

SONDAS DE TDR PARA A ESTIMATIVA DA UMIDADE E DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO

Claudinei Fonseca Souza¹; Edson Eiji Matsura²; Marcos Vinícius Folegatti³; Eugênio Ferreira Coelho⁴; Dani Or⁵

¹Depto de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Taubaté, Universidade de Taubaté, Taubaté, SP, claudinei@unitau.br

²Depto de Água e Solo, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade de Campinas, Campinas, SP

³Depto de Engenharia Rural, Escola Superior Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

⁴CNPMF/EMBRAPA, Cruz das Almas, BA.

⁵University of Connecticut, Storrs, CT, EUA.

1 RESUMO

No Brasil a utilização da técnica da TDR é relativamente recente e vários estudos estão sendo desenvolvidos para adequar a técnica aos diferentes tipos de solo. A técnica da TDR implica em um expressivo custo financeiro para ser utilizada na agricultura brasileira, atribuído principalmente à aquisição do equipamento e das sondas. Neste contexto, o trabalho teve como objetivo apresentar a construção de três diferentes tipos de sondas de TDR de maneira a permitir a substituição das sondas comerciais. Avaliou-se o desempenho de cada uma em relação à estimativa da umidade e da condutividade elétrica do solo. Os tipos de sondas propostas são: sonda contínua com três hastes, multi-haste segmentada e coaxial de volume variável. Estas foram avaliadas em função dos seguintes parâmetros: coeficiente de reflexão, impedância característica e sensibilidade espacial. Os resultados demonstraram a viabilidade no uso das sondas de TDR propostas na estimativa da umidade e da condutividade elétrica no solo. A utilização das mesmas é alternativa às comerciais, viabilizando a utilização nas mais diversas condições, principalmente, em situações que necessitam de quantidade elevada de sondas de TDR.

UNITERMOS: guia de onda, umidade do solo, condutividade elétrica do solo.

SOUZA, C.F.; MATSURA, E.E.; FOLEGATTI, M.V.; COELHO, E.F.; OR, D. USE OF TDR PROBES TO ESTIMATE SOIL MOISTURE AND ELECTRIC CONDUCTIVITY

2 ABSTRACT

In Brazil, TDR use is relatively recent and several studies have been done to adequate this technique to different soil types. TDR use implies in a high financial cost for the Brazilian agriculture, mainly the purchase of equipment and probes. Because of that, this study aimed to present the building of three different kinds of TDR probes that may substitute the ones available in the market. The performance for each probe was evaluated considering soil moisture estimate and electric conductivity. The three proposed probes are the following ones: continuous probe with three posts, segmented probe with multiple posts and the one with

coaxial cable and variable volume. The following parameters were considered in this evaluation: reflection coefficient, characteristic impedance and spatial sensitivity. The results showed that these proposed TDR probes may be used for soil moisture and electric conductivity estimates. Their use is an alternate method to the commercial ones, and it allows TDR use in different conditions, mainly when a larger number of TDR probes are necessary.

KEYWORDS: wave control, soil moisture, soil electric conductivity.

3 INTRODUÇÃO

A água é extremamente importante na produção vegetal, onde o seu manejo racional é decisivo para o desenvolvimento das plantas, evitando sua falta ou excesso. Desta maneira, o conhecimento da dinâmica da distribuição água no solo torna-se cada vez mais necessário, uma vez que, está intimamente ligado às propriedades do sistema solo-água-planta. O domínio desse conhecimento é, certamente, indispensável ao sucesso de uma agricultura sustentável.

Para estimativas precisas de umidade e condutividade elétrica do solo em laboratório e em campo, tem sido utilizada a técnica de Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), a qual recomenda o ajuste de uma curva de calibração para cada tipo de solo, um inconveniente que normalmente é aceitável devido às vantagens que apresenta em relação a outras técnicas (Souza & Matsura, 2002).

As vantagens inerentes da técnica da TDR como a precisão, método não destrutivo, a não utilização de radiação ionizante, possibilidade de automação e acoplamento de dispositivos multiplicadores de leituras são justificativas importantes para a adoção cada vez maior desta técnica, em substituição a outros métodos (Coelho & Or, 1996).

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

A propagação de ondas eletromagnéticas é convertida para Ka, por meio da equação abaixo (Hook & Livingston, 1995):

$$Ka = \left(\frac{\Delta X}{Vp.L} \right)^2$$

(1)

donde,

ΔX - Distância percorrida pela onda eletromagnética, m

Vp - Velocidade de propagação, 0,99 (99 % de c)

c - Velocidade da luz, 3×10^8 m s⁻¹

L - Comprimento da haste, m

A energia da onda é atenuada em proporção à concentração iônica do meio ao longo das hastes condutoras, a qual serve como base para a medida da condutividade elétrica

aparente. Desta forma, ao se conhecer a permissibilidade elétrica de um meio padrão (p. e. água deionizada) pôde-se estimar comparativamente, a condutividade elétrica de um meio desejado (p. e. solução do solo).

Para estimar a condutividade elétrica, a técnica da TDR necessita da impedância característica da sonda em água destilada. Em posse deste valor o analisa-se a impedância causada pelo meio estudado, e por diferença estima a condutividade elétrica através da equação abaixo (Giese & Tiemann, 1975):

$$CE = \frac{Z_0}{120\pi LZ_u} \left(\frac{2V_0}{V_{inf}} - 1 \right) \quad (\text{dS m}^{-1}) \quad (2)$$

onde:

L = comprimento da sonda, m;

Z_0 = Impedância característica da sonda. (Deve ser obtido em água destilada);

Z_u = Impedância no cabo $\sim 50 \Omega$;

V_0 = amplitude do sinal eletromagnético gerado pelo TDR;

V_1 = amplitude do sinal depois da reflexão do início da sonda;

V_{inf} = amplitude do sinal de retorno depois de reflexões múltiplas.

Na Figura 1 pode-se observar um gráfico correlacionando o coeficiente de reflexão em função da distância percorrida para uma sonda contínua com 3 hastes. A sonda utilizada atende a todas as condições mínimas para uma perfeita interpretação do gráfico, o que possibilita a estimativa da umidade e da condutividade elétrica do solo.

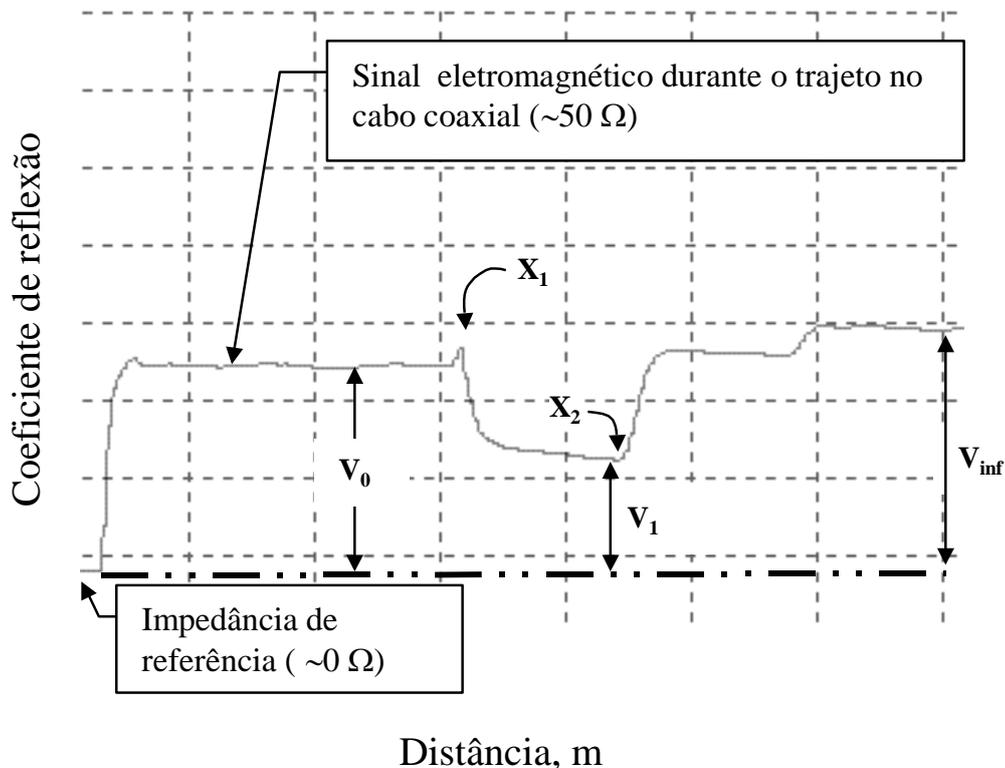


Figura 1. Esquema de interpretação da onda eletromagnética. X_1 é a distância no início da sonda (logo após o final do cabo coaxial) e X_2 é a distância no final da sonda.

A utilização da técnica para a estimativa da condutividade elétrica não é bem difundida entre a maioria dos usuários, devido à carência de informações descrevendo suas

potencialidades e limitações, principalmente sobre a qualidade e precisão de leituras *versus* a configuração de sondas. O desafio de conhecer e utilizar-se destas informações de forma correta pode resultar em desenvolvimento de sondas com vantagens adicionais, pois leituras pontuais de umidade e condutividade elétrica do solo, contribuiriam para que a técnica da TDR fosse ainda mais atrativa como ferramenta capaz de auxiliar no manejo da fertirrigação.

O equipamento de TDR utilizado na agricultura é basicamente composto por um testador de cabo, hastes condutoras (sonda de TDR) e, para a leitura de diversas sondas os dados podem ser adquiridos através de um multiplexador. Todavia, a principal desvantagem tem sido o custo, ainda alto para os padrões da agricultura nacional. Para reduzir erros atribuídos a variabilidade espacial no manejo da irrigação ou para acompanhar a frente de molhamento no perfil do solo é necessário uma expressiva quantidade de sondas de TDR, o que tem sido inviabilizado pelo elevado custo de aquisição das mesmas, principalmente por serem acessórios importados.

Baseando-se nesta limitação, objetivou-se neste trabalho desenvolver de três diferentes tipos de sondas de TDR como alternativa às comerciais, avaliando-as através da estimativa da umidade e da condutividade elétrica do solo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento das sondas levou em conta os critérios observados na literatura: 1) A amplitude das reflexões X_1 e X_2 de pelo menos 90% da máxima amplitude disponível; 2) Um mínimo de sinal eletromagnético captado; 3) Impedância característica inferior a 200Ω . Porém alguns autores descrevem bons resultados utilizando sondas com valores superiores ao recomendado (Coelho et al., 2003; Vellame et al., 2003); 4) Uniformidade na distribuição de energia conduzida pela sonda no meio amostrado; 5) Mínimo custo (Souza & Matsura, 2002; Heimovaara, 1993).

Todas estas exigências estão ligadas à geometria das hastes (quantidade, diâmetro de hastes e espaçamento entre hastes) que conduzem o sinal eletromagnético.

As sondas de TDR propostas são: Sonda contínua com 3 hastes, Sonda multi-haste segmentada e Sonda coaxial de volume variável. As sondas de TDR são descritas abaixo:

4.1 Sonda de TDR

Este tipo de sonda é largamente utilizado pelos usuários da técnica, os quais aplicam em seus trabalhos nas mais diferentes formas de penetração no solo: superficial ou em trincheiras. As sondas contínuas foram construídas com 3 hastes paralelas contínua de aço inoxidável (AISI 304; $\varnothing = 3 \text{ mm}$; $L = 200 \text{ mm}$). As hastes foram cortadas com 220 mm de comprimento, procedendo-se em seguida a soldagem do capacitor de 3,9 pF na extremidade de duas hastes (lateral e central), tendo este, a função de alterar a impedância pontual na guia condutora e marcar o início da distância (X_1 , Figura 1) percorrida pela onda eletromagnética. Este procedimento foi necessário para equipamento dedicado do tipo Trase System¹.

Um cabo coaxial (RG – 58; 50Ω ; $L = 1,5 \text{ m}$) com um conector BNC em sua extremidade foi soldado nas três hastes, onde o condutor externo do cabo foi ligado nas 2 hastes laterais e interno na haste central. Para a soldagem foram utilizadas uma estação de solda elétrica e uma liga de estanho (Sn 63/37). Para permitir a fixação do capacitor e do cabo

coaxial nas hastes de aço inoxidável foi necessária a limpeza da superfície da haste com uma solução de ácido fosfórico a 1%.



Figura 2. Esquema de montagem das sondas



Figura 3. Gabaritos para montagem da sonda contínua de 3 hastes. A - Nylon; B - Silicone.

O esqueleto da sonda de TDR (hastes, capacitor e cabo coaxial) foi acomodado em um gabarito. Este gabarito foi composto por dois perfis de alumínio com formato em U (Figura 2), servindo de suporte para as hastes, também, existe a possibilidade em usar gabaritos confeccionados em moldes de nylon ou silicone (Figura 3). A resina epóxi foi utilizada com o objetivo de formar um bloco resistente, promovendo sustentação do esqueleto da sonda e marcando o início da sonda (Tektronix 1502 B/C¹ e TDR 100¹). A retirada das sondas de TDR foi facilitada untando-se o interior do perfil com uma solução desmoldante. Após 8 horas da aplicação do epóxi as sondas adquiriram resistência suficiente e puderam ser retiradas do interior do gabarito. Na Figura 4 são apresentados os detalhes construtivos da sonda.

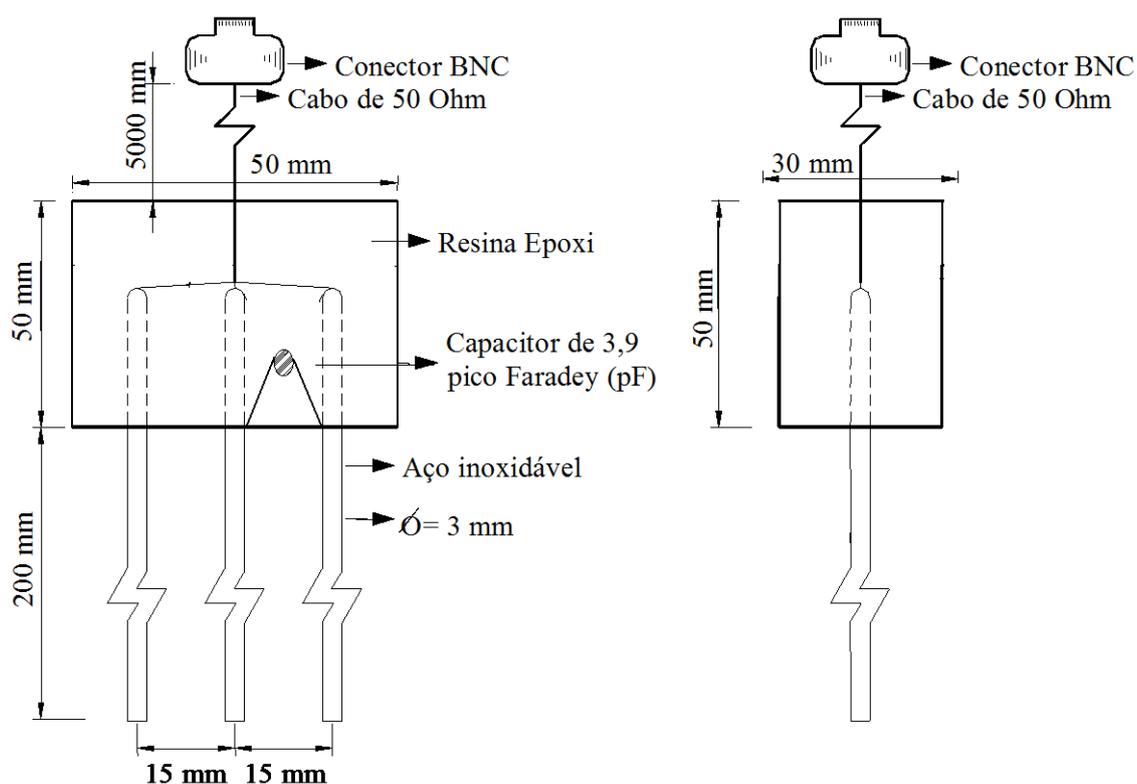


Figura 4. Desenho esquemático da sonda de TDR contínua

4.2 Sonda multi-haste segmentada

As sondas multi-haste segmentada desenvolvidas consistem de um sensor com hastas metálicas com trechos de distintos valores de impedância, permitindo a estimativa da umidade em diferentes profundidades no perfil do solo utilizando uma única sonda. Estes trechos são facilmente obtidos pela variação dos diâmetros das hastas que são interpretados utilizando-se o gráfico (Figura 5). As sondas multi-haste segmentada em estudo foram fabricadas em latão, com exceção dos trechos intermediários de diâmetro menor, que são de aço inoxidável. Com o auxílio das barras de deslocamento do equipamento Tektronix 1502 C pode-se obter o deslocamento do sinal eletromagnético na sonda ($\Delta X = X_{n+1} - X_n$).

Na Figura 5, observa-se que X_1 é a distância percorrida no início da sonda (logo após o final do cabo coaxial) e X_5 é a distância percorrida no final útil da sonda, e os picos coincidem com o centro do trecho intermediário de diâmetro menor.

A limitação neste caso é que o quinto e último segmento não apresentam seu término evidenciado, o que prejudica a estimativa da umidade. Por esse motivo, a leitura do último segmento foi desprezada.

A sonda desenvolvida possui, portanto 4 hastas com 675 mm de comprimento, com 3 segmentos de 200 mm e 1 segmento final pontiagudo de 75 mm de comprimento, promovendo um perfil útil de leitura de 600 mm. O detalhamento da construção da sonda e suas dimensões são apresentados na Figura 6. Aproximadamente, 70 % do custo desta sonda foi dispensado para mão-de-obra (serviço de usinagem) para a confecção das peças de montagem.

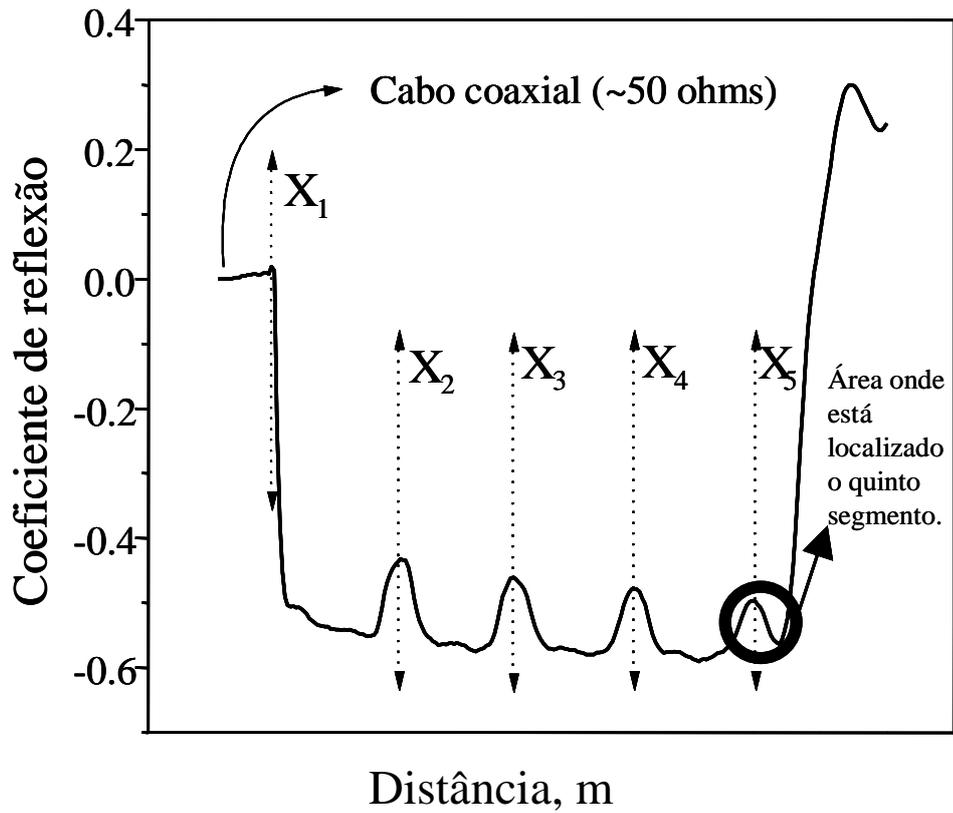


Figura 5. Esquema de interpretação da onda eletromagnética produzida por uma sonda multi-haste segmentada.

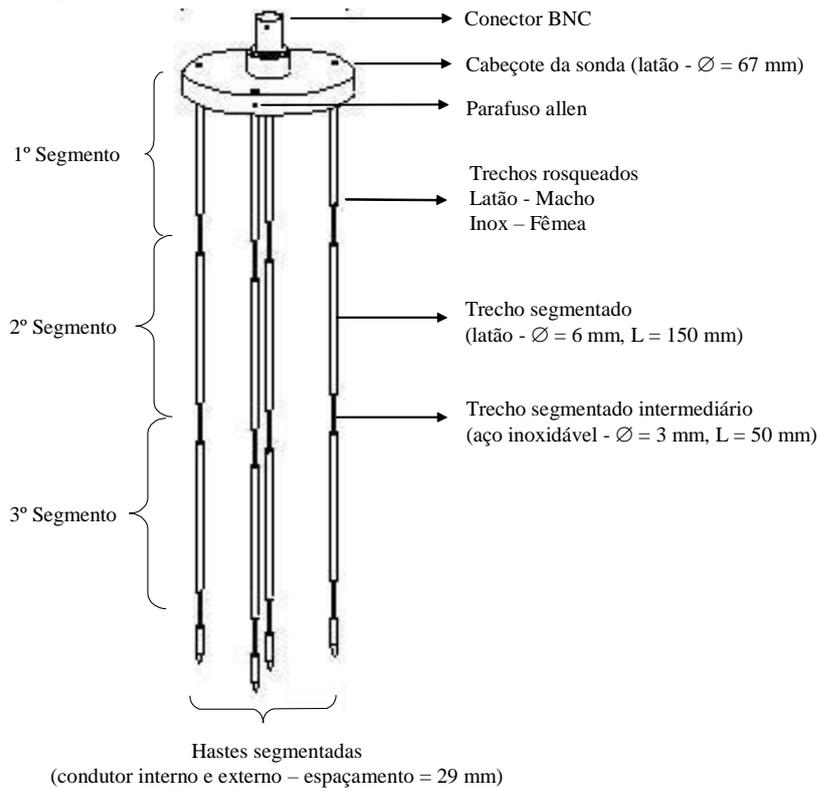


Figura 6. Sonda de TDR multi-haste segmentada

4.3 Sonda coaxial de volume variável

A sonda coaxial de volume variável é capaz de estimar o armazenamento da água dentro do volume (integral e/ou parcial) de solo explorado. Desta maneira, a umidade volumétrica contida entre os condutores interno e externo é determinada através da análise da distância percorrida pela onda eletromagnética emitida pelo testador de cabos. Os condutores, interno e externo, podem ser combinados promovendo diferentes volumes de solo medido. Esta vantagem não é alcançada por outros tipos de sonda por possuírem condutores fixos, as quais necessitam de composições de malhas de sondas para atingir um determinado objetivo, por exemplo, estimar a distribuição de água dentro de um bulbo molhado em irrigação por gotejamento.

A sonda consiste de um cabo coaxial (50Ω ; $L = 2 \text{ m}$) ligado a um cabeçote de resina epóxi, o qual foram conectados 6 cabos flexíveis (RG – 174/U; 50Ω ; $0,6 \text{ m}$) ao condutor interno do cabo coaxial e mais 6 cabos ao condutor externo, totalizando 12 cabos. Cada um dos cabos foi ligado a uma haste metálica de aço inoxidável ($\varnothing = 3 \text{ mm}$; $L = 260 \text{ mm}$), formando uma guia condutora para a onda eletromagnética conforme é apresentada na Figura 7 A e B. O dimensionamento dos cabos flexíveis permite um arranjo concêntrico dos condutores, os quais combinados puderam estimar a umidade em diferentes volumes de solo.

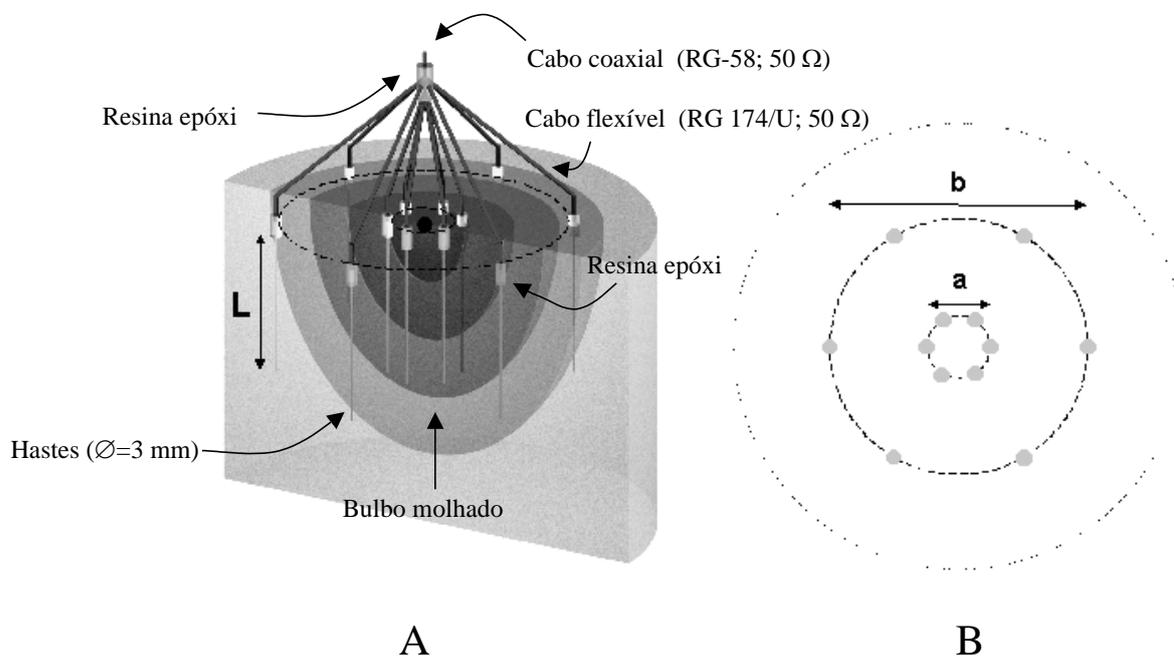


Figura 7. A - Esquema da sonda coaxial de volume variável apresentando hastes metálicas inseridas em um bulbo molhado. B - Uma configuração de coaxial, sendo a o condutor interno e b o condutor externo.

As três sondas propostas foram avaliadas fisicamente através do coeficiente de reflexão, da impedância característica e sensibilidade espacial.

O coeficiente de reflexão em função da distância percorrida pela onda eletromagnética apontou informações importantes sobre o desempenho das características utilizadas no dimensionamento da sondas para facilitar a interpretação do sinal eletromagnético gerado pelo TDR, o qual deverá apresentar a amplitude das reflexões X_1 e X_2 e um mínimo de sinal eletromagnético captado.

A impedância característica (Z_0, Ω) é o modo de expressar a lei que relaciona a variação de voltagem e corrente com distância ao longo de uma linha de transmissão uniforme, sendo geralmente utilizada para avaliar a performance de sondas de TDR. Em geral, sondas com Z_0 superior a 200Ω são limitantes para a determinação da umidade do solo, pois neste caso a impedância característica pode causar um aumento na atenuação do sinal da onda eletromagnética a ser analisado durante a distância percorrida, a qual prejudicará a interpretação do sinal eletromagnético e, também dificulta que a resina epóxi utilizada na confecção do cabeçote seja utilizado como o marcador do início da sonda. Entretanto, alguns autores descrevem bons resultados utilizando sondas com valores superiores ao recomendado. Nestes casos é comum o uso de componentes eletrônicos para facilitar a interpretação do sinal eletromagnético.

Segundo Zegelin et al. (1989) e Heimovaara (1993), pode-se medir Z_0 por determinação do coeficiente de reflexão da sonda (p), isso quando a mesma está envolta por um material dielétrico uniforme.

$$Z_0 = Z_u * K^{0.5} * \frac{(1+p)}{(1-p)}$$

(2)

sendo,

$$p = \left(\frac{V_1}{V_0} \right) - 1$$

(4)

K = Constante dielétrica. (obtido em água destilada, Souza et. al, 2004).

Para a realização dos testes mencionados utilizou-se um testador de cabos (Tektronix 1502 C, Figura 8) equipado com uma interface RS 232, analisando o sinal eletromagnético automaticamente pelo programa WinTDR 6.0 (Utah State University, Logan-Utah).



Figura 8. TDR Tektronix 1502 C

A sensibilidade espacial é um conceito introduzido por Knight (1992), o qual descreve a uniformidade de distribuição de energia emitida pela onda eletromagnética em função da

água distribuída entre os condutores interno e externo da sonda de TDR. Assim, quanto maior a uniformidade de distribuição melhor será a representatividade da umidade volumétrica espacialmente medida. Knight (1992) sugere uma relação prática para auxiliar na avaliação de sondas de TDR:

$$\frac{a}{b} \geq 0,1$$

(5)

sendo:

a = diâmetro do condutor interno;

b = diâmetro do condutor externo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

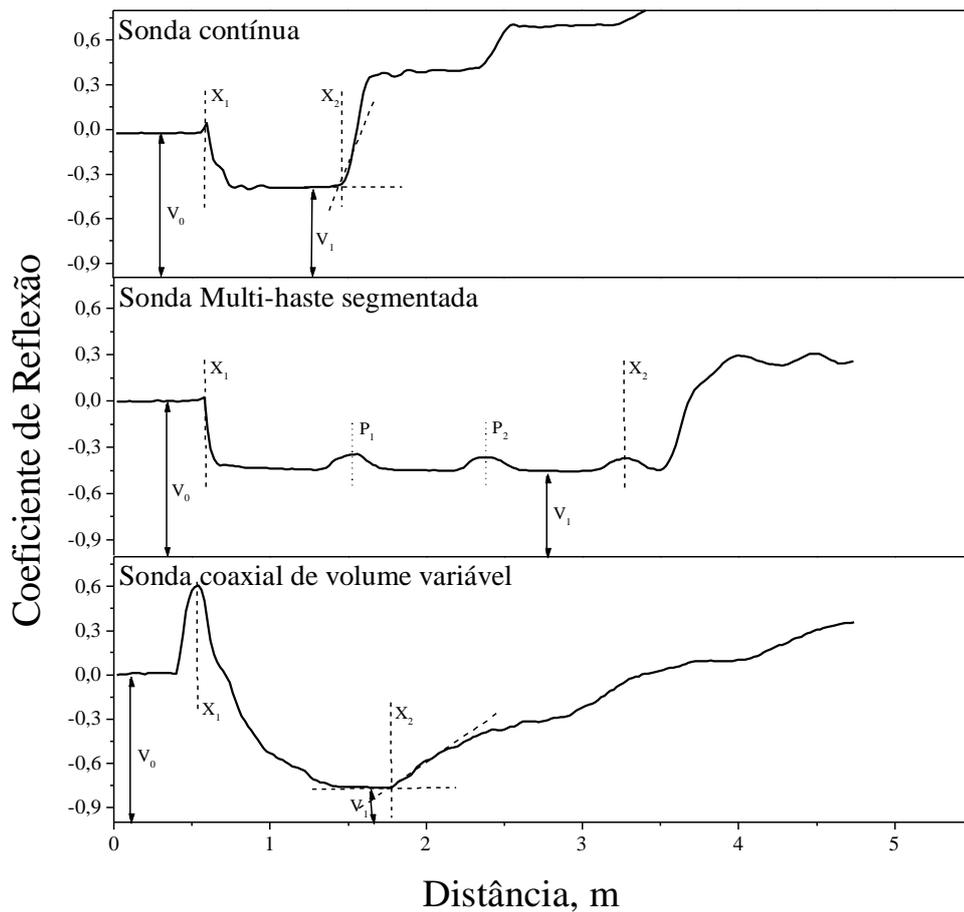


Figura 9. Interpretação da onda eletromagnética. X_1 é a distância no início da sonda e X_2 é a distância no final da sonda. Sendo V_0 a amplitude do sinal eletromagnético gerado pelo TDR, V_1 a amplitude do sinal depois da reflexão do início da sonda e P_1 e P_2 são os picos de impedância causados pela segmentação.

Coeficiente de reflexão

A Figura 9 apresenta gráficos que descrevem o coeficiente de reflexão em função da distância percorrida pela onda eletromagnética para os três tipos sondas. Os pontos X_1 e X_2

correspondem à reflexão no início e o final da sonda, respectivamente. Observam-se também as amplitudes do sinal eletromagnético gerado pelo TDR e os picos de impedância provocados pela segmentação da Sonda multi-haste. Portanto, verifica-se que para todas as sondas propostas a constante dielétrica aparente e a impedância podem ser facilmente calculadas para as características dimensionadas, e subsequentemente possibilita a determinação da umidade e da condutividade elétrica do solo.

Impedância característica e sensibilidade espacial

Tabela 1. Impedância característica e análise de sensibilidade espacial para diferentes configurações de sondas de TDR. Sonda contínua (L = 0,20 m); Sonda multi-haste (3 segmentos; L = 0,20 m); Sonda coaxial de volume variável (20 combinações; L = 0,26 m).

	Diâmetro (m)			Volume (m ³)	Impedância característica, Z ₀ (Ω)
	Interno, a	Externo, b	a/b		
Sonda contínua	0,003	0,027	0,11	0,0001	197
Sonda multi-haste					
1	0,006	0,058	0,11	0,0005	168
2	0,006	0,058	0,11	0,0005	167
3	0,006	0,058	0,11	0,0005	166
Sonda coaxial					
1	0,04	0,07	0,57	0,0007	47
2	0,04	0,10	0,40	0,0017	65
3	0,04	0,15	0,27	0,0043	81
4	0,04	0,20	0,20	0,0078	98
5	0,04	0,30	0,13	0,0180	123
6	0,04	0,40	0,10	0,0323	135
7	0,07	0,10	0,70	0,0010	51
8	0,07	0,15	0,47	0,0036	66
9	0,07	0,20	0,35	0,0072	77
10	0,07	0,30	0,23	0,0174	96
11	0,07	0,40	0,17	0,0317	118
12	0,10	0,15	0,67	0,0025	51
13	0,10	0,20	0,50	0,0061	63
14	0,10	0,30	0,33	0,0163	80
15	0,10	0,40	0,25	0,0306	94
16	0,15	0,20	0,75	0,0036	45
17	0,15	0,30	0,50	0,0138	63
18	0,15	0,40	0,37	0,0281	78
19	0,20	0,30	0,67	0,0102	50
20	0,20	0,40	0,50	0,0245	67

Os valores de impedância característica para as diferentes sondas de TDR são apresentados na Tabela 1. Os resultados demonstram um aumento no valor da impedância característica com a diminuição da relação do diâmetro interno e externo (a/b) no caso da sonda coaxial. E a sonda de TDR contínua de 3 hastes apresentou o maior valor medido de impedância característica, atingindo 197Ω . De uma maneira geral observou-se que todas as dimensões geométricas utilizadas apresentaram valores de impedância características inferior ao recomendado (200Ω) e, com ótima sensibilidade espacial. Zegelin et al. (1989) apresentaram valores medidos de impedância que não ultrapassaram 173Ω para sondas multi-haste contínuas, com $4,76 \text{ mm}$ de diâmetro e 150 mm de comprimento, valores estes considerados satisfatórios pelos autores.

Os resultados observados sugerem que as sondas propostas possuem características dimensionais apropriadas para atender as atribuições físicas desejadas em uma sonda de TDR.

Os resultados apresentados comprovam que todas as sondas possuem características físicas semelhantes na propagação de ondas eletromagnéticas ao longo da sonda; entretanto, Souza & Matura (2002) observam que, para a sonda multi-haste segmentada existe dificuldade na interpretação dos picos de impedância quando foi utilizado um número elevado de segmentações, a qual aumentou consideravelmente as reflexões do sinal. Os mesmos autores recomendam uma segmentação máxima de 4 trechos.

Aplicações potenciais das sondas de TDR propostas

Devido às características de construção e funcionamento de cada tipo de sonda de TDR proposta, as mesmas podem ser utilizadas de forma mais apropriadas em função de como se quer avaliar a umidade e/ou a condutividade elétrica do solo no espaço e temporalmente. Desta forma o conhecimento das vantagens e desvantagens da aplicação das sondas é a ferramenta primordial no auxílio da tomada de decisão do usuário para o alcance do melhor resultado durante o monitoramento das variáveis.

Desta maneira, acredita-se em várias aplicações potenciais para as sondas propostas, entretanto a motivação original para o estudo foi confeccionar sondas de TDR com baixo custo, sobretudo para viabilizar a aplicação da técnica em situações que necessitem de quantidade elevada de sondas para monitorar a dinâmica da solução do solo. Este monitoramento conduz a aplicações práticas que envolvem integração da umidade e da condutividade elétrica do solo em sistemas que aplicam a água próximo à zona radicular através de gotejamento ou microaspersão. Podendo ainda monitorar o armazenamento de água ou a umidade média dentro de um determinado volume de solo. Esta capacidade poderá ser útil para um pomar em desenvolvimento com árvores jovens (ou vinhas), os quais evoluem com o tempo requerendo diferentes volumes de água e fertilizantes.

As sondas podem ser aplicadas satisfatoriamente para monitorar, quase em tempo real, a distribuição de água no solo ao redor de uma fonte pontual possibilitando o uso de diferentes configurações de malha lateral e vertical no perfil do solo. Especulam-se, também, aplicações nos setores agrícola, industrial e construção civil, onde necessitem de estimativas da umidade em grandes volumes instantaneamente (grãos, processos industriais, barragens e etc). Finalmente, avalia-se que o uso da técnica pode representar um papel importante na experimentação de modelos teóricos sensíveis no espaço e tempo em um alcance ilimitado de configurações (por exemplo, modelos que predizem a uniformidade de distribuição da água e fertilizantes no solo).

6 CONCLUSÃO

Os resultados encontrados demonstraram existir viabilidade no uso das sondas de TDR propostas como alternativa às comerciais na estimativa da umidade e da condutividade elétrica no solo uma vez que as sondas desenvolvidas possuem características físicas adequadas, viabilizando a utilização da técnica nas mais diversas condições, principalmente em situações que necessitam de quantidade elevada de sondas de TDR.

7 AGRADECIMENTO

À FAPESP pelo incentivo e suporte financeiro (processos nº 98/04931-7, 98/13819-6, 03/00066-0 e 03/00067-6).

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COELHO, E.F.; OR, D. Flow and uptake patterns affecting soil water sensor placement for drip irrigation management. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 39, n. 6, p. 2007 – 2016, 1996.

COELHO, E.F.; et al. Calibração de dois tipos de sondas de TDR acopladas ao testador de cabos e a multiplexadores em três tipos de solo. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 13, 2003, Juazeiro. **Anais**. Viçosa: Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem, 2003. 1 CD ROM

GIESE, K.; TIEMANN, R. Determination of the complex permittivity from thin-sample Time Domain Reflectometry: Improved analysis of the step response waveform. **Advances in Molecular Relaxation Processes**, Amsterdam, v.7, n. 1, p.45-59, 1975.

HEIMOVAARA, T.J. Design of triple-wire Time Domain Reflectometry probes in practice and theory. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, n. 6, p. 1410 – 1417, 1993.

HOOKE, W.R.; LIVINGSTON, N.J. Propagation velocity errors in time domain reflectometry measurements of soil water. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 59, n. 1, p. 92 – 96, 1995.

KNIGHT, J.H. Sensitivity of time domain reflectometry measurements to lateral variations in soil water content. **Water Resources Research**, Washington, v. 28, n. 9, p. 2345-2352, 1992.

NOBORIO, K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: A review. **Computers and Electronics in Agriculture**, Baltimor, v. 31, n. 3, p. 213 – 237, 2001.

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

SOUZA, C.F.; MATSURA, E.E. Determination of the wetting front in drip irrigation using TDR Multi-wire probe. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 59, n. 3, p. 205-216, 2003.

SOUZA, C.F.; OR, D.; MATSURA, E.E. A variable-volume TDR probe for measuring water content in large soil volumes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.68, n. 1, p.25-31, 2004.

VELLAME, L.M.; et al. Guia de onda para estimativa da umidade do solo pela TDR com uso de multiplexadores. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32, 2003, Goiânia. **Anais**. Goiânia: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2003. 1 CD ROM.

WINTDR. Time Domain Reflectometry soil sample analysis program. Disponível em: <<http://soilphysics.usu.edu/wintdr>>. Acesso em: 15 maio 2004.

ZEGELIN, S.J.; WHITE, I.; JENKINS, D.R. Improved fields probes for soil water content and electrical conductivity measurements using TDR. **Water Resources Research**, Washington, v. 25, n. 11, p. 2367 – 2376, 1989.