66	12,60
0,30	15,89	13,36	13,74
0,35	18,54	14,98	15,39

Os limites para o início e o término da reflexão estão contidos nos Quadros 5.7 e 5.8, para as doze sondas.

Para as sondas de 0,30 e 0,35 m, nos dois diâmetros testados, observou-se que a atenuação do sinal continuava, após o intervalo determinado pela prática (ponto B), em uma segunda reflexão. Para estes comprimentos de sondas, ocorriam reflexões sucessivas, quando os solos encontravam-se saturados, sendo considerada para análise apenas a primeira reflexão. Para contornar este fenômeno, adotou-se como limite máximo para o tempo de reflexão, ou ponto B, o valor de 20,5 ns.

Quadro 5.7. Limites para o início (T_A) e o término (T_B) da reflexão do pulso eletromagnético para os solos Areia Quartzosa e Latossolo Vermelho, para sondas com diâmetro de hastes de 3,2 mm

L, m	Areia Quartzosa, d_1		Latossolo Vermelho, d_1	
	T_A , ns	T_B , ns	T_A , ns	T_B , ns
0,10	10,50	16,57	10,50	16,57
0,15	10,50	17,81	10,50	17,81
0,20	10,20	21,41	10,50	21,41
0,25	10,60	15,50	10,50	15,50
0,30	10,30	27,11	9,50	27,11
0,35	10,10	28,89	9,00	28,89

Quadro 5.8. Limites para o início (T_A) e o término (T_B) da reflexão do pulso eletromagnético para os solos Areia Quartzosa e Latossolo Vermelho, para sondas com diâmetro de hastes de 6,5 mm

L, m	Areia Quartzosa, d_2		Latossolo Vermelho, d_2	
	T_A , ns	T_B , ns	T_A , ns	T_B , ns
0,10	10,50	16,60	10,50	16,60
0,15	10,50	18,09	10,50	18,09
0,20	10,20	17,93	10,20	17,93
0,25	10,60	25,93	10,60	25,93
0,30	10,30	27,21	10,30	27,21
0,35	10,10	28,95	10,10	28,95

Foi observado que o ponto de mínima tensão (ponto B), dentro do intervalo selecionado entre os limites predeterminados por T_A e T_B , poderia repetir-se várias vezes. A conversão da imagem visualizada no osciloscópio em 2000 pares ordenados aumenta, em muito, a resolução da leitura do tempo (0,01 ns) e, por este motivo, podem ocorrer vários pontos (pares ordenados) para uma mesma tensão mínima.

Os Quadros 5.9 a 5.13 apresentam os valores da constante dielétrica, obtidos com as sondas de diâmetro de 3,2 e 6,5 mm, para solo Areia Quartzosa e Latossolo Vermelho, respectivamente. O recipiente número um apresenta os valores para o solo seco em estufa, e os recipientes 22 e 23 para o solo saturado.

Quadro 5.9. Constantes dielétricas obtidas com sondas de 3,2 mm de diâmetro, nos comprimentos 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30 e 0,35 m, no solo Areia Quartzosa

Recipiente	Constante dielétrica					
	ka ₁₀	ka ₁₅	ka ₂₀	ka ₂₅	ka ₃₀	ka ₃₅
1	5,90	5,38	4,67	3,35	3,74	3,81
2	6,46	4,76	5,35	3,43	3,85	3,85
3	6,76	5,80	6,00	3,86	4,22	4,18
4	7,73	5,77	6,31	4,22	4,09	4,27
5	7,38	5,84	6,35	4,38	4,57	4,54
6	7,92	5,71	6,67	4,04	4,43	4,35
7	7,47	5,68	6,13	4,25	4,69	4,33
8	7,90	5,48	6,36	4,11	4,48	4,60
9	9,23	6,86	7,32	4,76	5,07	4,98
10	9,08	7,14	7,45	5,33	5,39	5,10
11	8,72	6,49	6,83	5,00	5,06	5,17
12	9,20	7,79	7,65	5,33	5,34	5,16
13	10,40	7,73	8,08	5,69	5,79	5,67
14	10,50	7,64	7,97	5,69	5,80	5,43
15	12,06	8,43	8,48	5,80	5,92	5,75
16	10,61	6,98	7,39	5,29	5,53	5,17
17	9,35	7,36	7,46	5,50	5,72	5,41
18	9,53	7,53	7,67	5,55	5,65	5,87
19	8,61	7,86	7,91	5,56	5,66	5,50
20	13,65	10,01	8,64	7,11	6,62	6,68
21	13,67	10,05	10,33	6,88	6,68	6,73
22	13,09	10,49	12,46	7,37	7,12	6,87
23	15,60	13,86	14,74	8,28	8,07	7,74

Quadro 5.10. Constantes dielétricas obtidas com sondas de 6,5 mm de diâmetro, nos comprimentos 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30 e 0,35 m, no solo Areia Quartzosa

Recipiente	Constante dielétrica					
	ka ₁₀	ka ₁₅	ka ₂₀	ka ₂₅	ka ₃₀	ka ₃₅
1	7,45	4,91	5,56	4,08	4,04	4,36
2	8,15	5,71	6,03	3,82	4,18	4,00
3	10,64	6,86	6,41	4,50	4,61	4,50
4	7,98	6,33	6,95	4,76	4,63	4,48
5	10,16	7,51	7,54	5,18	5,02	4,81
6	10,89	7,77	7,20	5,23	5,00	4,90
7	9,41	7,47	6,85	4,79	5,03	4,77
8	9,66	6,86	7,47	4,94	5,14	4,84
9	11,02	8,03	7,89	5,31	5,49	5,06
10	11,56	8,28	8,64	6,17	5,53	5,43
11	10,92	7,97	8,11	5,76	5,44	5,20
12	11,65	8,76	8,64	6,03	5,80	5,58
13	12,29	8,73	8,94	6,74	6,24	5,58
14	14,16	9,53	9,23	6,38	6,21	5,88
15	13,27	10,22	9,20	6,09	6,01	5,68
16	11,68	8,82	8,25	6,11	5,73	5,19
17	11,44	10,15	8,81	6,07	5,97	5,67
18	12,87	9,19	8,63	6,05	6,01	5,78
19	12,55	9,96	9,17	6,31	5,92	5,62
20	15,27	10,05	10,54	7,30	6,90	6,82
21	16,42	12,53	11,21	7,60	7,17	6,98
22	16,32	13,18	12,15	8,24	7,86	7,90
23	24,45	15,92	13,97	8,99	8,22	8,81

Quadro 5.11. Constantes dielétricas obtidas com sondas de 3,2 mm de diâmetro, nos comprimentos 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30 e 0,35 m, no solo Latossolo Vermelho

Recipiente	Constante dielétrica					
	ka ₁₀	ka ₁₅	ka ₂₀	ka ₂₅	ka ₃₀	ka ₃₅
1	3,73	3,49	2,80	2,70	4,61	5,16
2	13,86	9,08	6,88	6,44	7,95	7,51
3	14,38	10,87	9,19	7,34	8,50	8,11
4	14,01	11,97	9,79	7,09	8,60	8,48
5	16,14	13,27	9,99	7,55	9,05	8,74
6	18,25	13,15	9,95	7,58	8,72	8,38
7	18,38	13,18	9,43	7,02	8,71	8,47
8	17,22	11,55	8,23	6,96	8,53	8,27
9	15,09	11,38	8,56	7,22	8,49	8,26
10	22,63	14,25	10,73	8,11	9,18	9,15
11	24,40	13,18	9,99	7,81	9,54	9,38
12	22,21	14,57	10,40	8,41	9,72	9,55
13	23,09	18,02	12,38	9,42	10,58	10,36
14	37,21	17,99	11,95	9,92	10,62	10,69
15	36,54	21,84	14,08	11,20	11,99	11,86
16	52,27	22,91	14,42	11,35	11,44	12,69
17	53,03	26,66	15,71	11,68	13,18	12,67
18	59,44	26,15	16,33	12,52	13,97	13,73
19	38,32	18,82	11,37	8,96	10,70	10,47
20	49,95	23,23	13,96	10,46	11,99	13,43
21	50,59	29,29	22,01	12,77	17,86	16,61
22	64,96	30,40	25,34	24,84	24,34	20,77
23	60,84	31,06	21,31	18,32	24,37	20,79

Quadro 5.12. Constantes dielétricas obtidas com sondas de 6,5 mm de diâmetro, nos comprimentos 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30 e 0,35 m, no solo Latossolo Vermelho

Recipiente	Constante dielétrica					
	ka ₁₀	ka ₁₅	ka ₂₀	ka ₂₅	ka ₃₀	ka ₃₅
1	2,48	2,08	3,45	4,73	4,97	6,48
2	13,40	10,63	9,37	7,47	8,58	9,29
3	17,58	14,71	10,75	7,75	8,99	9,82
4	13,25	13,84	10,95	7,76	9,22	9,88
5	18,49	14,80	10,67	8,36	8,96	9,72
6	17,49	14,95	10,92	8,18	9,43	10,08
7	23,57	14,36	11,67	8,30	9,63	9,91
8	23,38	14,35	9,93	7,82	9,35	10,03
9	19,58	14,14	10,25	8,08	9,20	10,08
10	28,84	16,97	11,95	7,86	9,80	10,48
11	31,05	17,74	13,48	7,73	10,03	10,92
12	29,84	17,96	12,45	9,51	10,49	11,08
13	31,70	18,65	13,30	9,89	11,12	11,94
14	39,91	19,68	13,70	9,83	11,30	12,11
15	39,85	19,91	14,58	10,19	12,68	13,80
16	41,47	21,18	16,22	11,39	12,22	14,02
17	45,02	21,73	16,43	11,73	13,99	13,93
18	50,48	22,39	17,21	12,03	14,21	15,60
19	33,90	16,78	12,66	9,10	10,84	12,02
20	40,10	19,77	14,92	10,36	12,35	14,44
21	50,13	24,26	21,37	18,71	17,94	19,34
22	52,89	25,37	26,39	22,18	24,04	21,15
23	56,93	26,68	19,67	19,04	22,59	21,80

Os valores da constante dielétrica estimados apresentaram-se com uma variabilidade elevada, quando se observa um mesmo recipiente. As Figuras 5.1 a 5.4 permitem a visualização dos valores da constante dielétrica do solo contido nos

recipientes, para sondas com diâmetros de hastes de 3,2 e 6,5 mm, obtidos com os solos Areia Quartzosa e Latossolo Vermelho, respectivamente.

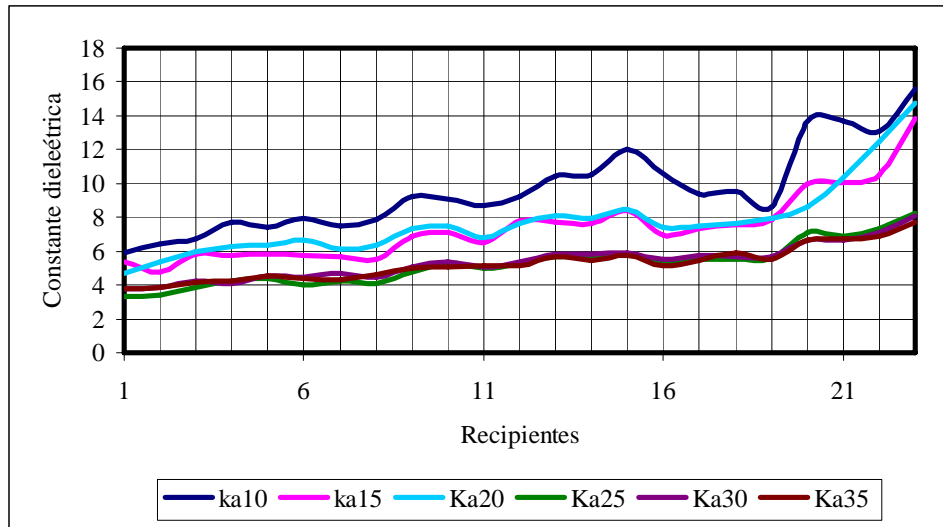


Figura 5.1. Constante dielétrica obtida com sondas de diâmetros de hastes de 3,2 mm nos recipientes contendo solo Areia Quartzosa.

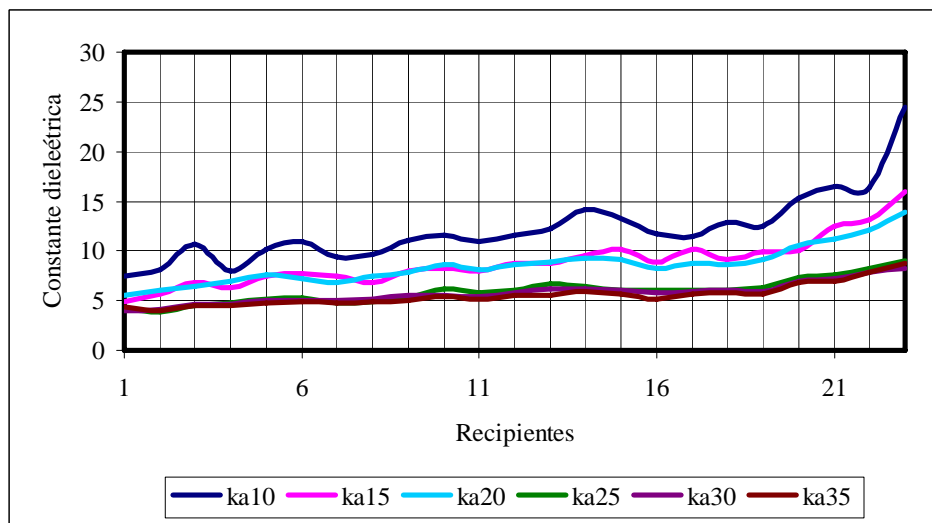


Figura 5.2. Constante dielétrica obtida com sondas de diâmetros de hastes de 6,5 mm nos recipientes contendo solo Areia Quartzosa.

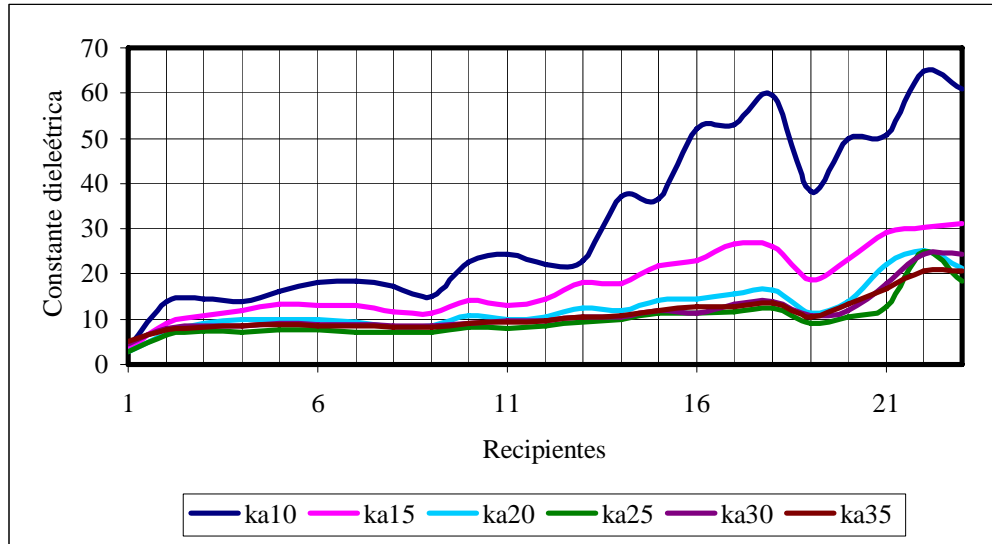


Figura 5.3. Constante dielétrica obtida com sondas de diâmetros de hastes de 3,2 mm nos recipientes contendo solo Latossolo Vermelho.

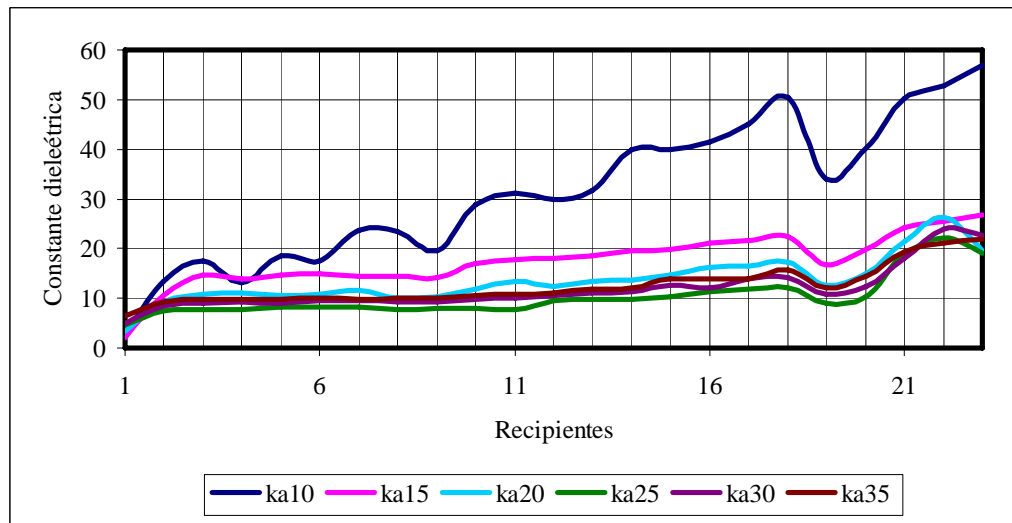


Figura 5.4. Constante dielétrica obtida com sondas de diâmetros de hastes de 6,5 mm nos recipientes contendo solo Latossolo Vermelho.

Observa-se que as constantes dielétricas obtidas com a sonda de 0,10 m de comprimento, nos dois diâmetros de hastes, apresentaram maior variabilidade em relação àquelas demais sondas, em ambos os solo.

Dentro de um mesmo recipiente, observa-se que o comportamento dos valores da constante dielétrica tende a ser uniforme. Quando ocorre um decréscimo, ou acréscimo, no valor desta, obtido com uma sonda qualquer, ocorre também o

decréscimo ou acréscimo nos valores de constante dielétrica das demais sondas, independentemente do solo e diâmetro de hastes.

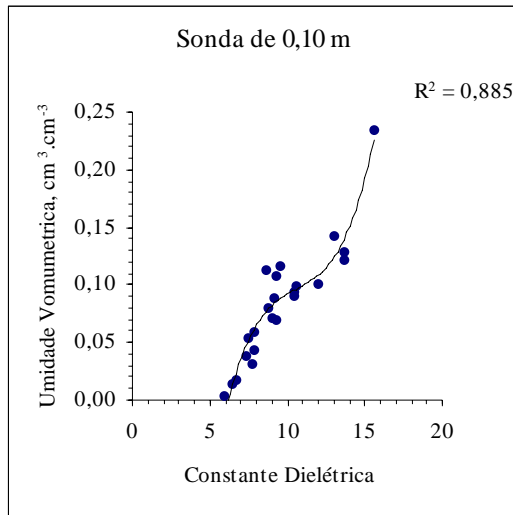
Para o solo Areia Quartzosa e as sondas de 0,15 e 0,20 m em ambos diâmetros de hastes, obtiveram-se valores de constante dielétrica próximos para um mesmo recipiente. O mesmo comportamento é verificado para as sondas de 0,25; 0,30 e 0,35 m.

Para o solo Latossolo Vermelho, com as sondas de 0,25; 0,30 e 0,35 m obtiveram-se valores de constante dielétrica próximos, para um mesmo recipiente.

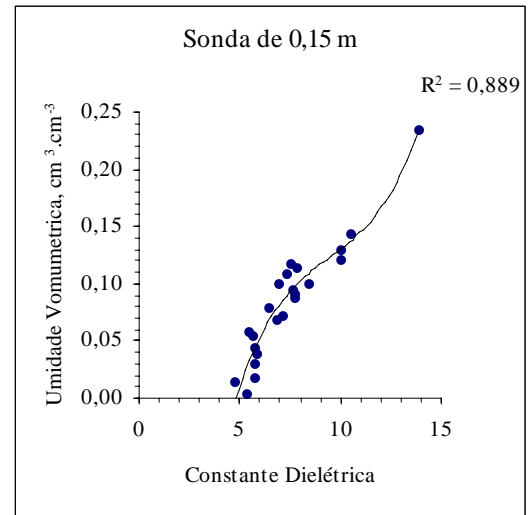
5.4. Relação entre constante dielétrica e umidade volumétrica do solo

De posse dos valores da umidade volumétrica e constante dielétrica do solo, obteve-se a curva de calibração para os diversos tipos de sondas, nos dois solos estudados.

O modelo polinomial cúbico, proposto para a calibração do sistema, tem sido utilizado por diversos autores que realizam seus trabalhos com os testadores de cabos. Este modelo de calibração relaciona uma variável dependente com outra independente, ajustando-se bem ao intervalo observado. As Figuras 5.5 a 5.7 apresentam a umidade volumétrica em função da constante dielétrica aparente para o solo Areia Quartzosa, para sondas com os comprimentos de 0,10 e 0,15, 0,20 e 0,25, 0,30 e 0,35 m, respectivamente, com diâmetro de haste de 3,2 mm.

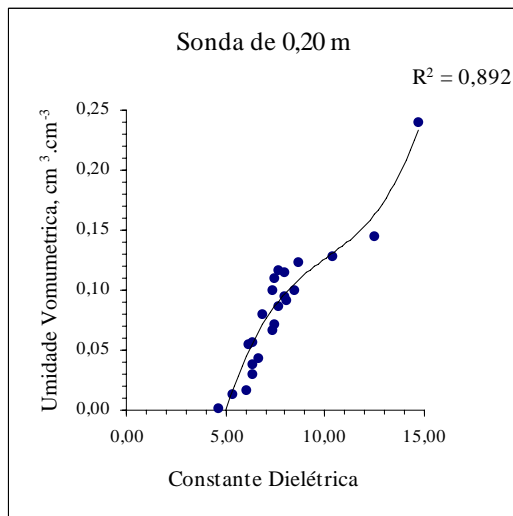


(a)

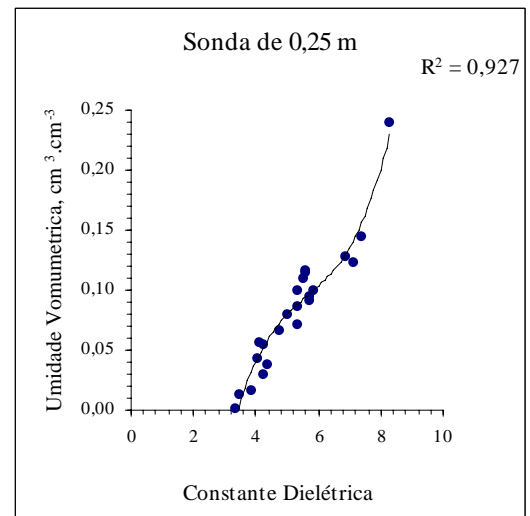


(b)

Figura 5.5. Umidade volumétrica em função da constante dielétrica do solo Areia Quartzosa para sondas de 0,10 (a) e 0,15 m (b) de comprimento com diâmetros de hastes de 3,2 mm .

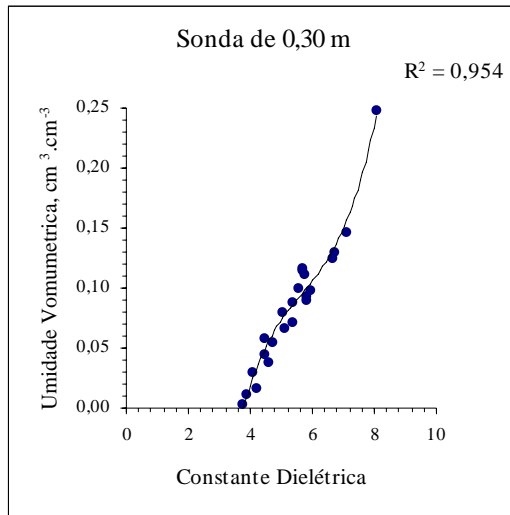


(a)

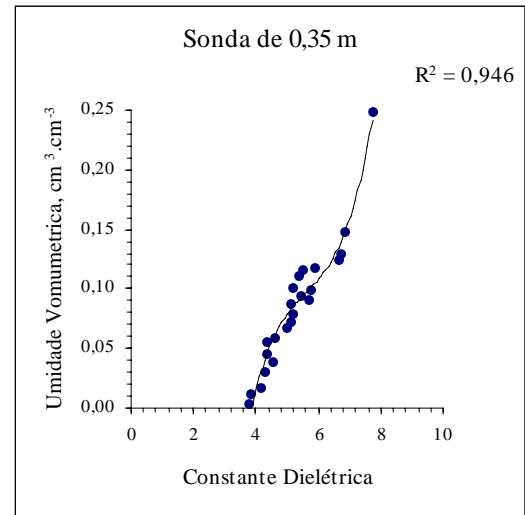


(b)

Figura 5.6. Umidade volumétrica em função da constante dielétrica do solo Areia Quartzosa para sondas de 0,20 (a) e 0,25 m (b) de comprimento com diâmetros de hastes de 3,2 mm.



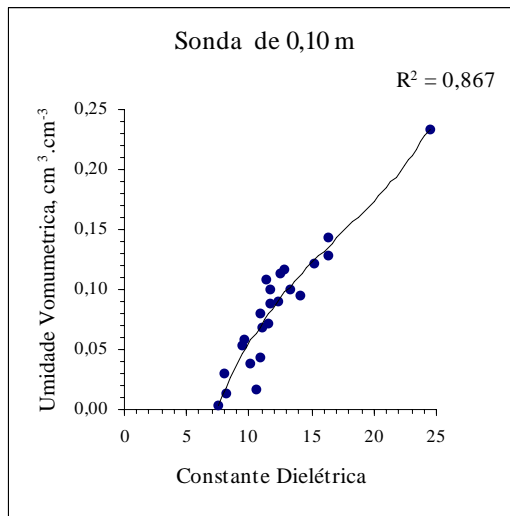
(a)



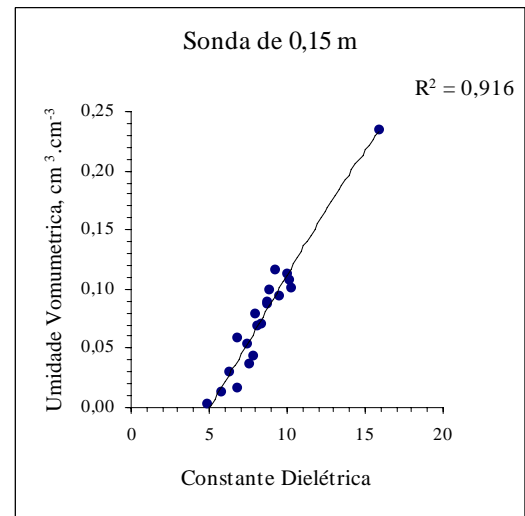
(b)

Figura 5.7. Umidade volumétrica em função da constante dielétrica do solo Areia Quartzosa para sondas de 0,30 (a) e 0,35 m (b) de comprimento com diâmetros de hastes de 3,2 mm.

As Figuras 5.8 a 5.10 apresentam os resultados encontrados, para o solo Areia Quartzosa, com sondas de idênticos comprimentos, para o diâmetro de hastes de 6,5 mm.

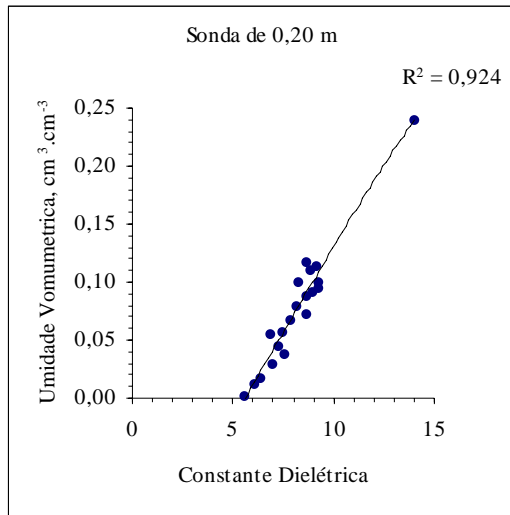


(a)

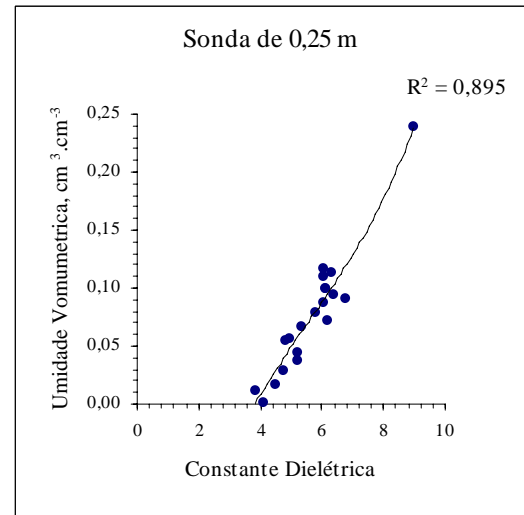


(b)

Figura 5.8. Umidade volumétrica em função da constante dielétrica do solo Areia Quartzosa para sondas de 0,10 (a) e 0,15 m (b) de comprimento com diâmetros de hastes de 6,5 mm.

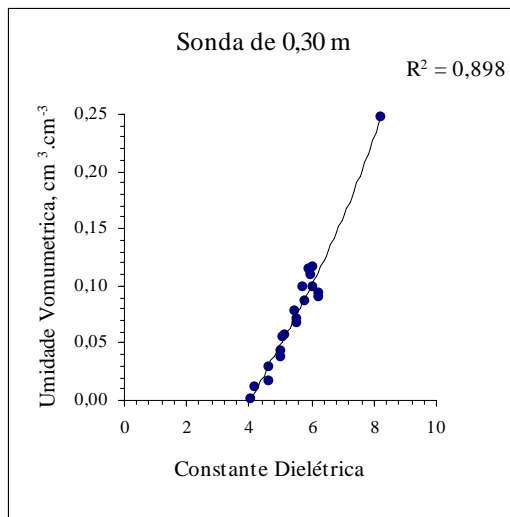


(a)

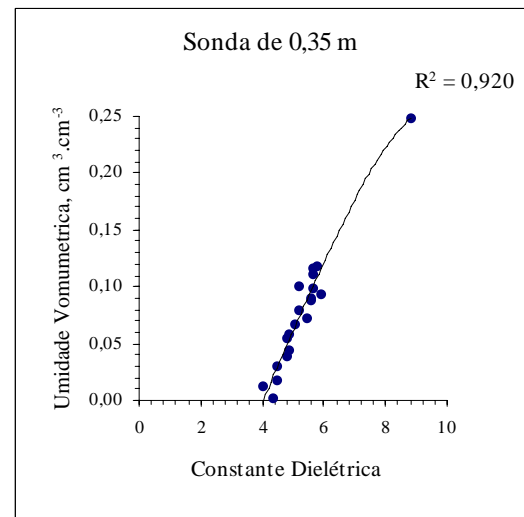


(b)

Figura 5.9. Umidade volumétrica em função da constante dielétrica do solo Areia Quartzosa para sondas de 0,20 (a) e 0,25 m (b) de comprimento com diâmetros de hastes de 6,5 mm



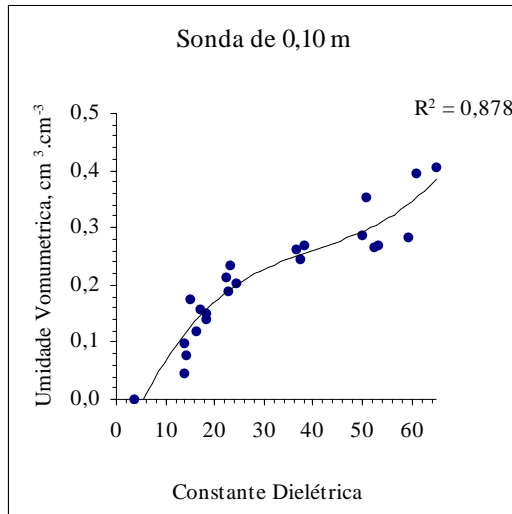
(a)



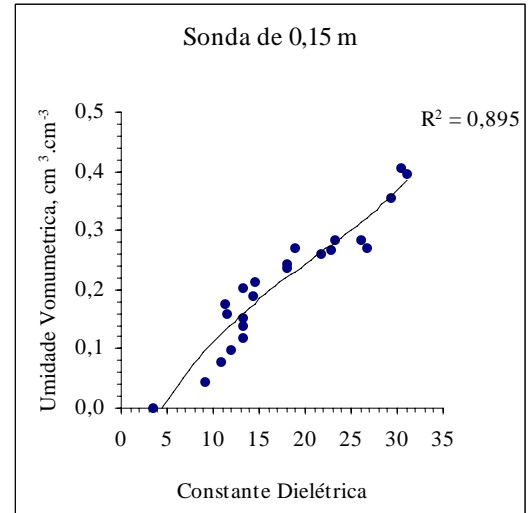
(b)

Figura 5.10. Umidade volumétrica em função da constante dielétrica do solo Areia Quartzosa para sondas de 0,30 (a) e 0,35 m (b) de comprimento com diâmetros de hastes de 6,5 mm

As Figuras 5.11 a 5.13 apresentam os resultados encontrados, para o solo Latossolo Vermelho, com sondas de idênticos comprimentos, para o diâmetro de hastes de 3,2 mm.

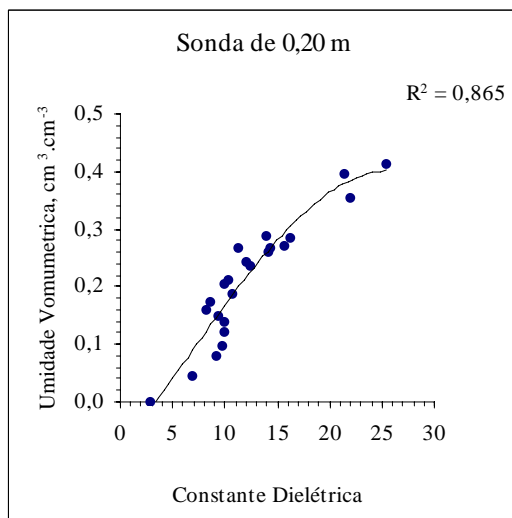


(a)

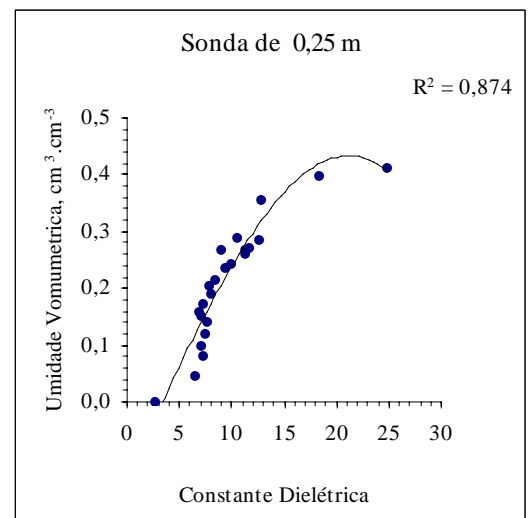


(b)

Figura 5.11. Umidade volumétrica em função da constante dielétrica do solo Latossolo Vermelho para sondas de 0,10 (a) e 0,15 m (b) de comprimento com diâmetros de hastes de 3,2 mm.

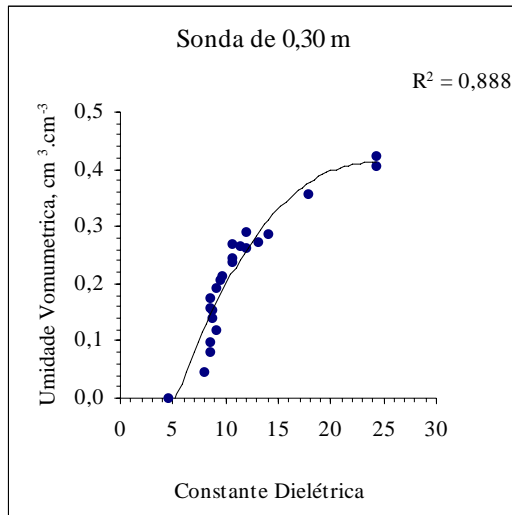


(a)

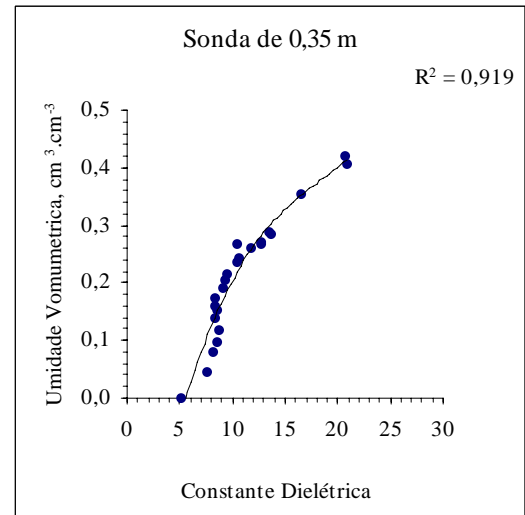


(b)

Figura 5.12. Umidade volumétrica em função da constante dielétrica do solo Latossolo Vermelho para sondas de 0,20 (a) e 0,25 m (b) de comprimento com diâmetros de hastes de 3,2 mm.



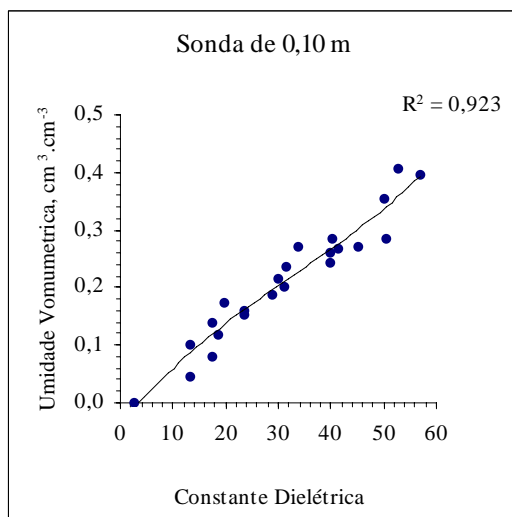
(a)



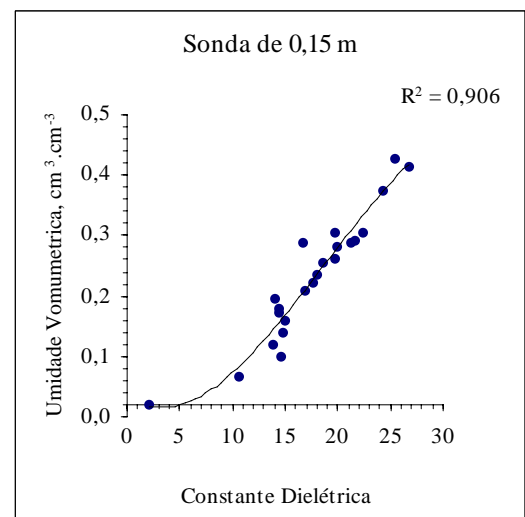
(b)

Figura 5.13. Umidade volumétrica em função da constante dielétrica do solo Latossolo Vermelho para sondas de 0,30 (a) e 0,35 m (b) de comprimento com diâmetros de hastes de 3,2 mm.

As Figuras 5.14 a 5.16 apresentam os resultados encontrados para o solo Latossolo Vermelho, com sondas de idênticos comprimentos para o diâmetro de hastes de 6,5 mm.

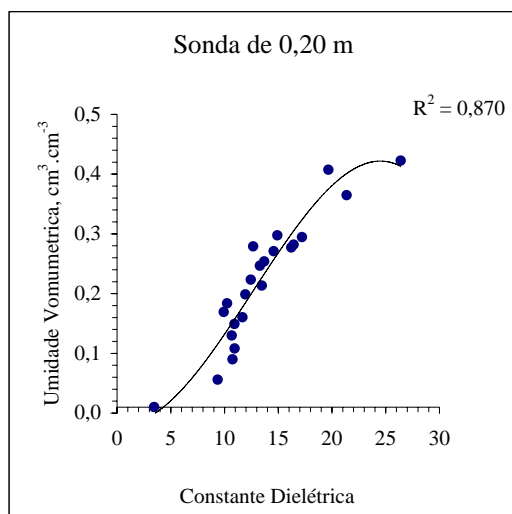


(a)

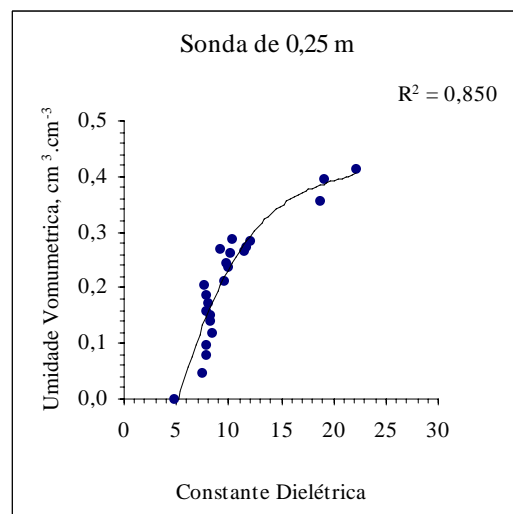


(b)

Figura 5.14. Umidade volumétrica em função da constante dielétrica do solo Latossolo Vermelho para sondas de 0,10 (a) e 0,15 m (b) de comprimento com diâmetros de hastes de 6,5 mm.

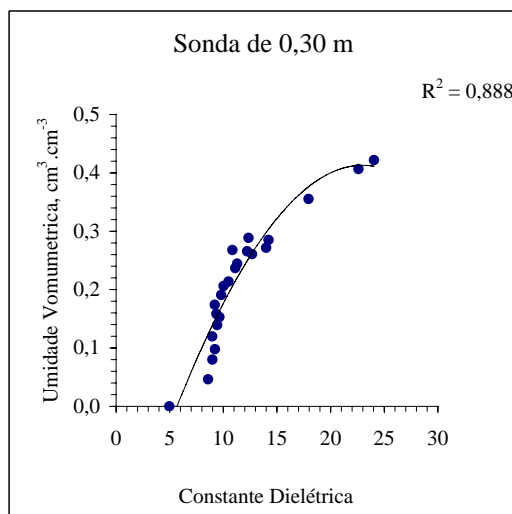


(a)

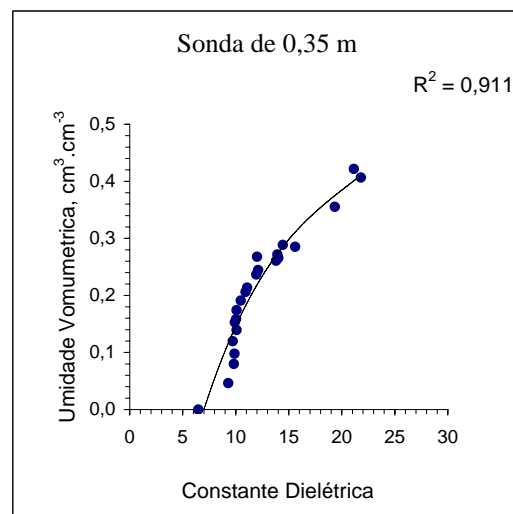


(b)

Figura 5.15. Umidade volumétrica em função da constante dielétrica do solo Latossolo Vermelho para sondas de 0,20 (a) e 0,25 m (b) de comprimento com diâmetros de hastes de 6,5 mm.



(a)



(b)

Figura 5.16. Umidade volumétrica em função da constante dielétrica do solo Latossolo Vermelho para sondas de 0,30 (a) e 0,35 m (b) de comprimento com diâmetros de hastes de 6,5 mm

A dispersão em torno das curvas ajustadas pode ter ocorrido em razão de características não uniformes do solo, tais como densidade, compactação, ou porosidade.

A variação da densidade úmida de 1,0 a 1,47 para o solo Latossolo Vermelho e de 1,04 a 1,55 para o solo Areia Quartzosa, revela-se como sendo a maior responsável pela dispersão ocorrida em torno das curvas ajustadas. Uma vez que os dois tipos de solos estudados foram depositados uniformemente dentro dos recipientes, pode-se inferir que a compactação seja uniforme (ou tende a ser) para os diversos recipientes, embora este aspecto não tenha sido avaliado. Da mesma forma, pode-se inferir para a porosidade do solo.

5.4.1. Análise estatística

A análise estatística foi realizada com a finalidade de avaliar a consistência dos dados com o software “GENES” (Genética Quantitativa e Estatística Experimental), versão 1.0.

A análise dos dados indicou que todos os modelos encontrados apresentaram níveis de significância, pelo teste F, superiores a 0,99 de probabilidade. Os Quadros 5.13 a 5.16 apresentam o resumo das análises de variância das regressões, contendo o coeficiente de determinação ajustado, os parâmetros estimados e os valores dos testes t das estimativas dos parâmetros, para os solos Areia Quartzosa e Latossolo Vermelho, com diâmetros de hastes de 3,2 e 6,5 mm, respectivamente. Estes quadros também apresentam os resultados encontrados para uma curva geral, com todos os comprimentos de sondas, de um dado diâmetro para um dado solo, denominados Td_{1AQ} , Td_{2AQ} , Td_{1LV} e Td_{2LV} .

Quadro 5.13. Resumo das análises de variância das regressões entre a constante dielétrica e a umidade volumétrica para o solo Areia Quartzosa, sondas com diâmetros de hastes de 3,2 mm

Comprimento da sonda, m	R ² aj	Parâmetros estimados				Prob>T			
		a	ka	ka ²	ka ³	a	Ka	ka ²	ka ³
0,10	0,885	-0,8995	0,2677	-0,02456	0,000771	0,0004	0,0004	0,0008	0,0008
0,15	0,899	-0,5263	0,1804	-0,01773	0,000626	0,0046	0,0065	0,0165	0,0190
0,20	0,892	-0,5226	0,1687	-0,01551	0,000511	0,0019	0,0036	0,0129	0,0187
0,25	0,927	-0,7767	0,4189	-0,07024	0,004146	0,0014	0,0020	0,0035	0,0032
0,30	0,954	-1,0654	0,5509	-0,09146	0,005365	0,0009	0,0014	0,0022	0,0017
0,35	0,946	-1,6703	0,8916	-0,15412	0,009154	0,0002	0,0002	0,0004	0,0003
Td _{1AQ}	0,455	-0,2838	0,1224	-0,01305	0,000474	0,0002	0,0000	0,0003	0,0004

Quadro 5.14. Resumo das análises de variância das regressões entre a constante dielétrica e a umidade volumétrica para o solo Areia Quartzosa, sondas com diâmetros de hastes de 6,5 mm

Comprimento da sonda, m	R ² aj	Parâmetros estimados				Prob>T			
		a	ka	ka ²	ka ³	a	ka	ka ²	ka ³
0,10	0,867	-0,2603	0,05029	-0,002322	0,0000446	0,0900	0,1360	0,3196	0,6270
0,15	0,916	-0,3014	0,08727	-0,006830	0,0002156	0,0141	0,0251	0,0788	0,0859
0,20	0,924	-0,6907	0,21272	-0,020157	0,0006917	0,0037	0,0065	0,0142	0,0148
0,25	0,895	-0,7249	0,34192	-0,050876	0,0027353	0,0263	0,0355	0,0517	0,0466
0,30	0,898	-1,2199	0,58899	-0,092251	0,0050965	0,0289	0,0397	0,0542	0,0526
0,35	0,920	-1,4412	0,67971	-0,102002	0,0052790	0,0006	0,0011	0,0021	0,0024
Td _{2AQ}	0,314	-0,0892	0,04042	-0,002741	0,0000675	0,0599	0,0053	0,0291	0,0351

Quadro 5.15. Resumo das análises de variância das regressões entre a constante dielétrica e a umidade volumétrica para o solo Latossolo Vermelho, sondas com diâmetros de hastes de 3,2 mm

Comprimento da sonda, m	R ² aj	Parâmetros estimados				Prob>T			
		a	ka	ka ²	ka ³	a	ka	ka ²	ka ³
0,10	0,878	-0,1046	0,02119	-0,000446	0,00000365	0,0446	0,0007	0,0133	0,0296
0,15	0,895	-0,1205	0,03105	-0,000945	0,00001511	0,0780	0,0244	0,2486	0,3312
0,20	0,865	-0,0829	0,02340	0,000386	-0,0000219	0,2869	0,2317	0,7967	0,5597
0,25	0,874	-0,1359	0,04084	-0,000050	-0,0000287	0,0893	0,0617	0,9754	0,5173
0,30	0,888	-0,3158	0,07033	-0,002064	0,00001654	0,0260	0,0403	0,5800	0,7724
0,35	0,919	-0,4677	0,10950	-0,005154	0,00009261	0,0098	0,0174	0,1484	0,3030
Td _{1LV}	0,549	-0,1013	0,03763	-0,001073	0,00000947	0,0020	0,0000	0,0000	0,0000

Quadro 5.16. Resumo das análises de variância das regressões entre a constante dielétrica e a umidade volumétrica para o solo Latossolo Vermelho, sondas com diâmetros de hastes de 6,5 mm

Comprimento da sonda, m	R ² aj	Parâmetros estimados				Prob>T			
		a	ka	ka ²	ka ³	a	ka	ka ²	ka ³
0,10	0,923	-0,03837	0,01115	-0,000149	0,0000015	0,3027	0,0179	0,6369	0,6029
0,15	0,906	0,01123	-0,01039	0,001769	-0,0000313	0,8200	0,5299	0,1220	0,2263
0,20	0,870	-0,02728	-0,00295	0,002434	-0,0000646	0,7487	0,8768	0,1058	0,0588
0,25	0,850	-0,45005	0,11076	-0,005057	0,0000812	0,0141	0,0192	0,1745	0,6064
0,30	0,888	-0,29931	0,05915	-0,001101	-0,0000054	0,0519	0,1043	0,6866	0,9295
0,35	0,911	-0,57953	0,11203	-0,004697	0,0000753	0,0270	0,0611	0,2827	0,5330
Td _{2LV}	0,490	-0,13639	0,04212	-0,001330	0,0000134	0,0009	0,0000	0,0000	0,0000

Para o solo Areia Quartzosa e sondas com diâmetros de hastes de 3,2 mm, verifica-se que o melhor ajuste ocorreu para a sonda com 0,30 m de comprimento de haste, sonda de 0,35 m. Para este conjunto de sondas, os testes de hipóteses das estimativas dos parâmetros sugerem que os termos independentes, os coeficiente lineares, quadráticos e cúbicos têm uma probabilidade menor que 1,9% de serem nulos, ou seja, de não afetarem na média da resposta para o termo dependente.

Para o solo Areia Quartzosa e sondas com diâmetros de hastes de 6,5 mm, verifica-se que o melhor ajuste ocorreu com a sonda de 0,20 m, seguindo-se a sonda de 0,35 m. Para este conjunto de sondas, os testes de hipóteses das estimativas dos parâmetros sugerem que o coeficiente cúbico, para a sonda de 0,10 m, tem uma probabilidade maior que 62,7% de ser nulo, ou seja, de não afetar a resposta para a variável dependente. Este fato indica que o modelo polinomial cúbico pode não ser o melhor ajuste para os dados observados.

Para o solo Latossolo Vermelho e sondas com diâmetro de hastes de 3,2 mm, verifica-se que o melhor ajuste ocorreu com a sonda de comprimento 0,35 m, seguindo-se a sonda de 0,15 m. Para este conjunto de sondas, os testes de hipóteses das estimativas dos parâmetros sugerem que os coeficientes quadráticos, para sondas de 0,20 e 0,25 m e o coeficiente cúbico, para a sonda de 0,30 m, tem probabilidades maiores que 79,6%, 97,5% e 77,2% de serem nulos, respectivamente. Estes fatos

levam ao questionamento sobre o uso do modelo polinomial cúbico para relacionar a constante dielétrica com a umidade volumétrica.

Para o solo Latossolo Vermelho e sondas com diâmetro de hastes de 6,5 mm, verifica-se que o melhor ajuste ocorreu para a sonda de 0,10 m, seguindo-se a sonda de 0,35 m. Para este conjunto de sondas, os testes de hipótese das estimativas dos parâmetros sugerem que o termo independente e o coeficiente linear, para sonda de 0,20 (maiores que 74,8 e 87,6%) e coeficientes quadrático e cúbico, para as sondas de 0,10 (maiores que 63,6 e 60,2%) e 0,30 m (maiores que 68,6 e 92,9%), e o coeficiente cúbico, para a sonda de 0,25 m (maiores que 60,6%) sejam nulos, respectivamente.

Os modelos gerais, para todas sondas e solos estudados, mostraram-se ineficientes, isto é, coeficientes de determinação menores que 55%, na determinação da variável dependente, ou seja, da umidade do solo, sendo preferível utilizar o modelo específico para cada sonda, em cada tipo de solo. As sondas de diferentes diâmetros apresentaram coeficientes de determinação similares

Para o solo Areia Quartzosa, o programa CurveExpert 1.21 apresentou o modelo polinomial cúbico como o de melhor ajuste, quando se correlacionam dados oriundos de uma sonda isoladamente. Para o modelo geral, com todas as sondas de diâmetro de 3,2 mm (Td_{1AQ}), o melhor ajuste foi obtido com o modelo polinomial cúbico.

Para o modelo geral, com todas as sondas de diâmetro de 6,52 mm, no solo Areia Quartzosa (Td_{2AQ}), e para todos os modelos gerados no solo Latossolo Vermelho, o software CurveExpert apresentou modelos alternativos para a correlação entre a constante dielétrica e a umidade volumétrica do solo. Estes modelos possuem coeficientes de determinação na ordem de 1 a 3% superiores aos dos modelos polinomiais cúbicos. Devido à complexidade dos modelos sugeridos, a opinião dos autores é que o uso do modelo polinomial cúbico seja preferível para correlação entre constante dielétrica e umidade volumétrica.

5.5. Comparação entre sistema TDR desenvolvido e TDR comercial

Os Quadros 5.17 e 5.18 apresentam os valores médios da umidade gravimétrica, da densidade úmida e da umidade volumétrica para cada recipiente, nos dois tipos de solos estudados, respectivamente.

Quadro 5.17. Umidades gravimétrica e volumétrica do solo Areia Quartzosa, determinadas com sondas de 0,15 e 0,30 m, com diâmetros de hastes de 6,5 mm e densidade úmida do solo nas colunas

Recipiente	Umidade gravimétrica, g.g^{-1}		Umid. volumétrica, $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$		ρ_u decimal
	L = 0,15 m	L = 0,30 m	L = 0,15 m	L = 0,30 m	
1	0,029	0,030	0,036	0,036	1,26
2	0,041	0,040	0,047	0,046	1,20
3	0,042	0,040	0,048	0,046	1,19
4	0,052	0,051	0,056	0,055	1,13
5	0,055	0,053	0,058	0,057	1,12
6	0,060	0,060	0,064	0,063	1,13
7	0,068	0,067	0,071	0,070	1,11
8	0,076	0,076	0,077	0,078	1,09
9	0,090	0,091	0,088	0,089	1,07
10	0,084	0,084	0,088	0,087	1,12
11	0,092	0,092	0,092	0,092	1,09
12	0,093	0,094	0,090	0,091	1,06
13	0,105	0,104	0,098	0,097	1,03
14	0,107	0,108	0,105	0,106	1,09
15	0,116	0,118	0,113	0,114	1,08
16	0,123	0,125	0,116	0,117	1,06

Quadro 5.18. Umidades gravimétrica e volumétrica do solo Latossolo Vermelho, determinados com sondas de 0,15 e 0,30 m, com diâmetros de hastes de 6,5 mm e densidade úmida do solo nas colunas

Recipiente	Umidade gravimétrica, g.g ⁻¹		Umid. Volumétrica, cm ³ .cm ⁻³		ρ _u decimal
	L = 0,15 m	L = 0,30 m	L = 0,15 m	L = 0,30 m	
1	0,1954	0,1955	0,1717	0,1718	1,05
2	0,2224	0,2250	0,1896	0,1914	1,04
3	0,2390	0,2382	0,2038	0,2033	1,06
4	0,2496	0,2537	0,2090	0,2117	1,05
5	0,2773	0,2803	0,2331	0,2351	1,07
6	0,2922	0,2937	0,2358	0,2367	1,04
7	0,2968	0,2969	0,2424	0,2424	1,06
8	0,3059	0,3060	0,2516	0,2517	1,07
9	0,3180	0,3200	0,2636	0,2648	1,09

Os Quadros 5.19 e 5.20 apresentam os valores obtidos para a constante dielétrica com o TDR comercial, estimada com o sistema TDR desenvolvido para os solos Areia Quartzosa e Latossolo Vermelho, respectivamente. As Figuras 5.17 e 5.18 apresentam graficamente os mesmos valores.

Quadro 5.19. Constante dielétrica obtida com o TDR comercial e estimada com o sistema TDR desenvolvido, com sondas de 0,15 e 0,30 m e diâmetro de hastes de 6,5 mm, do solo Areia Quartzosa

Constante dielétrica				
Recipiente	ka ₁₅		ka ₃₀	
	TDR comercial	Sistema TDR	TDR comercial	Sistema TDR
1	3,43	7,90	3,20	4,97
2	3,47	7,52	3,30	4,93
3	3,43	7,54	3,33	5,26
4	3,50	7,04	3,33	5,15
5	3,50	7,03	3,43	5,07
6	3,77	7,43	3,53	5,35
7	3,80	7,61	3,40	5,59
8	3,83	8,28	3,80	5,66
9	3,97	8,61	3,90	5,68
10	4,23	9,82	4,00	5,61
11	4,27	9,87	4,07	5,80
12	4,20	9,87	4,13	5,88
13	4,17	8,93	4,17	5,91
14	4,87	10,17	4,47	6,10
15	4,87	8,33	4,60	6,24
16	4,93	10,81	4,67	6,51

Quadro 5.20. Constante dielétrica obtida com o TDR comercial e estimada com o sistema TDR desenvolvido, com sondas de 0,15 e 0,30 m e diâmetro de hastes de 6,5 mm, do solo Latossolo Vermelho

Constante dielétrica				
Recipiente	ka ₁₅		ka ₃₀	
	TDR comercial	Sistema TDR	TDR comercial	Sistema TDR
1	5,70	16,32	4,90	10,70
2	5,80	16,71	4,97	10,27
3	5,87	16,92	4,97	10,57
4	5,97	17,64	5,00	10,25
5	6,13	17,79	5,27	11,01
6	6,47	21,39	5,83	12,15
7	8,53	19,24	7,03	12,41
8	7,57	20,28	6,50	12,56
9	8,17	18,66	6,40	12,87

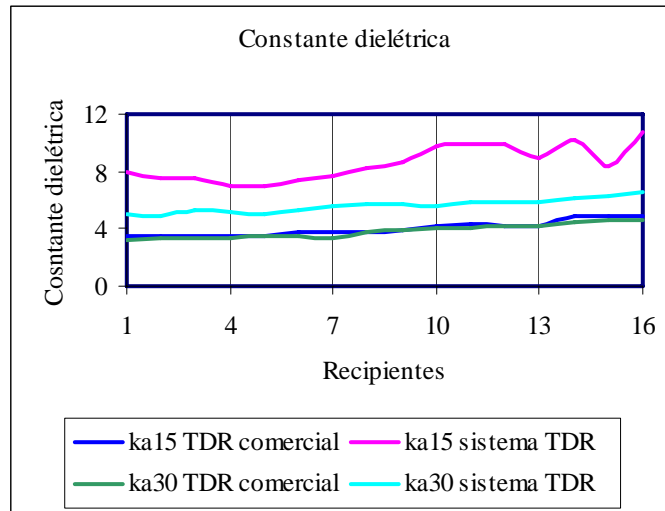


Figura 5.17. Constante dielétrica obtida com o TDR comercial e estimada com o sistema TDR desenvolvido, com sondas de 0,15 e 0,30 m e diâmetro de hastes de 6,5 mm, do solo Areia Quartzosa.

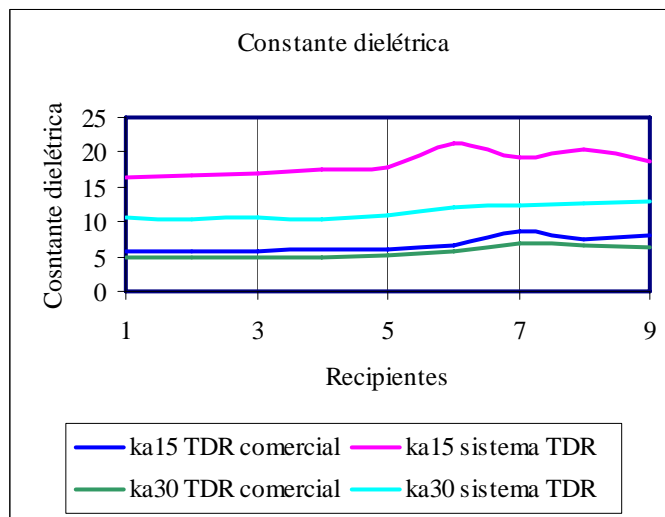


Figura 5.18. Constante dielétrica obtida com o TDR comercial e o sistema TDR desenvolvido, com sondas de 0,15 e 0,30 m e diâmetro de hastes de 6,5 mm, do solo Latossolo Vermelho.

Foram correlacionadas a umidade, em volume, determinada pelo sistema TDR desenvolvido, e a estimada pelo TDR comercial, em relação à umidade volumétrica determinada pelo método padrão. As Figuras 5.19 a 5.22 apresentam as curvas geradas para o conjunto de dados das sondas de 0,15 e 0,30 m (diâmetro de hastes de 6,5 mm), para os solos Areia Quartzosa e Latossolo Vermelho, respectivamente.

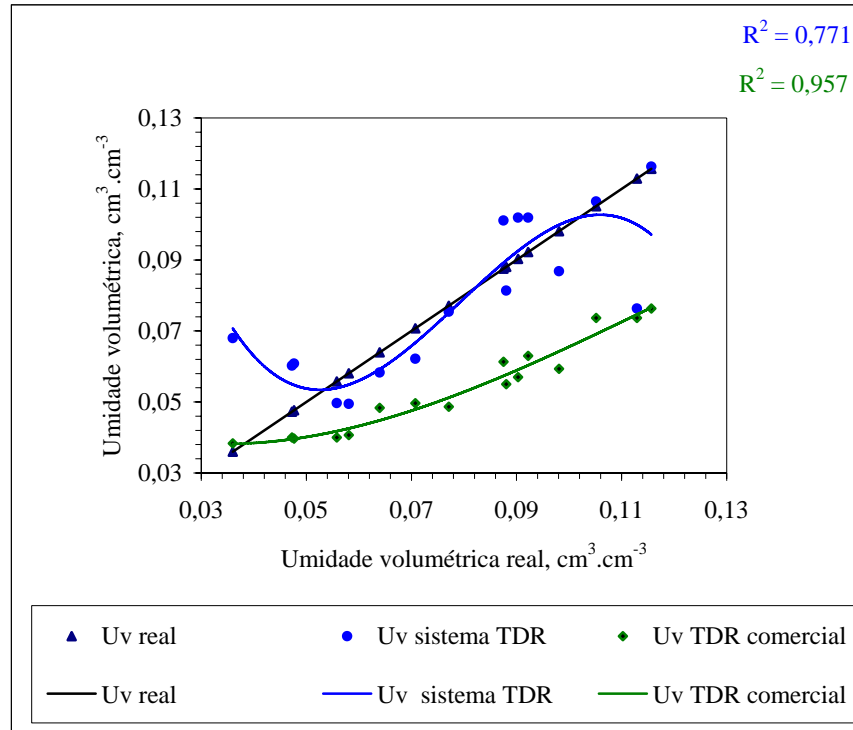


Figura 5.19. Umidade volumétrica (U_v), $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, estimada pelo sistema TDR desenvolvido, pelo TDR comercial e determinada em função da densidade úmida e da umidade gravimétrica média, para sonda de 0,15 m com diâmetro de hastes de 6,5 mm, do solo Areia Quartzosa.

As equações 5.1 e 5.2 apresentam a estimativa dos parâmetros para as curvas de ajuste, apresentadas na Figura 5.19, para as correlações entre a umidade em volume estimada pelo sistema TDR desenvolvido e a umidade volumétrica real, umidade obtida com o TDR comercial e a umidade real, seguidos dos respectivos coeficientes de determinação para uma sonda de 0,15 m e solo Areia Quartzosa.

$$\theta = -651,01\theta_R^3 + 154,75\theta_R^2 - 10,87\theta_R + 0,29 \quad R^2 = 0,771 \quad (5.1)$$

$$\theta = -34,95\theta_R^3 + 12,28\theta_R^2 - 0,72\theta_R + 0,05 \quad R^2 = 0,957 \quad (5.2)$$

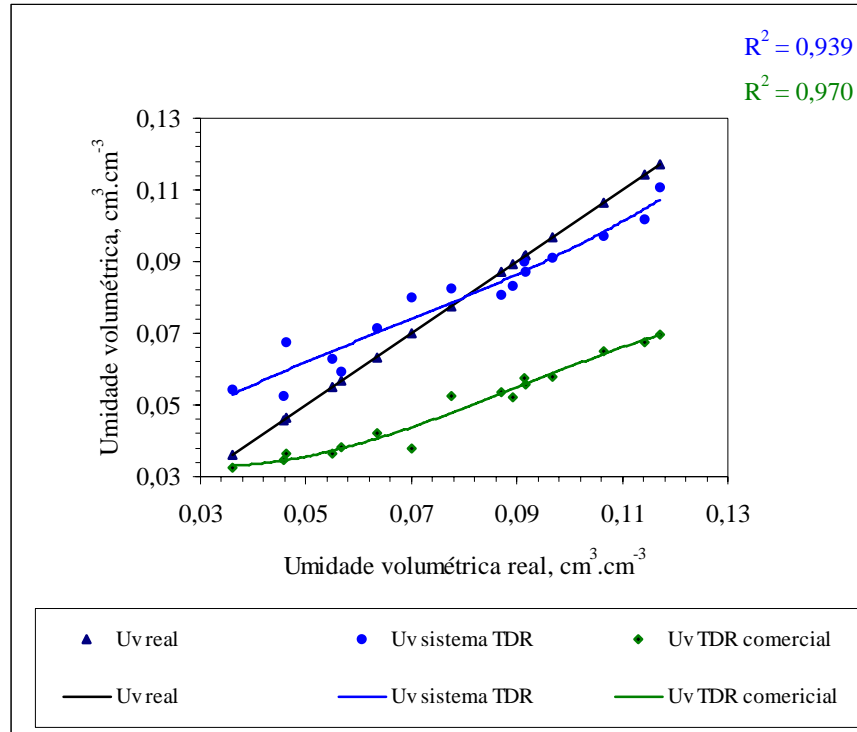


Figura 5.20. Umidade volumétrica (U_v), $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, estimada pelo sistema TDR desenvolvido, pelo TDR comercial e determinada em função da densidade úmida e da umidade gravimétrica média, para sonda de 0,30 m com diâmetro de hastes de 6,5 mm, do solo Areia Quartzosa.

As equações 5.3 e 5.4 apresentam a estimativa dos parâmetros para as curvas de ajuste, apresentadas na Figura 5.20, para as correlações entre a umidade em volume, estimada pelo sistema TDR desenvolvido, e a umidade volumétrica real, umidade obtida com o TDR comercial e a umidade real, seguidos dos respectivos coeficientes de determinação para uma sonda de 0,30 m e solo Areia Quartzosa.

$$\theta = -38,64\theta_R^3 + 7,56\theta_R^2 + 1,08\theta_R + 0,02 \quad R^2 = 0,939 \quad (5.3)$$

$$\theta = -58,79\theta_R^3 + 16,01\theta_R^2 - 0,87\theta_R + 0,04 \quad R^2 = 0,970 \quad (5.4)$$

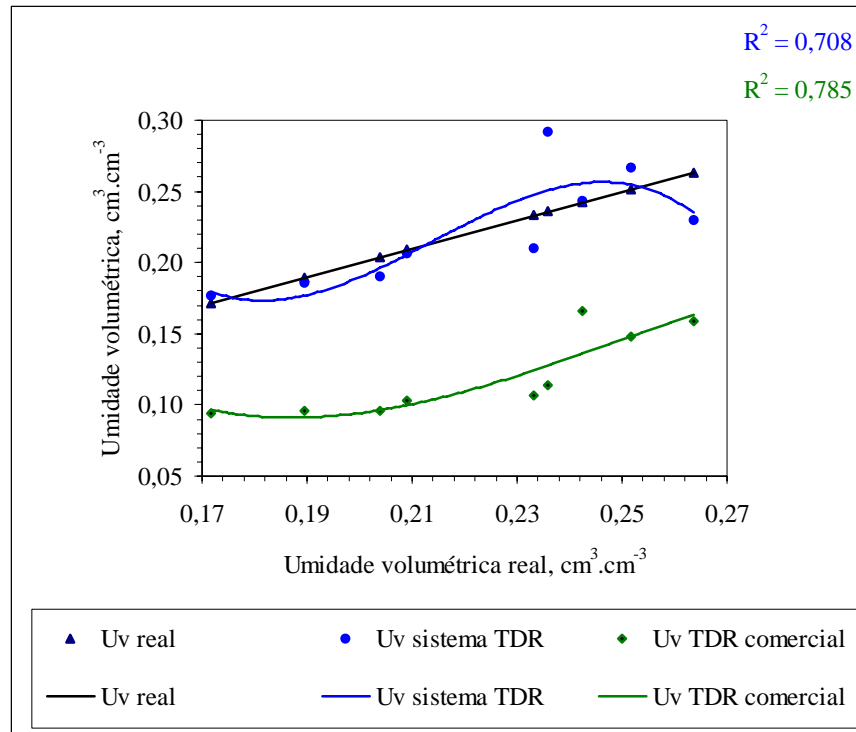


Figura 5.21. Umidade volumétrica (U_v), $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, estimada pelo sistema TDR desenvolvido, pelo TDR comercial e determinada em função da densidade úmida e da umidade gravimétrica média, para sonda de 0,15 m com diâmetro de hastes de 6,5 mm, solo Latossolo Vermelho.

As equações 5.5 e 5.6 apresentam a estimativa dos parâmetros para as curvas de ajuste, apresentadas na Figura 5.21, para correlações entre a umidade em volume, estimada pelo sistema TDR desenvolvido e a umidade volumétrica real, umidade obtida com o TDR comercial e a umidade real, seguidos dos respectivos coeficientes de determinação, para uma sonda de 0,15 m e solo Latossolo Vermelho.

$$\theta = -617,68\theta_R^3 + 396,39\theta_R^2 - 82,86\theta_R + 5,84 \quad R^2 = 0,708 \quad (5.5)$$

$$\theta = -108,11\theta_R^3 + 81,31\theta_R^2 - 19,07\theta_R + 1,52 \quad R^2 = 0,785 \quad (5.6)$$

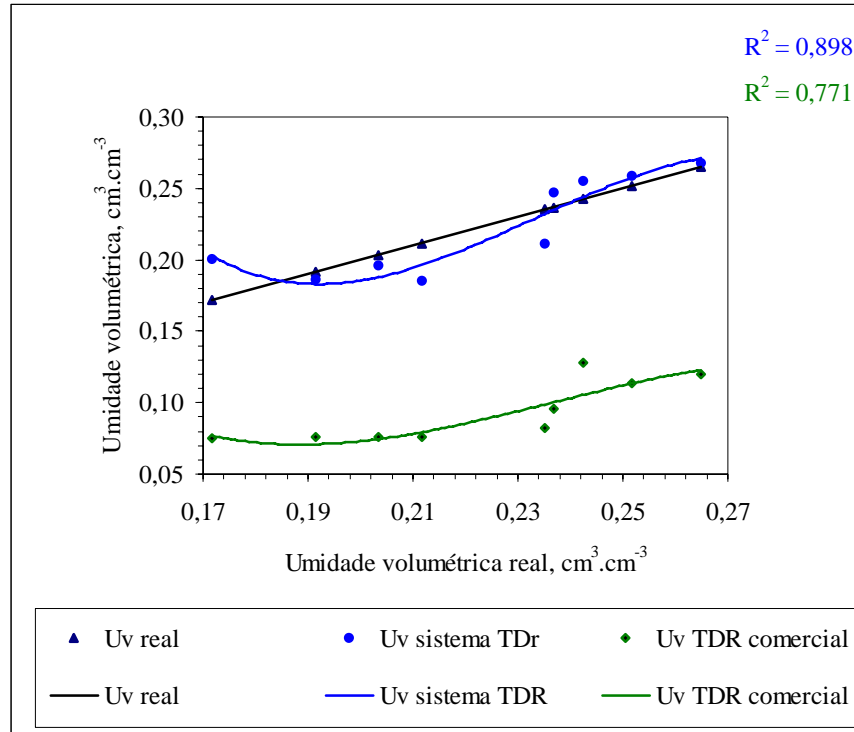


Figura 5.22. Umidade volumétrica (U_v), $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, estimada pelo sistema TDR desenvolvido, pelo TDR comercial e determinada em função da densidade úmida e da umidade gravimétrica média, para sonda de 0,30 m com diâmetro de hastes de 6,5 mm, solo Latossolo Vermelho.

As equações 5.7 e 5.8 apresentam a estimativa dos parâmetros para as curvas de ajuste, apresentadas na Figura 5.22, para correlações entre a umidade em volume, estimada pelo sistema TDR desenvolvido e a umidade volumétrica real, umidade obtida com o TDR comercial e a umidade real, seguidos dos respectivos coeficientes de determinação para uma sonda de 0,30 m e solo Latossolo Vermelho.

$$\theta = -332,96\theta_R^3 + 232,68\theta_R^2 - 52,53\theta_R + 4,04 \quad R^2 = 0,898 \quad (5.7)$$

$$\theta = -130,96\theta_R^3 + 92,99\theta_R^2 - 21,09\theta_R + 1,62 \quad R^2 = 0,771 \quad (5.8)$$

Analisando o comportamento das curvas de ajuste e os coeficientes de determinação das equações, percebe-se que a sonda de 0,30 m apresentou resultados mais eficientes, quando comparada com a sonda de 0,15 m, para os dois tipos de

solos estudados pois ela apresentou uma menor dispersão dos dados, em torno da curva de ajuste.

Obteve-se os erros médios relativos, entre a umidade medida com ambos equipamentos e a umidade volumétrica real, para os dois tipos de solos e comprimento de sondas (Quadro 5.21).

Quadro 5.21. Erro médio relativo entre a umidade medida para o equipamento TDR comercial e o desenvolvido em relação à umidade volumétrica real determinada gravimetricamente

Solo	Erro médio relativo, %			
	Areia Quartzosa	Latossolo Vermelho	Areia Quartzosa	Latossolo Vermelho
Comprimento de sonda, m	0,15	0,30	0,15	0,30
TDR comercial	28,9	34,5	46,3	58,3
TDR desenvolvido	17,8	13,4	7,3	6,6

Analisando o Quadro 5.21, percebe-se que a sonda de 0,30 m apresentou os menores erros relativos, para o sistema TDR desenvolvido, nos dois solos estudados, destacando-se para o solo Latossolo Vermelho (6,6%).

Os elevados valores encontrados para o erro relativo, para a sonda de 0,15 m em ambos os solos estudados, indicam que pode ter ocorrido erro experimental em algum ponto do experimento, uma vez que o sistema TDR desenvolvido apresentava uma série de conexões elétricas sujeitas a falhas, como mal contato. A presença de ruídos, imperceptíveis a olho nu, na imagem capturada pelo osciloscópio e sua posterior conversão em pares ordenados, pode ser a causa de pontos discrepantes (ou muito dispersos) ao redor da curva gerada, mesmo com o tempo de reflexão utilizado no cálculo da constante dielétrica sendo a média de três leituras.

O critério de seleção do fim do tempo da reflexão, baseado no valor da menor tensão observada dentro de um determinado intervalo predeterminado, é afetado por ruídos. O valor fica imprevisível, podendo subestimar ou superestimar o valor esperado, o que pode ter ocorrido durante o experimento.

As curvas geradas pelo TDR comercial (Trase System I) apresentaram coeficientes de determinação elevados para o solo Areia Quartzosa. Entretanto, não apresentou o mesmo comportamento para o solo Latossolo Vermelho.

Os elevados valores de erro médio relativo, encontrados para os resultados do TDR comercial, induzem ao questionamento da utilização deste para a medição da umidade do solo. A subestimação sistemática e elevada para o solo de textura muito argilosa, em comparação com o solo de textura arenosa, sinaliza a influência da textura do solo na determinação da umidade do mesmo.

Uma possível causa da ineficácia do TDR comercial pode ser o uso de sondas não originais. Desta hipótese, pode-se inferir: (a) não validação da teoria, uma vez que a literatura cita que o material de construção da sonda tem como característica ser não-magnetizável e muito melhor condutor do que o meio onde será imerso; (b) uso de material inadequado, mesmo sendo feito de liga inoxidável e não-magnetizável, e; (c) existência de possível histerese magnética, durante o funcionamento do equipamento. Não foi possível avaliar a existência de histerese magnética, logo não se pode afirmar ou negar as possibilidades do item a.

Para ser mais conclusivo a respeito do equipamento TDR comercial, face aos valores encontrados, torna-se necessária uma melhor avaliação do mesmo. Tal avaliação deve abranger tanto as curvas de calibração internas do equipamento que, via de regra, são elaboradas para um solo específico. Em geral, não se elaboram curvas de calibração para um determinado comprimento de sonda em um mesmo solo. Além disso, é possível que sondas construídas com diferentes materiais, além do utilizado pelo fabricante, induzam diferentes resultados.

6. CONCLUSÕES

O uso de casador de impedâncias 1:4 (75:300) Ω mostrou-se indispensável para o sistema TDR desenvolvido para medição da umidade do solo.

O modelo polinomial cúbico apresentou-se como o melhor ajuste para o solo de textura mais grossa (areia Quartzosa), na quase totalidade dos tipos de sondas estudadas.

O método utilizado para determinação do fim da reflexão do pulso eletromagnético nas sondas, mostrou-se viável para o cálculo da constante dielétrica (k_a) do solo.

Para a Areia Quartzosa, a sonda de melhor ajuste foi a diâmetro de hastes de 3,2 mm e comprimento de 0,30 m.

Para o Latossolo Vermelho a sonda de melhor ajuste foi aquela com diâmetro de hastes de 6,5 mm e comprimento de 0,10 m.

Sondas com diferentes diâmetros apresentaram comportamentos similares, quando se comparam apenas os coeficientes de determinação.

Os modelos polinomiais cúbicos gerados para correlacionar a constante dielétrica do solo com a umidade volumétrica, para cada comprimento e diâmetro de sonda testados nos solos estudados, mostraram-se preferíveis.

O sistema TDR desenvolvido proporcionou melhores coeficientes de determinação para a sonda de 0,30 m, nos dois solos e comprimentos de sondas estudados, em comparação ao TDR comercial.

Uma avaliação do equipamento TDR comercial deve ser feita visando conclusões mais específicas. Tal avaliação deverá abranger desde as curvas de calibração interna do aparelho até o material utilizado para confecção das sondas.

O sistema TDR desenvolvido foi viável, tecnicamente, para a determinação da umidade do solos de textura arenosa e argilosa.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Há necessidade de estudos complementares, a fim de aperfeiçoar o sistema TDR proposto para a mediação da umidade do solo. Sugerem-se, por etapas, os itens abaixo.

1. Quanto ao casador de impedância:
 - a) utilizar casador de impedância 1:1 e comparar os resultados com aqueles obtidos utilizando-se o casador 1:4; e
 - b) analisar a viabilidade de se utilizarem casadores de impedância por faixa de umidade;

2. Quanto à calibração do sistema TDR proposto:
 - a) utilizar modelos físicos de calibração que levem em consideração características do solo, tais como textura, densidade e porosidade;
 - b) obter curvas de calibração em função da umidade em peso; e
 - c) obter a curva de calibração entre a constante dielétrica e a umidade, em volume ou peso, em função do tempo de reflexão do pulso eletromagnético diretamente.

3. Quanto aos cabos utilizados:
 - a) verificar a influência do comprimento dos cabos na reflexão do sinal.

4. Quanto ao sistema TDR propriamente dito:

- a) estudar a viabilidade de integração entre o microcomputador, utilizando placas de circuitos impressos que possuam a função do osciloscópio, e o gerador de pulsos embutidos, para a aquisição automática do valor da umidade do solo; e
- b) Implementar o software desenvolvido a fim de filtrar possíveis ruídos na aquisição de dados, analisar o pulso refletido e fornecer o valor da umidade do solo.

8. BIBLIOGRAFIA

- AMATO, M.; RITCHIE, J. T. Small spatial scale soil water content measurement with time-domain reflectometry. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 59, March-April, p. 325-336, 1995.
- ANDREWS, J. R. Time domain reflectometry. *Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry in Enviromental, Infrastructure, and Mining Applications held at Northwestern University, Evanston, Illinois*, p.: 4-13, 1994.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. Viçosa: Imprensa Universitária, 1996. 488p.
- DALTON, F. N. Development of time-domain reflectometry for measuring soil water content and bulk soil electrical conductivity. *Soil Science Society of America*, Special Publication n. 30. (Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice), 1992.
- DALTON, F. N.; POSS, J. A.; HEIMOVAARA, T, J.; AUSTIN, R. S.; ALVES, W. J.; RUSSELL, W. B. Principles, techniques and desing considerations for measuring soil water content and soil salinity using time domain reflectometry. *United States Salinity Laboratory*, Research Report n. 122 (Riverside, California), 1990.
- DALTON, F. N.; VAN GENUTCHTEN, M. Th.; The time-domain reflectometry method for measuring soil water content and salinity. *U. S. Salinity Laboratory*, Geoderma, 38, p.:237-250 (Riverside, California), 1986.

- DALTON, F.N. Measurement of soil water content and electrical conductivity using time domain reflectometry. *International Conference on Measurement of Soil and Plant Water Status*, July 6-10, p. 95-98, 1987.
- DALTON, F.N.; HERKELRATH, W. N.; RAWLINS, D. S.; RHOADES, J.D. Time domain reflectometry: simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. *American Association for the Advancement of Science*, June, volume 224, p. 989-990, 1984.
- DASBERG, S.; DALTON, F.N. Time domain reflectometry field measurements of soil water content and electrical conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, n. 49, p. 293-297, 1985.
- DASBERG, S.; NADLER, A. Field sampling of soil water content and bulk electrical conductivity with time domain reflectometry. *International Conference on Measurement of Soil and Plant Water Status*, July 6-10, p. 99-101, 1987.
- DIRKSEN, C.; DASBERG, S. Improved calibration of time domain reflectometry soil water content measurements. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 57, p. 660-667, 1993.
- EISBERG, R. M.; LERNER, L. S. **Física: fundamentos e aplicações**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1983.
- GOMIDE, R. L. Monitoramento para manejo da irrigação: instrumentação, automação e métodos. In: **Manejo de irrigação** / editado por FARIA, M. A. Lavras: UFLA/SBEA, 1998.
- HUISMAN, J. A.; BOUTEN, W. Comparison of calibration and direct measurement of cable and probe properties in time domain reflectometry. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 63, p. 1615-1617, 1999.
- KLAR, A. E. Irrigação: frequência e quantidade de aplicação. São Paulo: Nobel, 1991. 157p.
- MARQUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C.; SILVA, H. R. **Manejo de irrigação em hortaliças**. EMBRAPA-CNPq – 5.ed., rev. ampl. – Brasília: EMBRAPA-SPI, 1996. 72 p.

- NADLER, A.; GAMLIEL, A.; PERETZ, I. Practical aspects of salinity effect on TDR-measured water content: a field study. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 63, p. 1070-1076, 1999.
- NISSEN, H. H.; MOLDRUP, P. Theoretical background for the TDR methodology. *Soil Science Society Of America Journal*, vol. 62, p. 99-109, 1998. *Proceedings of the Symposium: Time Domain Reflectometry Applications in Soil Science*, Research Centre Foulum, p. 9-23, 1994.
- NISSEN, H. H.; MOLDRUP, P.; HENRIKSEN, K. High-resolution time domain reflectometry coil probe for measuring soil water content. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 62, p. 1203-1211, 1998.
- NOBORIO, K.; HORTON, R.; TAN, C. S. Time domain reflectometry probe for simultaneous measurement of soil matric potential and water content. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 63, p. 1500-1505, 1999.
- ROBINSON, D. A.; BELL, J. P.; BATCHELOR, C. H. Influence of iron and titanium on water content determination by TDR. *Proceedings of the Symposium: Time Domain Reflectometry Applications in Soil Science held at the Research Centre Foulum*, p. 63-70, 1994.
- 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*, v.43, p. 1-13, 1992.
- ROTH, K.; SCHULIN, R.; FLÜLER, J.; ATTINGER, W. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resources Research*, v.26, n.10, p. 2267-2273, 1990.
- SALA, D.; TORRENTS, J. M. Reflectometría, aplicación a la medida de humedad en suelos. *Mundo Electrónico*, n. 281, 1997.
- SERRARENS, D.; MACINTYRE, J. L.; HOPMANS, J. W.; BASSOI, L. H. Soil moisture calibration of TDR multilevel probes. *Scientia Agricola*, vol. 57, n.2, p. 349-354, 2000.

- SPAANS, E. J. A.; BAKER, J. M. Simple bluns in parallel probes for time domain reflectometry. *Soil Science Society of America Journal*, n. 57, p.: 668-673, 1993.
- STEIN, J.; KANE, D. L. monitoring the unfrozen water content of soil and snow using time domain reflectometry. *Water Resources Research*, vol. 19, n. 6, p. 1573-1584, 1983.
- TOMMASELLI, J. T. G. *Influência de algumas características do solo sobre a calibração de um aparelho de TDR (time domain reflectometry)*. Tese (doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba, 1997.
- TOPP, G. C. The Application of Time-Domain Reflectometry (TDR) to Soil Water Content Measurement. *International Conference on Measurement of Soil and Plant Water Status*, July 6-10, p. 85-93, 1987.
- TOPP, G. C.; DAVIS, J. L. Measurement of soil water content using time domain reflectometry. *Associate Committee on Hydrology National Research Council of Canada* (Canadian Hydrology Symposium: 82), June 14-15, Fredericton, New Brunswick, 1982.
- TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, vol. 16, n. 3, p. 574-582, 1980.
- WHITE, I.; ZEGELIN, S. J.; TOPP, G. C.; FISH, A. Effect of bulk electrical conductivity on TDR measurement of water content in porous media. *Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry in Enviromental, Infrastructure, and Mining Applications*, Northwestern University, Evanston, Illinois, p.: 294-308, 1994.