

VICTOR JACK VALDIVIA CALDERÓN

**INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DE ENSAIOS TDR PARA A
DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DOS SOLOS**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Edmundo Rogério Esquivel

São Carlos
2010

A Deus.
Aos meus queridos pais Victor Raúl e Cilda.

AGRADECIMENTOS

Aos meus queridos irmãos, Luz Venus, Luz Marcia, Victor Raúl, Luz Urana, Luz Galaxy, pelo amor, carinho, ajuda e companheirismo.

Ao meu orientador, Professor Edmundo Rogério Esquivel, pela sua orientação, compreensão, paciência e valiosos ensinamentos.

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de mestrado concedida. Ao Professor Lázaro Zuquette pela oportunidade dada de conhecer o Departamento de Geotecnia da EESC-USP e pela oportunidade de entrar no mestrado.

Ao Dr. Carlos Vaz, pela sua valiosa ajuda na execução deste trabalho, estando sempre a disposição para a solução das dúvidas durante a execução da pesquisa. Aos meus amigos e colegas da turma e do departamento, especialmente ao meu estimado amigo José Antonio.

Aos amigos da empresa Geotécnica SAC, pela grande ajuda e compreensão na minha vontade de superação.

A todos os professores do Departamento de Geotécnica da EESC pelo estímulo e amizade. Aos funcionários do Departamento de Geotecnia da EESC-USP, pelo apoio incondicional sempre que necessário.

RESUMO

CALDERÓN, V. J. V. **Interpretação dos resultados de ensaios TDR para a determinação do Teor de umidade dos solos.** 2010. 117 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

Este trabalho de pesquisa apresenta uma nova abordagem para calibrar uma sonda helicoidal TDR, usada para medir o teor de umidade do solo. Foi empregada uma aproximação tomando em consideração a interpretação física dos valores de constantes dielétricas. As equações de calibração foram determinadas mediante um Modelo Dielétrico Misto, quais relacionam a constante dielétrica da mistura multifase com a constante dielétrica e frações de volumes dessas componentes. Ensaios realizados em laboratório permitirem o desenvolvimento de duas equações de calibração para a avaliação de teor de umidade volumétrico e gravimétrico dos solos. A calibração foi executada com medições de constante dielétrica em diferentes líquidos e solos, usando uma sonda convencional TDR e a sonda helicoidal TDR. As leituras realizadas com as duas sondas foram depois comparadas. O modelo dielétrico das duas fases permitiu descrever a contribuição dos materiais dielétricos do corpo da sonda helicoidal e os materiais investigados. Mostrou-se que o conhecimento das características físicas e geométricas da sonda TDR usada nos ensaios é de crucial para garantir a qualidade das constantes dielétricas lidas, e conseqüentemente a determinação do teor de umidade *in situ*.

Palavras chave: Física do solo, Reflectometria no domínio do tempo, Teor de umidade, Constante dielétrica, Modelo Dielétrico Misto, Calibração.

ABSTRACT

CALDERÓN, V. J. V. **Interpretation of TDR test results for determining the moisture content of soil.** 2010. 117 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

The objective of this work was to calibrate a coiled TDR probe used to measure the water content of soil. It was used an approach that takes into account a physical interpretation of the values of the dielectric constants. The calibration equations were determined by means of a mixed dielectric model, which relates the dielectric constant of a multi-phase mixture with the dielectric constants and volume fractions of its components. Tests carried out in the laboratory allowed development of two calibration equations for the assessment of the volumetric and gravimetric soil water content. Calibration was performed with measurements of dielectric constants in different liquids and soils, using a conventional TDR probe and a coiled TDR. The readings performed with the two probes were then compared. The dielectric model of two phases permitted describing the contribution of the dielectric material of the body of the probe coil and the materials investigated. It has been shown that knowledge of the physical and geometrical characteristics of the TDR probe used in the tests is crucial for the quality of the dielectric constant readings, and consequently the determination of water content *in situ*.

Keywords: Soil physics, Time domain reflectometry, Soil Water Content , Dielectric Constant, Dielectric Mixing Model, Calibration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Exemplos de traços TDR (Modificado de ESQUIVEL e GIACHETI, 2007)...	31
Figura 2.2 – Exemplo de trace.....	33
Figura 2.3 - Esquema interpretação da Técnica TDR.....	34
Figura 2.4- Esquema do cabo coaxial.	34
Figura 2.5 - Esquema do equipamento TDR.....	35
Figura 2.6 – Alguns modelos de equipamentos TDR disponíveis no mercado: (a) 1502C, (b) TRIME-FM, (c) TRASE System I, (d) TDR100. Fonte: Jones et al., (2002).....	36
Figura 2.7 - Modelos de configurações de sondas (JONES et al., 2002).....	38
Figura 2.8 – Algumas sondas comumente usadas para medição do teor de umidade através da técnica TDR. (a) Sonda Coaxial, (b) Sondas de duas hastes , (c) Sonda composta por três hastes, (d) Sonda de quatro hastes (Modificado de HUGH, 1999).....	39
Figura 2.9 – Sondas TDR tradicionais desenvolvidas na EESC-USP. A) Sonda com sete hastes. B) Sonda coaxial com uma haste. C) Sonda com quatro hastes. D) Sonda com três hastes.....	40
Figura 2.10 - Esquema de interpretação da onda eletromagnética produzida por uma sonda multi-hastes segmentada.....	41
Figura 2.11 - Esquema da sonda TDR segmentada desenvolvida por Souza et al. (1996).....	42
Figura 2.12 –Sonda Helicoidal desenvolvida por Vaz e Hopmans (2001).....	44
Figura 2.13 – Detalhe Sonda Helicoidal desenvolvida por Vaz e Hopmans (2001).....	44
Figura 2.14 – Esquema da sonda concebida por Baker e Goodrich (1987).....	45

Figura 2.15 – Resultados do trabalho de Baker e Goodrich (1987).(A) Condutividade térmica versus teor de umidade volumétrico. (B) Constante dielétrica versus teor de umidade volumétrico.....	45
Figura 2.16 – Sonda helicoidal TDR utilizada no trabalho (Esquivel e Giacheti, 2007).....	46
Figura 2.17 – Esquema de detalhe da sonda helicoidal TDR (ESQUIVEL e GIACHETI, 2007).....	47
Figura 2. 18 – Comparações entre as curvas determinadas pela relação de Top et al. (1980) e o Modelo Dielétrico Misto usado por Birchak et al. (1974) - (JONES et al., 2002).....	56
Figura 2.19 – Método das tangentes (KLEMUNES, 1998).....	58
Figura 2.20– Método dos picos (KLEMUNES, 1998).....	59
Figura 2.21 – Método das linhas divergentes (KLEMUNES, 1998).....	59
Figura 2.22– Método das tangentes alternativas (KLEMUNES, 1998).....	60
Figura 2.23– Método científico de Campbell (KLEMUNES, 1998).....	61
Figura 2.24– Correlação entre θ_g e θ_l para sondas de 50 a 300 mm (TOPP et al., 1984.).....	66
Figura 2.25 – Perfis de teor de umidade comparando dados de sondas verticais e horizontais com dados obtidos a partir de coleta de amostras (TOPP ; DAVIS, 1985).....	67
Figura 2.26 – Teores de umidade obtidos no ensaio de campo para amostra S2.....	68
Figura 2.27– Teores de umidade obtidos no ensaio de campo para amostra S3.....	68
Figura 3.1 – Sonda convencional TDR.....	69
Figura 3.2 – Painel frontal do Tektronix 1502C.....	70
Figura 3.3 – Perfil geológico da região de São Carlos (DAEE, apud COSTA, 1999).....	72
Figura 3.4 – Ensaio realizados com as soluções aquosas de ácido acético.....	73

Figura 3.5 – Alguns acessórios utilizados em laboratório. (A) Conjunto composto por uma furadeira e uma haste misturadora. (B) Dispositivo de suporte utilizado nos ensaios.....	74
Figura 3.6 - Janela após a execução de um ensaio TDR.....	76
Figura 3.7 - Janela de ajuste de opções do software WinTDR.....	76
Figura 3.8– Esquema de realização dos ensaios TDR realizados com solos.....	79
Figura 3.9 – Esquema do conceito básico para o desenvolvimento do Modelo Dielétrico Misto.....	82
Figura 4.1 – Comparação entre os traços típicos para leituras na água, usando a sonda convencional e a sonda helicoidal TDR.....	87
Figura 4.2 – Correlação entre K_{ref} e K_{coil} , obtido através do Modelo Dielétrico Misto de duas fases (Nissen et al., 1998).....	88
Figura 4.3 – Dados de calibração para a sonda TDR helicoidal usando a Equação 4.1 para os 10 solos, assumindo um valor médio de porosidade igual a 0,60.....	90
Figura 4.4 – Calibração da sonda TDR incluindo as curvas obtidas a partir dos valores extremos do parâmetro α	90
Figura 4.5 – Comparação entre as calibrações feitas através da Equação 4.1 versus a Equação 2.6.....	91
Figura 4.6 – Comparação entre valores de teor de umidade volumétrico e aqueles determinados no laboratório, usando o parâmetro global α	102
Figura 4.7 – Comparação entre valores de teor de umidade volumétrico e aqueles determinados no laboratório, usando o parâmetro α para cada solo.....	102
Figura 4.8 – Comparação entre os valores do teor de umidade volumétrico estimados usando valores de porosidades determinados através da Equação 4.1 e aqueles estimados usando um valor médio de porosidade.....	103
Figura 4.9 – Erros estimados para o teor de umidade volumétrico.....	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores de α determinados (KLEMUNES,1998).....	55
Tabela 2.2 - Análises estatísticas feitos por Klemunes (1998).....	61
Tabela 3.1 – Teores de umidade e concentração de soluções com ácido acético.....	80
Tabela 3.2- Características dos solos usados por Assis (2008).....	81
Tabela 4.1 - Valores do parâmetro α	89
Tabela 4.2 – Resultados de ensaios de caracterização para o Solo 1 (ASSIS, 2008).....	92
Tabela 4.3 – Resultados correspondentes ao Solo 1.....	92
Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios de caracterização para o Solo 2 (ASSIS, 2008).....	93
Tabela 4.5 – Resultados correspondentes ao Solo 2.....	93
Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios de caracterização para o Solo 3 (ASSIS, 2008).....	94
Tabela 4.7 – Resultados correspondentes ao Solo 3.....	94
Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de caracterização para o Solo 4 (ASSIS, 2008).....	95
Tabela 4.9 – Resultados correspondentes ao Solo 4.....	95
Tabela 4.10 – Resultados dos ensaios de caracterização para o Solo 5 (ASSIS, 2008).....	96
Tabela 4.11 – Resultados correspondentes ao Solo 5.....	96
Tabela 4.12 – Resultados dos ensaios de caracterização para o Solo 6 (ASSIS, 2008).....	97
Tabela 4.13 – Resultados correspondentes ao Solo 6.....	97
Tabela 4.14 – Resultados dos ensaios de caracterização para o Solo 7 (ASSIS, 2008).....	98
Tabela 4.15 – Resultados correspondentes ao Solo 7.....	98
Tabela 4.16 – Resultados dos ensaios de caracterização para o Solo 8 (ASSIS, 2008).....	99

Tabela 4.17 – Resultados correspondentes ao Solo 8.....	99
Tabela 4.18 – Resultados dos ensaios de caracterização para o Solo 9 (ASSIS, 2008).....	100
Tabela 4.19 – Resultados correspondentes ao Solo 9.....	100
Tabela 4.20 – Resultados dos ensaios de caracterização para o Solo 10 (ASSIS, 2008).....	101
Tabela 4.21 – Resultados correspondentes ao Solo 10.....	101

LISTA DE SÍMBOLOS

w	teor de umidade gravimétrico
θ	teor de umidade volumétrico
θ_{lab}	teor de umidade volumétrico estimado
θ_{est}	teor de umidade volumétrico estimado através do Modelo Dielétrico Misto
θ_{bw}	teor de umidade volumétrico da água adsorvida
w_L	limite de liquidez
w_P	limite de plasticidade
TDR	reflectometria no domínio do tempo
K	constante dielétrica
K_{fw}	constante dielétrica da água livre contida no solo
K_{bw}	constante dielétrica da água adsorvida pelas partículas solidas do solo
K_s	constante dielétrica das partículas solidas do solo
K_{air}	constante dielétrica do ar
K_w	constante dielétrica da água
K_{soil}	constante dielétrica do solo
K_{probe}	constante dielétrica do corpo da sonda
K_{ref}	constante dielétrica lida com a sonda convencional
K_{coil}	constante dielétrica lida com a sonda helicoidal
EC_b	condutividade elétrica dos solos (S/m)
L	comprimento da haste da sonda (m)
L_a	comprimento aparente da haste da sonda (m)

V_p	velocidade de propagação do pulso eletromagnético (m/s)
c	velocidade da luz (3×10^8 m/s)
t	tempo de percurso do pulso eletromagnético (s)
Z	impedância (Ω)
V	pulso de voltagem
d	diâmetro das hastes da sonda
e	espaçamento entre as hastes da sonda
η	porosidade do solo
n_{avg}	valor médio de porosidade
n_{lab}	valor da porosidade do solo obtida em laboratório
ρ	massa específica do solo
ρ_d	massa específica seca do solo
ρ_w	massa específica da água
ρ_s	massa específica dos sólidos
G_s	gravidade específica das partículas solidas
α	parâmetro de ajuste solo – sonda
p	fator de ponderação dos materiais da sonda
β	geometria do meio em relação ao campo elétrico aplicado
V_w	volume de água
V_s	volume das partículas solidas do solo
V	volume total da amostra de solo
V_{air}	volume de ar
V_v	volume de vazios

b_w água adsorvida pelas partículas sólidas do solo

f_w água livre contida no solo

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	23
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1	MÉTODO TRADICIONAL DE SECAGEM EM ESTUFA	27
2.2	TÉCNICA DA REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO (TDR).....	28
2.2.1	FUNDAMENTO TEÓRICO DA TÉCNICA TDR.....	30
2.2.2	TESTADOR DE CABOS	34
2.2.3	SONDA TDR.....	36
2.2.4	CALIBRAÇÃO DA Sonda TDR	48
2.2.5	FATORES QUE AFETAM O VALOR DA CONSTANTE DIELÉTRICA.....	56
2.2.6	O EMPREGO DA TÉCNICA TDR EM CAMPO.....	65
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	69
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS.....	69
3.1.1	<i>Sonda TDR Helicoidal.....</i>	69
3.1.2	<i>Sonda TDR de três hastes.....</i>	69
3.1.3	<i>Testador de Cabos Tektronix 1502-C.....</i>	70
3.1.4	<i>Programa WinTDR.....</i>	71
3.1.5	<i>Amostras de Solo</i>	71
3.1.6	<i>Soluções líquidas</i>	73
3.1.7	<i>Equipamentos de laboratório</i>	73
3.2	METODO DO TRABALHO.....	74
3.2.1	<i>Processo experimental realizado em laboratório.....</i>	75
3.2.2	<i>Processo de calibração</i>	81
3.2.3	<i>Análises de resultados</i>	82
4	RESULTADOS	87
4.1	SONDA CONVENCIONAL VERSUS Sonda HELICOIDAL	87
4.2	CONSTANTE DIELÉTRICA VERSUS TEOR DE UMIDADE VOLUMÉTRICO	88
4.3	ANÁLISES NUMÉRICO DO MODELO DIELÉTRICO MISTO	91
4.3.1	<i>Resultados correspondentes ao Solo 1</i>	91
4.3.2	<i>Resultados correspondentes ao Solo 2</i>	92
4.3.3	<i>Resultados correspondentes ao Solo 3</i>	93
4.3.4	<i>Resultados correspondentes ao Solo 4</i>	94
4.3.5	<i>Resultados correspondentes ao Solo 5</i>	95
4.3.6	<i>Resultados correspondentes ao Solo 6</i>	96
4.3.7	<i>Resultados correspondentes ao Solo 7</i>	97
4.3.8	<i>Resultados correspondentes ao Solo 8</i>	98
4.3.9	<i>Resultados correspondentes ao Solo 9</i>	99
4.3.10	<i>Resultados correspondentes ao Solo 10</i>	100
4.4	O EFEITO DA POROSIDADE DO SOLO	103
4.5	INFLUÊNCIA DA PLASTICIDADE NA DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DIELÉTRICA	104
5	CONCLUSÕES.....	105
5.1	REFERÊNCIAS	107

1. INTRODUÇÃO

O teor de umidade e a massa específica seca são parâmetros utilizados na elaboração projetos geotécnicos, tais como fundações, terraplenagens, barragens, muros de contenção e taludes. Além disso, muitas propriedades dos solos, incluindo parâmetros de resistência e deformabilidade, são também dependentes do teor de umidade.

No caso específico de rejeitos saturados de mineração, medidas confiáveis acerca da alteração do teor da umidade proporcionariam uma forma de monitorar a consolidação dos materiais. Tais materiais apresentam um aspecto mole e estão presentes em barragens de rejeito. Também verifica-se a importância da confiabilidade dessas medidas para a análise do impacto desse material sobre a capacidade de conservação durante todo o período de armazenagem.

Além disso, o colapso de solos não saturados pode ser causado por infiltração de água ou alteração do teor de umidade. Assim, o estudo destes tipos de problemas requer informações sobre as condições de umidade e condutividade hidráulica do solo. Estes dois fatores relacionam-se diretamente sobre a sucção matricial e total. De tal forma que esta última influencia sobre a resistência ao cisalhamento, a compressibilidade e a condutividade hidráulica do terreno.

Os problemas acima mencionados e muitos outros exigem informações rápidas sobre o teor de umidade do solo. A determinação do teor de umidade do solo pode ser obtida em laboratório ou *in situ*. Dentre os métodos para determinação do teor de umidade em laboratório, o mais usual é o método de secagem em estufa, que determina o teor de umidade através da pesagem e secagem de amostras em uma estufa. Esse método é considerado um método padrão, devido à sua acurácia e simplicidade. No entanto, essa técnica torna-se

insatisfatória em situações nas quais se necessita de rapidez na obtenção dos resultados e quando há um grande volume de determinações a serem feitas. Um exemplo é o caso do monitoramento contínuo de um maciço em diversos locais e em diferentes profundidades.

Apesar de existirem diversas técnicas para a determinação do teor de umidade em campo, a aplicação da técnica de reflectometria no domínio do tempo TDR tem se mostrado a mais promissora. Esta técnica permite eliminar algumas das limitações atribuídas a outros métodos na obtenção do teor de umidade, permitindo monitorar o teor de umidade do solo em seus diversos estágios, ao longo do tempo e com a variação da profundidade (ASSIS, 2008).

A técnica TDR pela sua natureza não destrutiva é essencial para o monitoramento e pesquisas em relação à resposta da dinâmica hidrológica (WEILER; TAMMO; JAN BOLL, 1998. *Apud* DIENE, 2004). No entanto, a maioria dos sistemas TDR tem sido desenvolvida para fins agrícolas, sendo que as sondas são adequadas para medição do teor de umidade apenas em camadas superficiais do solo. Caso essas sondas fossem utilizadas para determinar os teores de umidade ao longo da profundidade de um solo não saturado, seria então necessário abrir poços para a instalação de sondas nas cotas desejadas. Assim, seriam restritos os pontos amostrados no perfil do solo. Conseqüentemente, é necessária uma sonda TDR que seja capaz de ser inserida em diferentes profundidades do solo, proporcionando medições confiáveis do teor de umidade do solo.

A concepção da sonda helicoidal TDR para fins geotécnicos desenvolvida por Esquivel e Giacheti (2007) foi avaliada. A principal vantagem desta sonda é que ela pode ser usada para determinar o teor de umidade gravimétrico ou volumétrico, em diferentes profundidades do solo. Comparado com a sonda padrão TDR, com hastes em linha reta, a nova sonda consiste em duas tiras de cobre paralelas enroladas em torno de um núcleo de açonylon.

O presente trabalho pretende mostrar a viabilidade de desenvolver um sistema capaz de estimar o teor de umidade, tanto gravimétrico (w) como volumétrico (θ) dos solos. Foi realizada a calibração da sonda helicoidal TDR através da utilização de um Modelo Dielétrico Misto. Por meio de ensaios realizados em laboratório foi possível desenvolver duas abordagens que permitiram relacionar, de forma satisfatória, a constante dielétrica com o teor de umidade do solo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os métodos de determinação do teor de umidade do solo são normalmente classificados como diretos ou indiretos. Os métodos diretos envolvem alguma forma de remoção ou separação da água da matriz do solo, medindo diretamente a quantidade de água removida, o que pode ser obtido por aquecimento, por utilização de solvente ou por reação química. Os métodos indiretos determinam alguma propriedade física ou química relacionada à umidade do solo, como constante dielétrica (ou permissividade dielétrica), condutividade elétrica, capacidade térmica, conteúdo de hidrogênio ou susceptibilidade magnética (TOPP; FERRE, 2002). Neste capítulo, serão abordados os métodos utilizados para a determinação de teor de umidade do solo no desenvolvimento do presente trabalho.

2.1 Método tradicional de secagem em estufa

O método de secagem em estufa consiste na retirada de amostras do solo que, após serem hermeticamente embaladas, são enviadas ao laboratório. Frações representativas das amostras são então depositadas em capsulas metálicas, pesadas e postas para secar na estufa a uma temperatura de 105 °C. Após 24 horas, as amostras secas são pesadas novamente e obtém-se a massa de água através da diferença entre massas. O teor de umidade gravimétrico (w) é definido como a relação entre a massa de água e a massa de solo. As principais vantagens desse método são:

- Acurácia nos resultados;
- Simplicidade do processo de execução e determinação do teor de umidade;
- Maior economia em comparação aos outros métodos;

Por outro lado, suas principais desvantagens são:

- Necessitar da escavação de poços para a retirada de amostras nas cotas desejadas – esse procedimento além de ser demorado, pode permitir a perda de umidade na manipulação das amostras;

- Ser de natureza destrutiva;
- Não ser automatizado – impossibilitando a monitoração do teor de umidade durante um intervalo de tempo.

2.2 Técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR)

A técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) é um método moderno utilizado para a determinação do teor de umidade do solo. Essa técnica foi empregada inicialmente pelas companhias telefônicas e de energia elétrica para testar possíveis falhas em suas linhas de transmissão (RAMO *et al.*, 1994). Mais tarde, foram atribuídas outras aplicações a essa técnica.

Segundo Tommaselli e Bacchi (2001) os primeiros estudos acerca das propriedades dielétricas dos líquidos e, posteriormente de outros materiais, inclusive o solo, foram feitos por Fellner-Feldegg (1969). Entretanto, foi De Loor (1964) quem utilizou inicialmente a técnica TDR.

Na década de 70, foram então iniciadas pesquisas com intuito de se adaptar essa técnica para estudos em solos, buscando a determinação do teor de umidade que se correlaciona com a constante dielétrica do solo. A determinação do teor de umidade através da técnica TDR foi pioneiramente introduzida por Davis e Chudobiak (1975) e implementado e validado por Topp *et al.* (1980). Desde então, a aplicação da técnica TDR para esse fim tem sido bastante difundida e utilizada, principalmente na agronomia. Para fins geotécnicos, a aplicação da técnica TDR foi pioneiramente empregada por Kujala e Ravaska (1994). Tais pesquisadores realizaram comparações entre valores de teor de umidade volumétrico, determinados através da técnica de TDR e da técnica que utiliza uma sonda de nêutrons, ao longo de um perfil de solo. Benson *et al.* (1994) empregaram a técnica TDR para controlar a umidade de tapetes impermeabilizantes em aterros sanitários. Dowding e Huang (1994)

aplicaram para monitorar as deformações em maciços rochosos e medir do nível do lençol freático.

No Brasil, um dos primeiros estudos utilizando a técnica TDR, especificamente para a medida do teor de umidade do solo foram os estudos de Herrmann Jr. (1993) e os de Tommaselli e Bacchi (1995). Posteriormente, Conciani *et al.* (1996) utilizaram a técnica para medir a umidade e estimar a sucção do solo durante provas de carga de fundações.

A técnica TDR se baseia na medição do tempo de deslocamento t (ns) de uma seqüência de pulsos, que apresentam harmônicos na faixa de frequência de microondas, enviados a uma linha de transmissão (antena) (TOMMASELLI; BACCHI, 2001). As principais vantagens da técnica TDR são:

- Permitir leituras contínuas em tempo real;
- Ser de natureza não destrutiva;
- Possuir grande exatidão de resultados, entre 1 e 2% de teor de umidade;
- Fácil calibração, ressaltando que em muitos solos a calibração não é necessária;
- Não oferecer riscos radioativos (OR *et al.*, 2004), diferentemente do método da moderação de nêutrons,
- Resolução espacial e temporal satisfatória;
- Determinar uma média ponderada espacial do teor de umidade, cobrindo todo o comprimento da sonda;
- Medidas de simples obtenção e possibilidade de coletá-las automaticamente.

Uma das grandes vantagens da técnica TDR é a possibilidade de automação do processo de leituras. Torre (1995, apud CONCIANI *et al.*, 1996) desenvolveu um sistema para aquisição e transferência de dados (por radio e/ou telefone) aplicados para esta técnica. Este

sistema permitiu, por exemplo, monitorar a umidade de um campo agrícola situado a distância de aproximadamente 150 km da base onde os dados foram analisados.

2.2.1 Fundamento teórico da técnica TDR

O testador de cabos é um equipamento que possui um gerador de pulsos – o qual envia um sinal eletromagnético de alta frequência ao longo do cabo, a uma velocidade de propagação V_p (que é função da constante dielétrica do cabo). Este pulso é refletido de volta quando encontra uma descontinuidade, ou seja, uma variação de impedância. O testador de cabos capta, então, esta reflexão e determina o tempo de percurso do sinal. O conhecimento da velocidade de propagação do pulso e do tempo de percurso permite calcular a distância da obstrução, falha ou variação de impedância. As propagações refletidas do sinal, associadas ao tempo decorrido, permitem a localização do ponto de ruptura do cabo.

Usando princípios semelhantes, a técnica TDR pode ser utilizada para a determinação do teor de umidade do solo. Nesse caso, é medida a velocidade de propagação de um pulso eletromagnético que percorre o comprimento da sonda, ou o tempo que um pulso leva para percorrer um par de barras paralelas (hastes da sonda) inseridas no solo. O tempo de percurso depende da constante dielétrica do meio no qual a sonda está imersa. Como o comprimento da trajetória é o dobro do comprimento da sonda, medindo-se o tempo de percurso do pulso, pode-se determinar a velocidade de sua propagação (JONES et al., 2002):

$$V_p = \frac{2L}{t} \quad (2.1)$$

onde

V_p = velocidade de propagação do pulso

L = comprimento da haste

t = tempo de percurso

Pela Teoria do Eletromagnetismo tem-se:

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{K}} \quad (2.2)$$

onde

c = velocidade da luz

K = constante dielétrica do meio

Combinando (2.1) e (2.2) resulta:

$$K = \left(\frac{c}{V_p} \right)^2 = \left(\frac{ct}{2L} \right)^2 \quad (2.3)$$

O tempo de percurso é avaliado a partir do comprimento aparente (L_a) da haste da sonda, o qual é igual à distância obtida pela diferença entre a reflexão inicial e final do pulso eletromagnético. Essas reflexões são geradas no começo e no final da sonda TDR inserida no solo. A Figura 2.1 mostra exemplos de formas de ondas TDR para diferentes valores de teor de umidade.

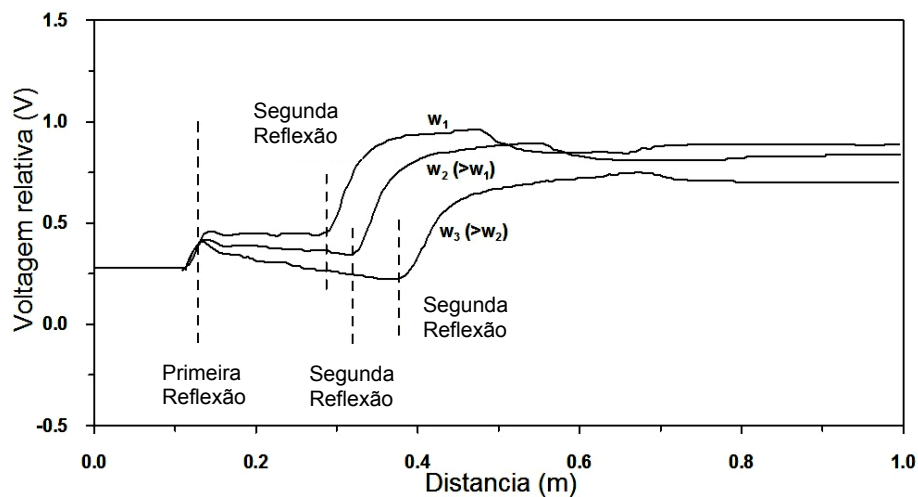


Figura 2.1 – Exemplos de traços TDR (Modificado de ESQUIVEL; GIACHETI, 2007).

A constante dielétrica ou permissividade elétrica (K) é um número complexo. Entretanto, no caso da técnica TDR para a determinação do teor de umidade do solo, é considerada apenas a parte real. Como consequência, a constante dielétrica determinada é

referida como constante dielétrica (K). A parte imaginária da constante dielétrica está relacionada com a condutividade elétrica do solo, podendo ser utilizada no estudo da salinidade dos solos. (ROTH et al., 1990).

A constante dielétrica do solo é consideravelmente afetada pela constante dielétrica da água presente no solo, que é igual a 80 para uma temperatura de 20 ° C. As constantes dielétricas de outros elementos constituintes do solo são muito menores, variando de 3 a 5. A grande diferença entre os valores de constante dielétrica da água e das partículas sólidas faz com que a constante dielétrica do solo dependa fortemente da quantidade de água no solo e seja relativamente insensível à sua composição e granulometria. Assim, é possível correlacionar a medida da constante dielétrica do solo com seu teor de umidade. As correlações são referidas como equações de calibração.

Uma outra alternativa para a determinação da constante dielétrica do solo é empregar um aparelho que forneça a distância virtual entre o início e o final da sonda percorrida, através de um sinal de características conhecidas. Este aparelho (geralmente um testador de cabos) emite e recebe o sinal eletromagnético com uma velocidade de propagação conhecida, convertendo o tempo despendido no trajeto num comprimento virtual. Neste caso, emprega-se a Equação 2.4 para o cálculo da constante dielétrica (CONCIANI et al., 1996).

$$K = \left(\frac{L_a}{LV_p} \right)^2 \quad (2.4)$$

onde,

L = comprimento da sonda

V_p = velocidade de propagação do sinal eletromagnético no meio

L_a = comprimento aparente da sonda (determinado no aparelho, conforme Figura 2.2)

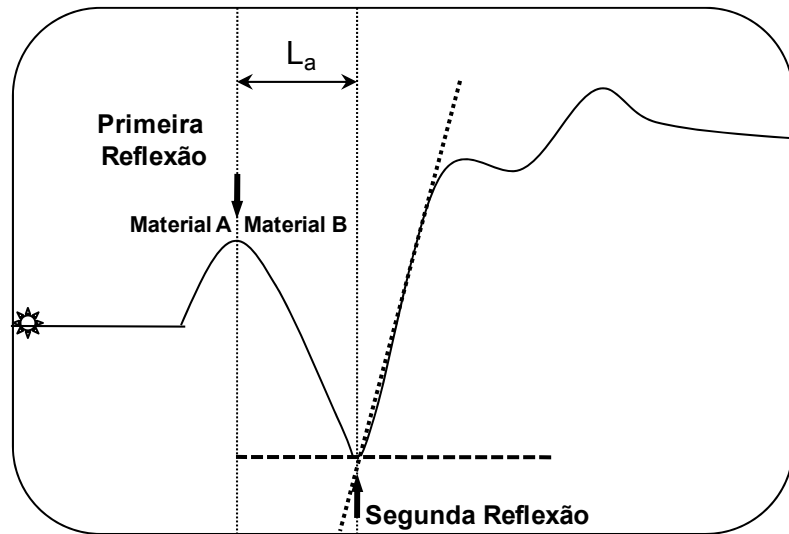


Figura 2.2 – Exemplo de trace.

O testador de cabos é conectado a um cabo coaxial que, por sua vez, possui em seu extremo uma sonda metálica TDR (Fig. 2.3). Como a sonda é inserida ao solo, o seu potencial é de zero volt. Os pulsos eletromagnéticos produzidos pelo gerador de pulso são lançados pelo condutor do cabo coaxial com uma voltagem de 0,225 V, entre o fio condutor e a malha que o envolve (Fig. 2.4). A velocidade de percurso dessa onda varia de acordo com o tipo de material do cabo. Caso a onda seja transmitida pelo vácuo, sua velocidade é igual à velocidade da luz; caso seja transmitida por um material de polietileno, ela será 66% da velocidade da luz (TEKTRONIX USER MANUAL, 1999). A Figura 2.3 mostra um esquema do equipamento apresentado e de um sinal típico através da técnica TDR.

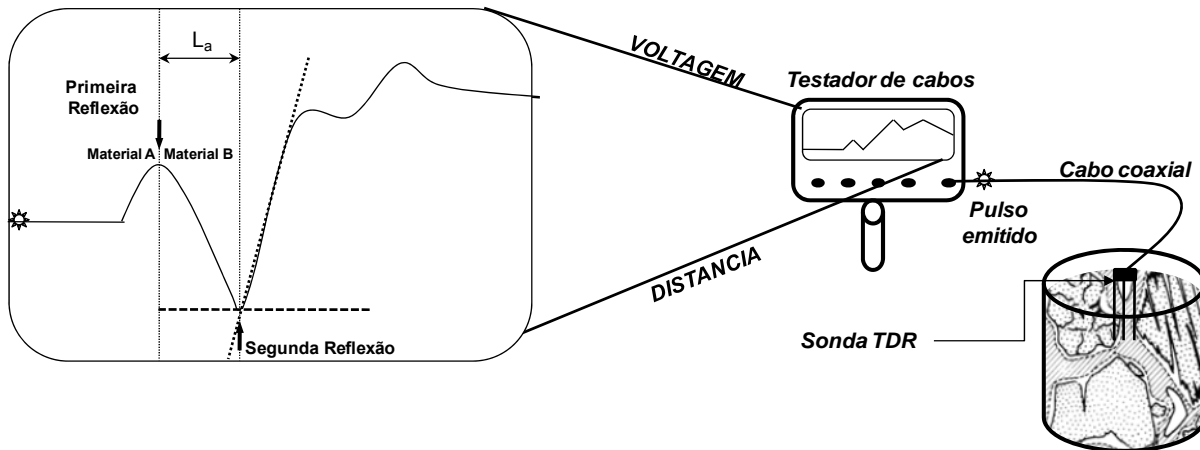


Figura 2.3 - Esquema interpretação da Técnica TDR.

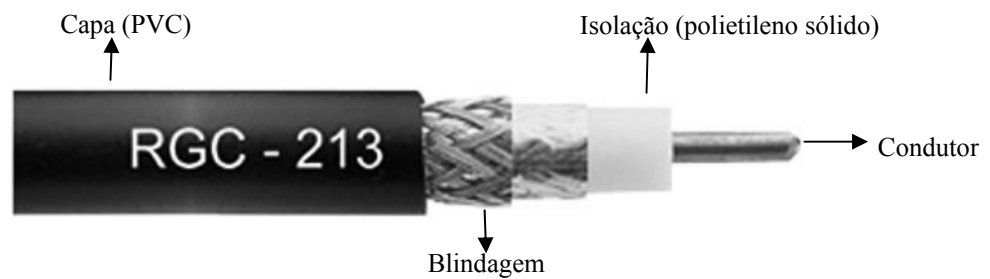


Figura 2.4- Esquema do cabo coaxial – fonte (<http://www.jet.com.br/casadasantenas/>)

2.2.2 Testador de cabos

O equipamento para emissão de pulsos eletromagnéticos é comercialmente denominado como testeador de cabos, que é composto basicamente por gerador de pulsos, amostrador e um osciloscópio que permite visualizar o sinal gerado. Todos estes três componentes são montados em um único instrumento (Figura 2.5).

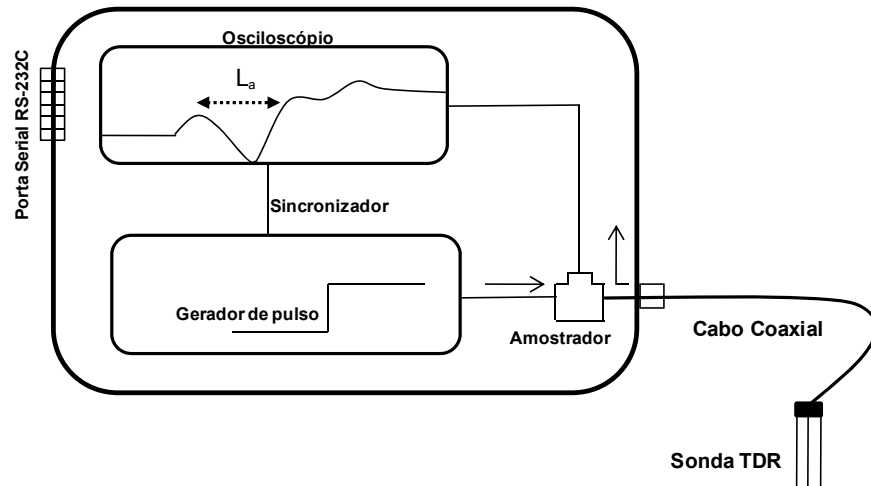


Figura 2.5 - Esquema do equipamento TDR.

O pulso emitido pelo gerador de pulso se propaga num meio constituído por diferentes materiais. Uma parte do sinal gerado pelo aparelho é refletida cada vez que encontrar um novo material ou uma alteração de impedância, enquanto que a outra parte continuará o trajeto através da linha de transmissão. Assim, torna-se possível uma identificação clara das diversas partes constituintes da linha de transmissão. O osciloscópio permite a visualização do sinal através de um gráfico, cujo eixo das abscissas representa o tempo de percurso e o eixo das ordenadas, a voltagem do sinal.

O amostrador é formado por dois componentes: um contador de tempo e um voltímetro, ambos de alta precisão. Quando os pulsos eletromagnéticos do gerador de pulso forem detectados pelo amostrador, este irá analisar o tempo de percurso das ondas entre o condutor e a malha, relacionando assim a voltagem em função do tempo de percurso.

A forma da onda do pulso eletromagnético é visualizada por um osciloscópio, aparelho com tela de cristal líquido, que coleta as medidas de voltagem e tempo obtidas por meio do amostrador.

A Figura 2.6 mostra alguns modelos de equipamentos TDR encontrados no mercado.

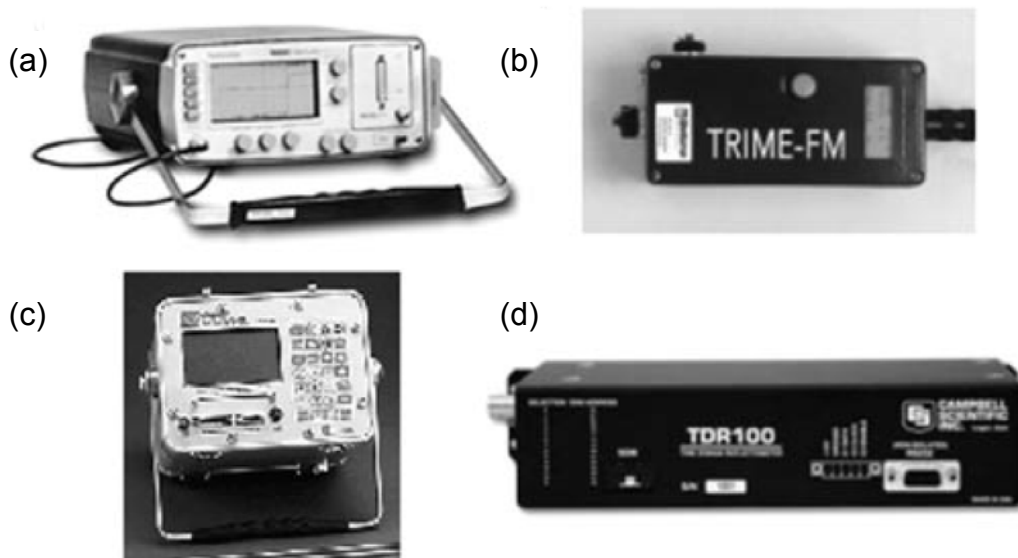


Figura 2.6 – Alguns modelos de equipamentos TDR disponíveis no mercado: (a) 1502C, (b) TRIME-FM, (c) TRASE System I, (d) TDR100. Fonte: Jones et al., (2002).

2.2.3 Sonda TDR

O sucesso da técnica TDR depende primordialmente da sonda empregada. As sondas que utilizam a técnica TDR geralmente são constituídas de uma base não condutora, onde são acopladas hastes metálicas, sendo uma delas o condutor e a outra o terra.

O diâmetro (D) e o espaçamento (e) das hastes de uma sonda constituem os parâmetros que determinam o volume de solo que contribui efetivamente para a medida da constante dielétrica. Segundo Petersen et al. (1995), o espaçamento é a variável de maior influência. Knight (1992) recomenda que o diâmetro da haste seja o maior possível em relação ao espaçamento, de modo a minimizar a concentração de energia em torno desta (*skin effect*). Isto representa um dilema, uma vez que quanto maior o diâmetro da haste, mais perturbação ao solo será causada no momento da cravação. Knight (1992) sugere uma razão espaçamento sobre diâmetro não superior a 10. Entretanto, Zegelin et al. (1989) testaram modelos de sonda com e/D variando de 3 a 21, levando à conclusão de que não houve alteração nesta faixa.

Com o objetivo de desenvolver sondas com características similares a cabos coaxiais, Zegelin *et al.* (1989) desenvolveram a idéia de sondas multi-hastes, dispostas de forma radial. Em torno de uma haste central são colocadas mais três ou quatro hastes. A aplicação desse tipo de sonda delimita melhor a região de medida e reduz os ruídos e reflexões nas leituras da constante dielétrica. Segundo Conciani *et al.* (1996) as sondas bi-haste geram um campo excêntrico, amplo e irregular, portanto uma medida menos confiável.

De acordo com Jones *et al.* (2002), foram Campbell (1990) e Heimovaara (1994) que usaram sondas com sete hastes, para medir a constante dielétrica de solos e líquidos. Um número de configurações geométricas diferentes foi proposto, tendo um único condutor central e de uma a seis hastes exteriores. White e Zegelin (1995) afirmam que sondas com três ou mais hastes fornecem um sinal equilibrado, enquanto que as sondas de duas hastes tem a vantagem de minimizar a perturbação do solo, mas podem produzir um sinal desequilibrado ou perdas de sinal (WHITE E ZEGELIN, 1995). Ferre *et al.* (1998) constatou que medições de constante dielétrica realizadas com sondas de duas hastes proporcionam resultados mais confiáveis comparadas com as sondas de três hastes. O autor também assinala que as sondas com duas hastes diminuem os erros nas medições de constante dielétrica, por exemplo, na criação de lacunas de ar que podem ser originadas quando as sondas são repetidamente inseridas e removidas no solo. Embora não seja comumente utilizado em solos, a sonda de placas paralelas, mostrada por Robinson e Friedman (2000), fornece um campo elétrico uniforme entre as placas.

Na figura 2.7 são apresentados os esquemas da distribuição dos campos magnéticos para diferentes modelos de sondas TDR.

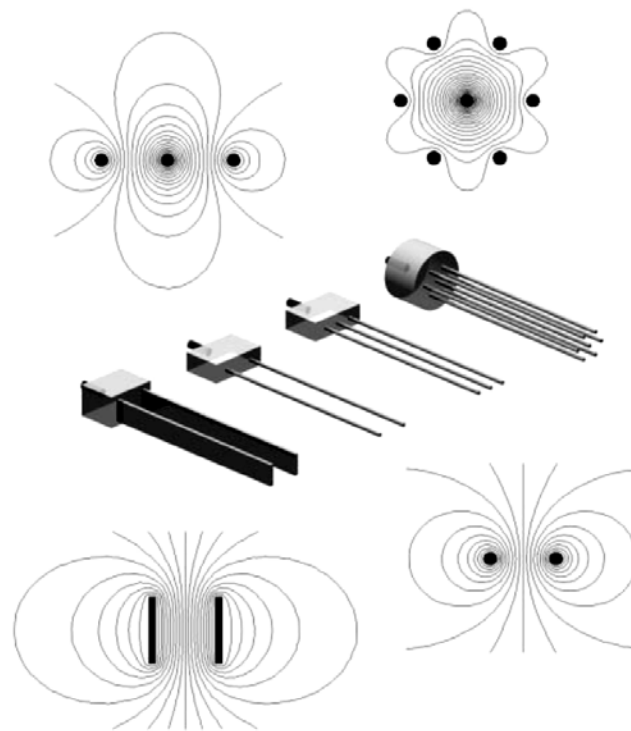


Figura 2.7 - Modelos de configurações de sondas (JONES et al., 2002).

Segundo Jones et al. (2002) “As sensibilidades das diferentes configurações de sondas podem ser usadas como uma vantagem em aplicações específicas”, como por exemplo:

- Sondas bi-haste – são utilizadas correntemente *in situ*, pois são mais fáceis de serem fabricadas e inseridas no material;
- Sondas tri-haste – têm vantagem sobre as precedentes por possuírem uma geometria que conduz a uma melhor definição do volume de medida.
- Sondas coaxiais – são utilizadas para os experimentos controlados em laboratório.

Segundo Hugh (1999), utilizando essas sondas, a quantidade de água armazenada dentro de um volume integral de solo é perfeitamente definível. A Figura 2.8 mostra os modelos de sondas anteriormente mencionadas.

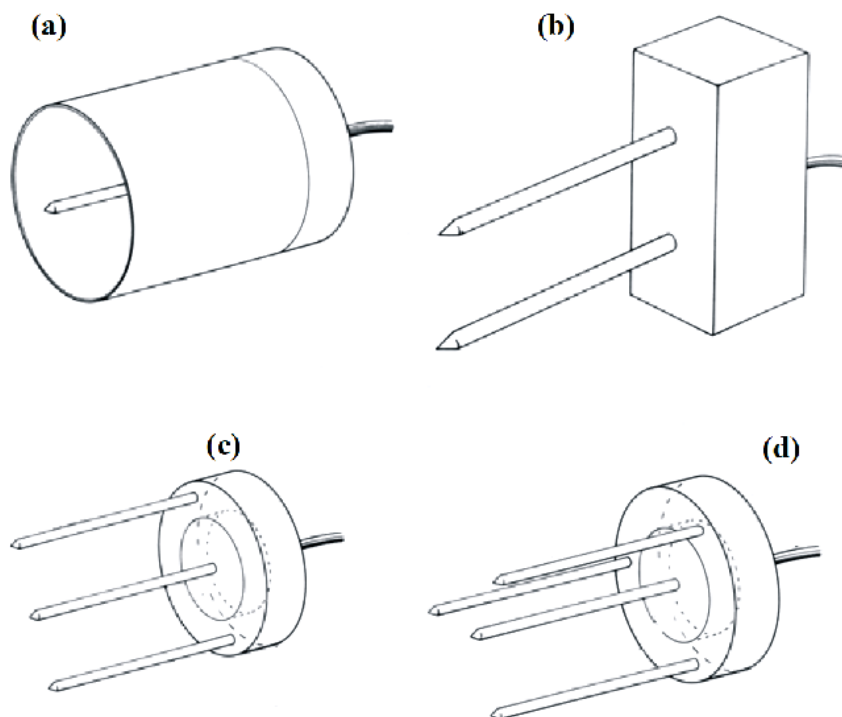


Figura 2.8 – Algumas sondas comumente usadas para medição do teor de umidade através da técnica TDR. (a) Sonda Coaxial, (b) Sondas de duas hastes, (c) Sonda composta por três hastes, (d) Sonda de quatro hastes (Modificado de HUGH, 1999).

Além das sondas tradicionais citadas anteriormente, alguns trabalhos relatam o desenvolvimento de alguns modelos de sondas (TOPP et al., (1980); ZEGELIN et al., (1989); SELKER et al., (1993); HEIMOVAARA (1994); NISSEN et al., (1998); VAZ e HOPMANS (2001); PERSSON e WRAITH (2002); SOUZA e MATSURA (2002); ANDRADE et al., (2003); ESQUIVEL e GIACHETI (2007), entre outros). Na figura 2.9 são apresentados alguns tipos de sondas TDR desenvolvidas na EESC-USP.



Figura 2.9 – Sondas TDR tradicionais. A) Sonda com sete hastes. B) Sonda coaxial com uma haste. C) Sonda com quatro hastes. D) Sonda com três hastes.

TOPP et al. (1982) através da determinação da reflexão de ondas eletromagnéticas, propuseram um tamanho para o comprimento das hastes da sonda TDR que seria da ordem de 30 cm. Tal medida é para que, na averiguação da frente de molhamento do solo, este não dificulte sua inserção no terreno. Noborio et al. (1996) determinaram a variação temporal e espacial do volume umedecido e da infiltração acumulada no solo, utilizando sondas curtas, com comprimento ≤ 30 cm, inseridas verticalmente em colunas de solo. Os resultados obtidos foram muito semelhantes aos obtidos por Topp et al. (1982).

Topp e Davis (1985) avaliaram o desempenho de sondas contínuas e segmentadas, instaladas vertical e horizontalmente num perfil de solo argiloso. As sondas contínuas são aquelas que apresentam hastes com diâmetro e espaçamento constante, para que não haja alteração de impedância. A impedância da sonda (linha de transmissão coaxial) é fornecida pela seguinte equação. (CONCIANI et al., 1996).

$$Z = \frac{60}{\sqrt{K}} \ln \frac{2s}{d} \quad (2.5)$$

Sendo: $Z =$ impedância.

s = espaçamento das hastes

d = diâmetro das hastes

K = constante dielétrica

A sonda multi-haste segmentada consiste de um sensor com hastes 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 hastes como são mostrados no gráfico (Figura 2.10). Na verdade, a sonda segmentada funciona como se fossem diversas sondas empilhadas em profundidades diferentes. Na figura 2.10, observa-se que X_1 é a distancia percorrida no inicio da sonda (logo após o final do cabo coaxial) e X_5 é a distância percorrida no final da sonda, e os picos coincidem com o centro do trecho intermediário de diâmetro menor.

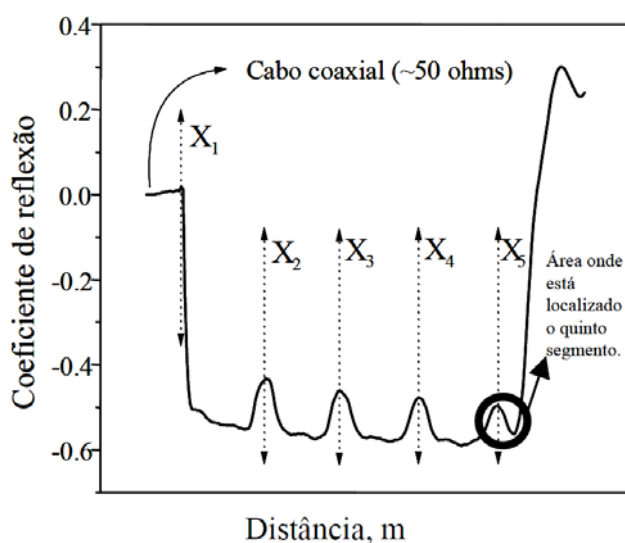


Figura 2.10 - Esquema de interpretação da onda eletromagnética produzida por uma sonda multi-hastes segmentada.

Souza et al. (2006) desenvolveram sondas multi-haste segmentadas, as quais foram fabricadas em latão, com exceção dos trechos intermediários de diâmetro menor, que são de aço inoxidável (Figura 2.11). Segundo esses autores, a limitação do uso deste tipo de sondas é devido ao fato de que o último segmento não apresenta seu término evidenciado (Figura

2.10), o que prejudica a estimativa da umidade. Por esse motivo, a leitura do último segmento geralmente é desprezada.

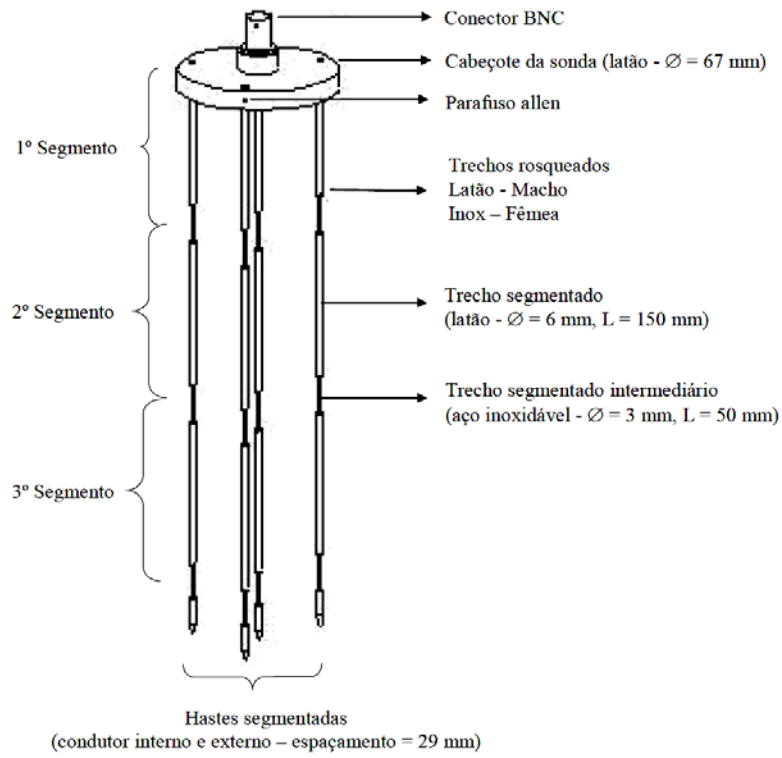


Figura 2.11 - Esquema da sonda TDR segmentada desenvolvida por Souza et al. (1996).

Conciani et al. (1996) destaca a importância da sonda segmentada paralela de duas hastes, que consiste em uma sonda com trechos distintos de impedância facilmente obtidos pela variação dos diâmetros das hastes. Essa característica permite o emprego de uma única sonda para medir o teor de umidade em diversas profundidades de um perfil do solo.

Selker et al. (1993) introduziu a idéia de criar uma sonda do tipo helicoidal, fixando o condutor e os fios terra da sonda TDR dentro de uma placa acrílica, o que permite a miniaturização das sondas de TDR para medições de alta resolução espacial.

Nissen et al. (1998) desenvolveram uma sonda para ensaios em menores escalas (comprimento de 15 mm e diâmetro de 3,6 mm), aplicável a aparelhos de TDR. O tempo de percurso do pulso eletromagnético foi prolongado forçando-o a passar por quatro hastes

dispostas de forma helicoidal como se fosse uma bobina. Devido ao pequeno comprimento da sonda, sua forma helicoidal fez com que o tempo de percurso da onda fosse prolongado. Esse prolongamento da onda melhorou sua visibilidade, o que veio a facilitar a identificação dos pontos de inflexão. Baseado na sensibilidade para mudanças da constante dielétrica, a sonda helicoidal se iguala à sonda comum, porém com um tempo de percurso cinco vezes maior.

Baseado no conceito do aumento do tempo de percurso do pulso eletromagnético proposto pela sonda helicoidal de Nissen *et al.* (1998), Vaz e Hopmans (2001) projetaram, construíram e avaliaram uma sonda helicoidal TDR, a ser usada combinada a um penetrômetro. Este aparato seria usado para determinar o teor de umidade e a resistência à penetração ao longo de um perfil de solo em campo (Figura 2.12).

A sonda helicoidal desenvolvida por Vaz e Hopmans (2001) tem dois fios de cobre paralelos (um terra e um condutor) com 0.8 mm de diâmetro e 30 cm de comprimento disposto em forma de hélice ao longo de um núcleo de PVC com 5 cm de comprimento (Figura 2.13), com uma distância de 3 mm entre os dois fios. Um cabo coaxial de 50 Ω com 2,5 m de comprimento é passado por meio do centro do penetrômetro até a sonda na ponta do penetrômetro, e conectado a um testador de cabo (Tektronix 1502C). Os fios de cobre são envolvidos com resina epóxi e possuem passo de 2 mm. A resina tem o objetivo de homogeneizar o corpo da sonda evitando surgimento de irregularidades entre os fios. Tais irregularidades podem causar danos no momento da inserção da sonda no solo. As medidas do cone de penetração satisfazem aos padrões da Sociedade Americana de Engenharia de Agronomia. Vaz e Hopmans (2001) concluíram que a sonda helicoidal, acoplada ao penetrômetro, fornece medidas de resistência à penetração e de teor de umidade com bastante acurácia.



Figura 2.12 –Sonda Helicoidal desenvolvida por Vaz e Hopmans (2001).

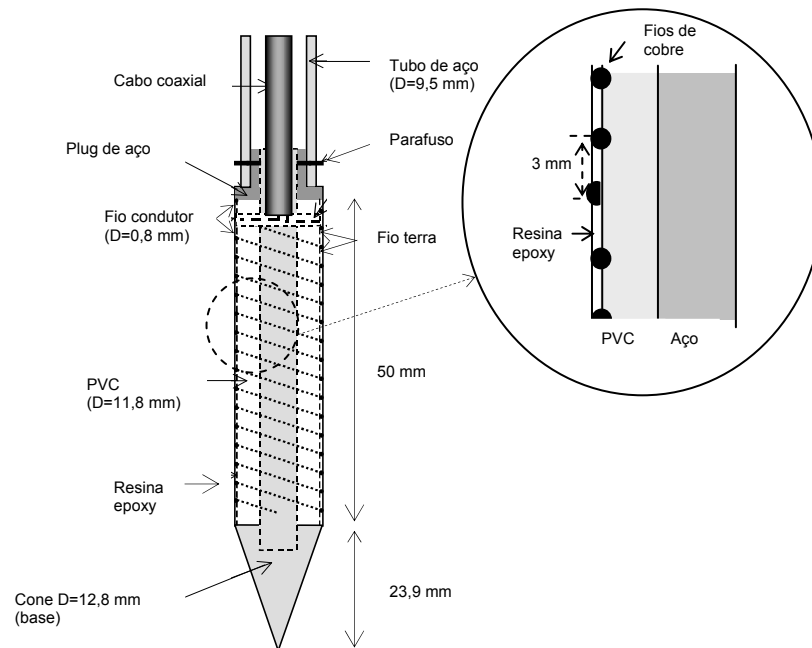


Figura 2.13 – Detalhe Sonda Helicoidal desenvolvida por Vaz e Hopmans (2001).

Foram também desenvolvidos alguns modelos de sonda que podem ser classificados como “especiais”, pois fornecem medidas de outros parâmetros do solo, além da constante dielétrica. Por exemplo, Baker e Goodrich (1987) produziram um tipo de sonda paralela que também funciona como um aparelho que mede a condutividade térmica do solo (Figura 2.14). A sonda consiste em duas hastes de aço inoxidável, uma das quais possui um resistor em seu interior. Resultados da boa concordância dos resultados são mostrados na Figura 2.15.

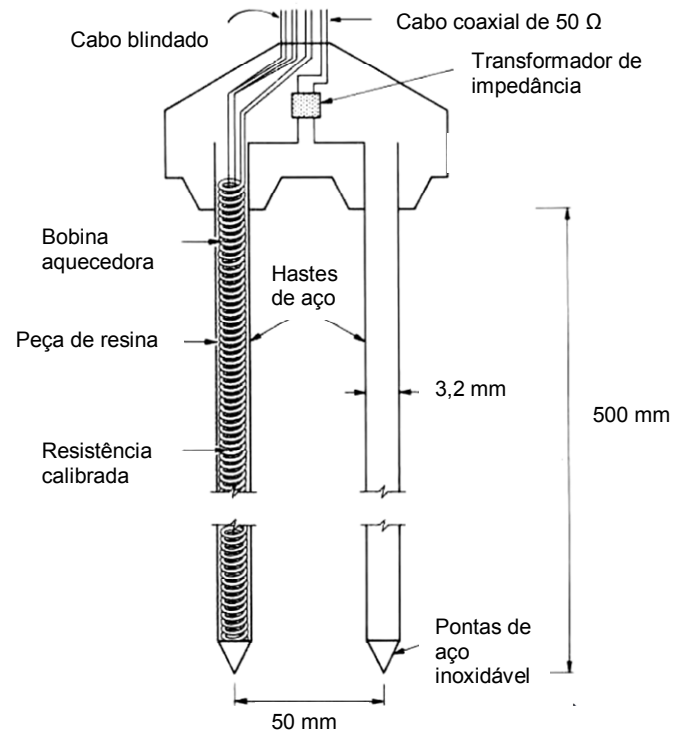


Figura 2.14 – Esquema da sonda concebida por Baker e Goodrich (1987).

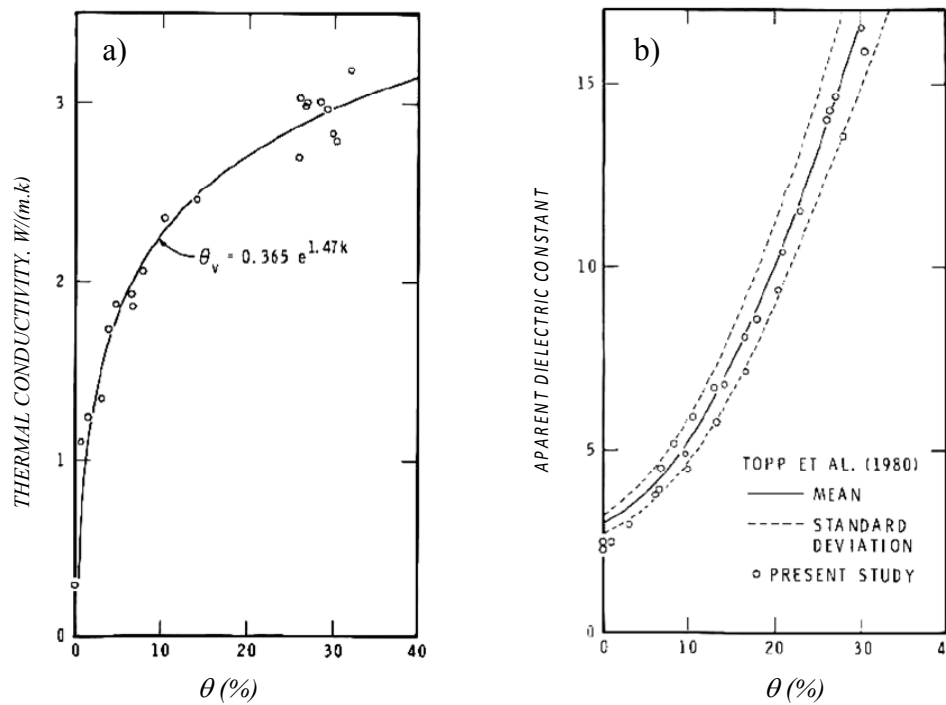


Figura 2.15 – Resultados do trabalho de Baker e Goodrich (1987). (a) Condutividade térmica versus teor de umidade volumétrico. (b) Constante dielétrica versus teor de umidade volumétrico.

Baumgartner et al. (1994) desenvolveram uma sonda que permite, além de medidas do teor de umidade do solo, medidas de sucção matricial e de concentração de solutos. Com 131 mm de comprimento, a haste da sonda é oca e possui em sua extremidade inferior uma parte permeável de 25 mm de comprimento, assemelhando-se a um tensiômetro. A sucção matricial é medida através de um transdutor de pressão, acoplado à extremidade superior da haste.

A sonda utilizada no presente trabalho (Figura 2.16), que foi desenvolvida por Esquivel e Giacheti (2007) para fins de engenharia geotécnica, é capaz de determinar o teor de umidade. Nessa sonda, os eletrodos de transmissão são enrolados em um núcleo de nylon, que por sua vez é montada em um núcleo de aço. Os eletrodos terra e condutor, separados por 30 mm, são fixados no núcleo de nylon com resina epóxi. O diâmetro da sonda é o mesmo de uma ponteira CPTU padrão de 10 cm² de área. Isto torna possível a utilização do penetrômetro CPTU e de hastes para a penetração da sonda no solo. Cada eletrodo de transmissão tem 280 mm de comprimento e apresenta uma secção retangular com uma área de 10 mm² (Figura 2.17). A sonda TDR é conectada ao testador de cabos através de um cabo coaxial de 50 Ω.



Figura 2.16 – Sonda helicoidal TDR utilizada no trabalho (ESQUIVEL; GIACHETI, 2007).

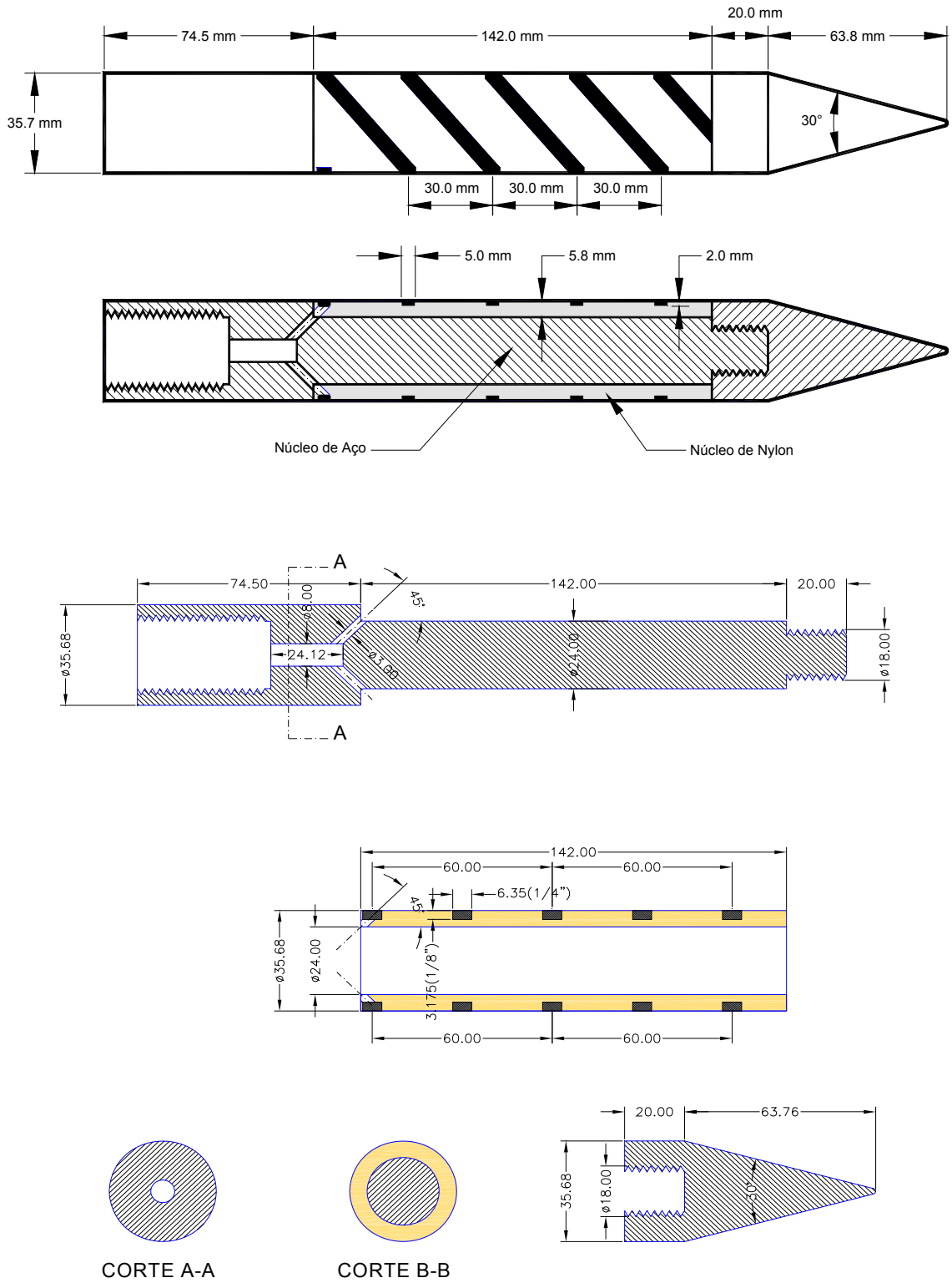


Figura 2.17 – Esquema de detalhe da sonda helicoidal TDR (ESQUIVEL; GIACHETI, 2007).

2.2.4 Calibração da Sonda TDR

Para a estimativa do teor de umidade dos solos através medições de constante dielétrica utilizando a técnica TDR, é necessário realizar calibrações das sondas utilizadas. Essas calibrações são realizadas por meio de correlações entre a constante dielétrica (K) e o teor de umidade, seja este gravimétrico (w) ou volumétrico (θ).

Para calibrar as sondas TDR duas abordagens diferentes têm sido utilizadas para correlacionar a constante dielétrica do solo com teor de umidade:

- Modelos empíricos
- Modelos Mistos Dielétricos

2.2.4.1 Modelos Empíricos

Na primeira abordagem, as correlações são matematicamente determinadas pelo ajuste de uma curva aos pontos de dados experimentais. Este método, no qual não há preocupação de interpretar os fenômenos físicos, foi usado pela primeira vez por Wobschall (1977). Este autor utilizou uma função polinomial de segunda ordem para correlacionar a constante dielétrica do solo com o teor de umidade volumétrico. Posteriormente, Topp *et al.* (1980), sugeriram uma função polinomial de terceira ordem para correlacionar a constante dielétrica (K) do solo e o teor de umidade volumétrico (θ). Tal correlação (Equação 2.6) ficou conhecida como relação universal, pois se acreditava que serviria para qualquer tipo de solo.

$$\theta = -5,3 \times 10^{-2} + 2,92 \times 10^{-2} K - 5,5 \times 10^{-4} K^2 + 4,3 \times 10^{-6} K^3 \quad (2.6)$$

Segundo esses autores, ao usar essa correlação o erro estimado para a determinação de θ é de próximo de 0,013. A maior vantagem deste processo de calibração é que parâmetros adicionais do solo não são necessários. No entanto, sua eficácia não foi demonstrada para todos os possíveis intervalos de umidades e porosidade (ROTH *et al.*, 1990).

De acordo com Jones *et al.* (2002) essa relação é adequada para teores volumétricos de umidade inferiores a 0,5. No entanto, a Equação 2.6 demonstra falhas para as leituras de

constante dielétricas com teores de umidade volumétrica superiores a 0,5, assim como para solos com alto teor de matéria orgânica e argilas.

Especial atenção centrou-se no efeito da massa específica do solo e a porosidade nas medições da K , através da técnica TDR. Siddiqui e Drnevich (1995) e Siddiqui et al. (2000) sugeriram uma correlação entre o teor de umidade gravimétrico e \sqrt{K} , considerando a massa específica seca do solo, conforme mostrado a seguir:

$$\sqrt{K} \frac{\rho_w}{\rho_d} = a + b \times w \quad (2.7)$$

onde a e b são constantes de calibração específicas do solo, ρ_d é a massa específica seca do solo; ρ_w é a massa específica da água e w o teor de umidade gravimétrico. A norma ASTM D6780 (2003) recomenda esta calibração, fornecendo procedimentos para a sua aplicação em ensaios de campo.

De acordo com Sihvola (1999) “A condutividade elétrica volumétrica dos solos geralmente é comandada pela condutividade elétrica volumétrica do líquido existente nos poros do solo, similar ao comportamento da constante dielétrica”. Baseado nessa analogia, Yu e Drnevich (2004) propuseram uma correlação entre condutividade elétrica volumétrica, o teor de umidade e a massa específica seca do solo. Esse método baseou-se na medida simultânea da constante dielétrica e da condutividade elétrica da amostra de solo. As equações de calibração correlacionam o teor de umidade gravimétrico e a massa específica seca do solo, determinadas após o ajuste simultâneo das medidas da condutividade elétrica em campo. Uma principal vantagem desse método é o fato de os efeitos da temperatura serem desprezados. A equação 2.8 apresenta a equação de calibração proposta por Yu e Drnevich (2004).

$$\sqrt{EC_b} \frac{\rho_w}{\rho_d} = c + d \cdot w \quad (2.8)$$

onde c e d são constantes de calibração específicas para o solo. Resolvendo as equações 2.7 e 2.8 é possível obter os valores do teor de umidade e da massa específica seca do solo em função de K e EC_b .

$$\rho_d = \frac{d\sqrt{K} - b\sqrt{EC_b}}{ad - cb} \rho_w \quad (2.9)$$

$$w = \frac{c\sqrt{K} - a\sqrt{EC_b}}{b\sqrt{EC_b} - d\sqrt{K}} \quad (2.10)$$

Assis (2008) avaliou o desempenho da sonda desenvolvida por Esquivel e Giacheti (2007), utilizando amostras de dez diferentes solos e realizando sua calibração para cada solo. O processo de calibração consistiu na determinação da constante dielétrica (K) e condutividade elétrica (EC_b) de um mesmo solo com diferentes teores de umidade. Posteriormente foram buscadas correlações entre K e o teor de umidade gravimétrico (w), obtido em estufa. Esse autor realizou correlações entre w e K , entre w e \sqrt{K} e entre teor de umidade volumétrico (θ) e K . Também foram consideradas as correlações propostas por Yu e Drnevich (2004), visando estimar também a massa específica seca dos solos.

Além disso, para validar a calibração, o pesquisador realizou ensaios de campo em três diferentes locais. Com estas amostras, comparou os valores do teor de umidade gravimétrico, determinado por meio da técnica de TDR, com aqueles determinados com o procedimento convencional em estufa. Concluiu, então, que os teores de umidade obtidos através da correlação entre w e \sqrt{K} apresentaram melhores resultados, ao serem comparados com aqueles estimados com as outras correlações.

Outros autores Herkelrath *et al.* 1991; Ferre *et al.* 1996; Malicki *et al.* 1996; Yu *et al.* 1997, apresentam outro tipo de calibração (Equação 2.11) assumindo uma relação linear entre a raiz quadrada da constante dielétrica (K) e o teor de umidade volumétrico (θ).

$$\theta_v = b\sqrt{K} + a \quad (2.11)$$

onde a e b são constantes obtidas por meio de regressão.

Posteriormente, Malicki *et al.* (1996) apresentam uma equação de calibração (Equação 2.12) que considera os efeitos da massa específica do solo.

$$\theta = \frac{K^{0.5} - 0.819 - 0.618\rho + 0.159\rho^2}{7.17 + 1.18\rho} \quad (2.12)$$

onde ρ = massa específica do solo; θ = teor de umidade volumétrica e K = constante dielétrica do solo.

Jacobsen e Schjonning (1993) propuseram uma correlação para estimar o teor de umidade volumétrico, considerando a massa específica do solo, teores de argila e de matéria orgânica. Os autores observaram uma concordância com a equação de Topp *et al.*, (1980) apenas para valores de θ inferiores a 18%. Eles observaram também que solos mais compactos apresentam uma constante dielétrica maior do que dos solos menos compactos, para um mesmo teor de umidade. Com a incorporação dessas características adicionais de cinco solos estudados, os autores obtiveram um bom ajuste na sua calibração, obtendo valores de $0,980 < R^2 < 0,989$. Dessa maneira foi proposta uma equação polinomial de terceira ordem (Eq. 2.13).

$$\begin{aligned} \theta = & -3,41 \times 10^{-2} + 3,45 \times 10^{-2} K - 1,14 \times 10^{-3} K^2 + 1,71 \times 10^{-5} K^3 - 3,70 \times 10^{-2} \rho \\ & + 7,36 \times 10^{-4} \%clay + 4,77 \times 10^{-3} \%OM \end{aligned} \quad (2.13)$$

onde *clay* e *OM* representam porcentagens de argila e material orgânico contido no solo, respectivamente.

2.2.4.2 Modelos Mistos Dielétricos

Os Modelos Dielétricos Mistos têm como objetivo separar e identificar os elementos constituintes de uma sonda TDR dos componentes do terreno. A separação e a identificação foram utilizadas na determinação da constante dielétrica de uma mistura de solo. Tendo em vista que a constante dielétrica é uma propriedade particular de cada material, se houver m materiais diferentes, então haverá m valores de constante dielétrica (K).

Cada leitura da constante dielétrica, obtida com qualquer sonda, deve representar um único valor. Este inclui as constantes dielétricas do material do corpo da sonda e as constantes dielétricas do material em que a sonda está inserida. Com base nessa idéia, para os m componentes de uma sonda helicoidal, tem-se:

$$K^\beta = \sum_{i=1}^m \lambda_i K_i^\beta \quad (2.14)$$

$$\sum_{i=1}^m \lambda_i = 1 \quad (2.15)$$

onde λ_i são os fatores de ponderação que descreve a contribuição fracionária dos m diferentes matérias e K_i^β são as constantes dielétricas desses materiais.

O expoente β representa a geometria do meio em relação ao campo elétrico aplicado, e varia entre -1 e 1. Esse expoente toma valores de -1 e 1 quando o campo elétrico é ortogonal e paralelo para as camadas do material dielétrico, respectivamente.

Nissen *et al.* (1998) sugeriram uma expressão que relaciona a constante dielétrica do conjunto dos materiais que constituem o corpo da sonda TDR (K_{probe}) e o material sob investigação (K_{ref}). Essa abordagem foi realizada com o objetivo de separar e identificar tais componentes nas medições de constante dielétrica. Para a realização dessa abordagem, esses autores utilizaram uma sonda TDR do tipo helicoidal (K_{coil}). Essa expressão é a seguinte:

$$K_{coil} = \sqrt[\beta]{pK_{probe}^{\beta} + (1-p)K_{ref}^{\beta}} \quad (2.16)$$

onde p é o fator de ponderação dos materiais da sonda.

Em outras palavras, o valor de p representa a influencia dos materiais dielétricos que compõem a sonda helicoidal em relação ao material investigado. Quanto menor o valor de p , maior será a sensibilidade da sonda.

De acordo com Ponizovsky, Chudinova e Pachepsky (1999), uma das primeiras abordagens disponíveis na literatura que leva em conta Modelos Dielétricos é aquela proposta por Landau e Lifshitz (1960). Os referidos pesquisadores consideram que o valor de uma medição de constante dielétrica vem a ser um valor médio das suas componentes dielétricas, conforme mostrado na Equação 2.17:

$$\sqrt[3]{K} = \sqrt[3]{K_1}X_1 + \sqrt[3]{K_2}X_2 + \sqrt[3]{K_3}X_3 + \dots \quad (2.17)$$

onde K é a constante dielétrica da mistura, K_1, K_2, K_3 , etc. são as constantes dielétricas das componentes, e X_1, X_2, X_3 , etc. são as frações volumétricas das componentes. Essa abordagem assume que as diferenças relativas entre constantes dielétricas K_1, K_2, K_3 , etc. são pequenas. Posteriormente, Looyenga (1965, apud PONIZOVSKY; CHUDINOVA; PACHEPSKY, 1999) relacionou a constante dielétrica do solo em termos de fração de volume de cada uma das três fases do solo, denominado Modelo Dielétrico Misto, conforme mostrado na Equação 2.18:

$$K_{soil} = \left[(1-n)K_s^{\alpha} + (n-\theta)K_{air}^{\alpha} + \theta K_w^{\alpha} \right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (2.18)$$

Essa abordagem com base na física do solo foi utilizada com sucesso por Birchak *et al.* (1974), Dobson *et al.* (1985), Roth *et al.* (1990), Redman e DeRyck (1994), Friedman (1998) e Vaz e Hopmans (2001). Nessa expressão, K_s , K_{air} e K_w , representam a constante

dielétrica do material sólido do solo, ar e água, respectivamente. Os parâmetros n e θ representam a porosidade e o teor de umidade volumétrico, respectivamente.

O parâmetro α depende da geometria da fase sólida do solo e da orientação do solo em relação ao campo elétrico aplicado, variando entre -1 e 1. Este parâmetro assume os valores -1 e 1 quando o campo elétrico é ortogonal e paralelo para as camadas de material dielétrico, respectivamente (ROTH et al., 1990).

A constante dielétrica da água (K_w) pode ser estimada através das correlações propostas por Wobschall (1977) ou Zegelin et al. (1992), como são mostrados a seguir:

$$K_w = 87.8 - 0.37T \quad (2.19)$$

onde T é a temperatura (°C).

$$K_w = 78,54 \left[1 - 4.579 \times 10^{-3} (T - 25) + 1,19 \times 10^{-5} (T - 25)^2 - 2,8 \times 10^{-8} (T - 25)^3 \right] \quad (2.20)$$

onde T é a temperatura (°K).

Presume-se que a constante dielétrica das partículas de sólidas (K_s) seja conhecida, pois variam ligeiramente de acordo com a composição mineralógica do material sólido do solo e da quantidade de material orgânico (YU et al., 1999. Apud VAZ; HOPMANS, 2001). Supõe-se que a fase gasosa é constituída essencialmente de ar, cuja constante dielétrica (K_{air}) é igual a 1 (ROTH et al., 1990).

Para um meio isotrópico de duas fases, o parâmetro α assume o valor 0,5 (BIRCHAK et al., 1974). Estudando diferentes tipos de solo com frequências de 4 a 18 GHz, Dobson et al. (1985) determinaram o valor de $\alpha = 0,65$ por regressão. Vaz e Hopmans (2001) obtiveram $\alpha = 0,538$, para uma argila arenosa de Columbia, $\alpha = 0,554$ para uma argila siltosa Yolo e $\alpha = 0,320$ para uma areia lavada.

Dobson et al. (1985) realizaram também estudos em solos utilizando um Modelo Dielétrico Misto de Quatro Fases desenvolvido por De Loor (1964, 1990. Apud PONIZOVSKY; CHUDINOVA; PACHEPSKY,1999, p.36). Os solos foram então considerados como homogêneos e continham quatro componentes na sua composição (água livre, água adsorvida, sólidos e gás). Desta forma, a constante dielétrica que constitui o solo é determinada segundo a Equação 2.21:

$$K_{soil} = \frac{3K_s + 2(\theta - \theta_{bw})(K_{fw} - K_s) + 2\theta_{bw}(K_{bw} - K_s) + 2(n - \theta)(K_{air} - K_s)}{3 + (\theta - \theta_{bw})\left(\frac{K_s}{K_{fw}} - 1\right) + \theta_{bw}\left(\frac{K_s}{K_{fw}} - 1\right) + (n - \theta)\left(\frac{K_s}{K_{air}} - 1\right)} \quad (2.21)$$

onde b_w e f_w correspondem à água adsorvida pelas partículas sólidas e à água livre contida na mistura de solo, respectivamente. Dirksen e Dasberg (1993) avaliaram e validaram essa equação para oito solos e três argilas. Esses autores também assumiram para K_{bw} , K_{fw} , K_{air} e K_s os valores de 3,2, 78,3, 1 e 5, respectivamente. A partir disso concluíram que o volume fracionário da água adsorvida pelas partículas solidas é estimado pela seguinte expressão:

$$\theta = l\delta\rho_d S \quad (2.22)$$

onde l é o numero de camadas moleculares da água retida pelas partículas sólidas do solo, δ é a espessura da camada de água monomolecular, $\delta = 3 \times 10^{-10}m$, ρ_d é a massa especifica seca do solo e S é a superfície especifica (PANIZOVSKY; CHUDINOVA; PACHEPSKY,1999). Na tabela 2.1, Klemunes (1998) apresenta também alguns valores experimentais para α :

Tabela 2.1 - Valores de α determinados (KLEMUNES, 1998).

Modelo Dielétrico Misto de três fases	1. Roth <i>et al.</i> (1990)	$\alpha = 0,50$ (11 minerais e 2 solos organicos)
	2. Jacobsen e Schjonning (1994)	$\alpha = 0,66$ (11 solos minerais)
Modelo Dielétrico Misto de quatro fases	1. Dirksen e Dasberg (1993)	$\alpha = 0,49, 0,50, 0,52, 0,54, 0,60, 0,61, 0,81$ (8 solos)
	2. Jacobsen e Schjonning (1994)	$\alpha = 0,70$ (10 solos minerais)

A Figura 2.18 mostra uma comparação entre as curvas determinadas pelo modelo empírico de Topp et al. (1980), o modelo dielétrico misto usado por Birchak et al. (1974) e uma curva típica para solos orgânicos.

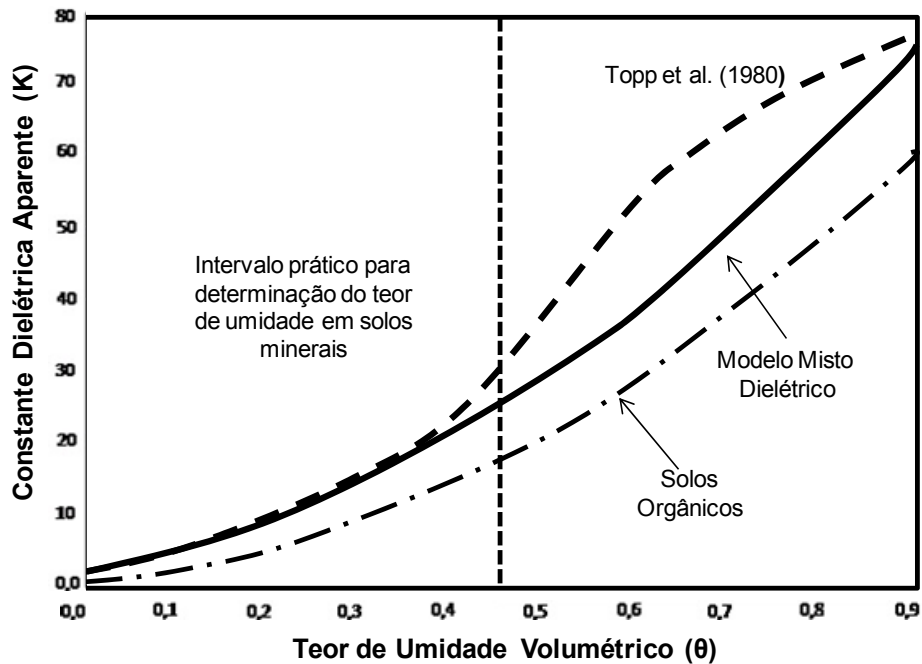


Figura 2. 18 – Comparações entre as curvas determinadas pela relação de Topp et al. (1980) e o modelo dielétrico misto usado por Birchak et al. (1974) – fonte Jones et al. (2002).

2.2.5 Fatores que afetam o valor da constante dielétrica

Existem algumas considerações práticas que influem na determinação do valor da constante dielétrica (K) que precisam ser consideradas na execução dos ensaios. Esses fatores incluem:

- A metodologia da análise utilizada para estabelecer o valor do comprimento aparente (L_a);
- A constante dielétrica dos minerais contidos no solo;
- Efeitos de temperatura;
- Teor de sais no solo;
- Granulometria do solo;

- Teor de matéria orgânica;
- Limitação do comprimento do cabo coaxial;
- Tipo de sonda empregada;
- Contato solo – sonda;

Devido ao fato da constante dielétrica ser proporcional ao quadrado do comprimento aparente (L_a), qualquer imprecisão na determinação desse comprimento pode influenciar significativamente na determinação da constante dielétrica do solo (K_{soil}). Entretanto, poucos estudos foram desenvolvidos para determinar a melhor metodologia para estabelecer o comprimento aparente (L_a). Investigações demonstraram que a posição incorreta dos pontos de inflexão pode produzir uma variação de 6% de erro absoluto no teor de umidade volumétrico se realizadas quatro leituras consecutivas na mesma resposta TDR (LOOK; REEVES, 1992).

Os cinco métodos para a determinação do comprimento aparente do *traçe* TDR são:

- Método das tangentes;
- Método dos picos;
- Método das tangentes alternativas;
- Método das linhas divergentes;
- Método científico de Campbell.

Cada método utiliza posições ligeiramente diferentes entre si correspondentes às inflexões inicial e final do *traçe* gerado pelo testador de cabos.

A Figura 2.19 mostra o esquema da determinação das posições da primeira e da segunda reflexão utilizando o método das tangentes. O ponto de inflexão inicial (Ponto A) é dado pela intersecção da tangente horizontal com a tangente com declividade negativa, no ponto de maior curvatura. O ponto de inflexão final é determinado pela intersecção da tangente horizontal com a tangente com declividade positiva, no ponto de mínimo valor da curva.

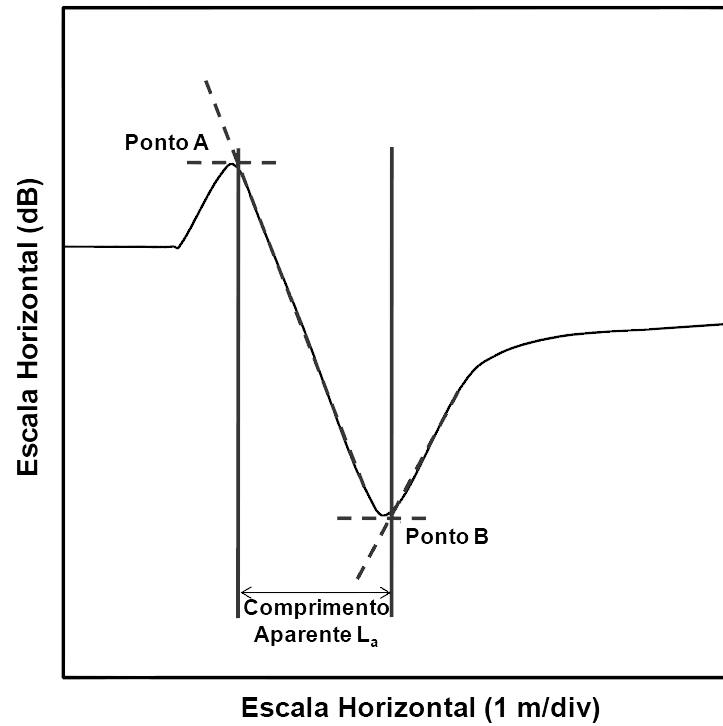


Figura 2.19 – Método das tangentes (KLEMUNES, 1998)

O método dos picos considera que o ponto de inflexão inicial (Ponto A) e o ponto de inflexão final são determinados pelas intersecções das duas tangentes inclinadas em cada ponto (máximo e mínimo), conforme é mostrado na Figura 2.20.

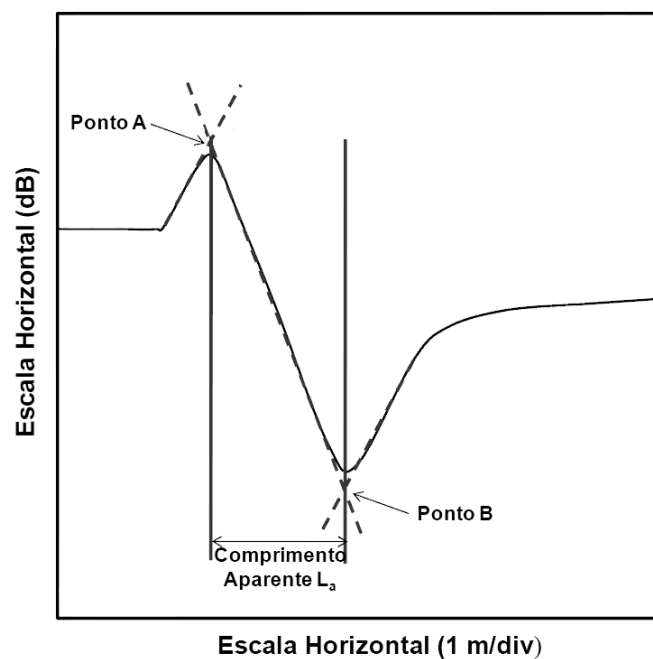


Figura 2.20– Método dos picos (KLEMUNES, 1998).

Na Figura 2.21, apresentada a seguir, é representado o método das linhas divergentes. Por esse método, o ponto de inflexão inicial (Ponto A) representa o local onde a curva diverge da tangente com declividade positiva pelo ponto de máximo local. O ponto de inflexão final é onde a curva diverge da tangente com declividade negativa pelo ponto de mínimo local.

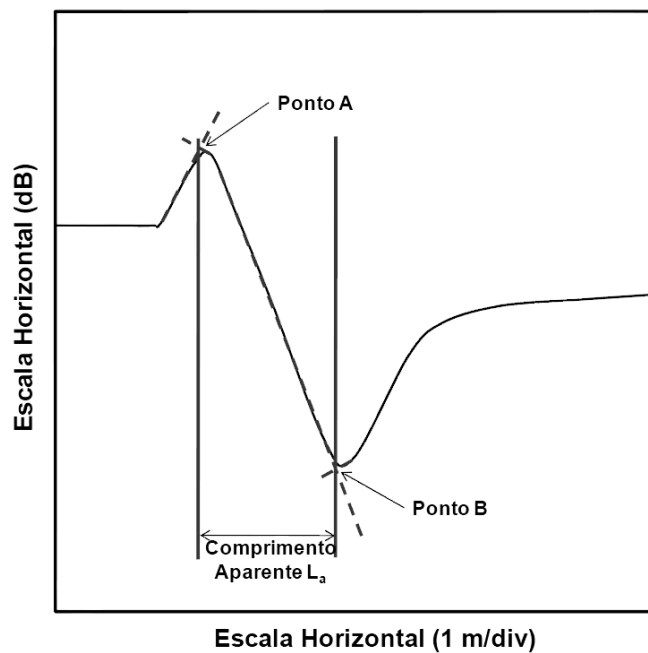


Figura 2.21 – Método das linhas divergentes (KLEMUNES, 1998).

O método alternativo das tangentes considera que o ponto de inflexão inicial (ponto A) é determinado pela intersecção da tangente horizontal com a tangente com declividade positiva no ponto de máximo valor da curva. O ponto de inflexão final (ponto B) é determinado pela intersecção da tangente horizontal com a tangente com declividade negativa, no ponto de mínimo valor da curva, conforme representado na Figura 2.22.

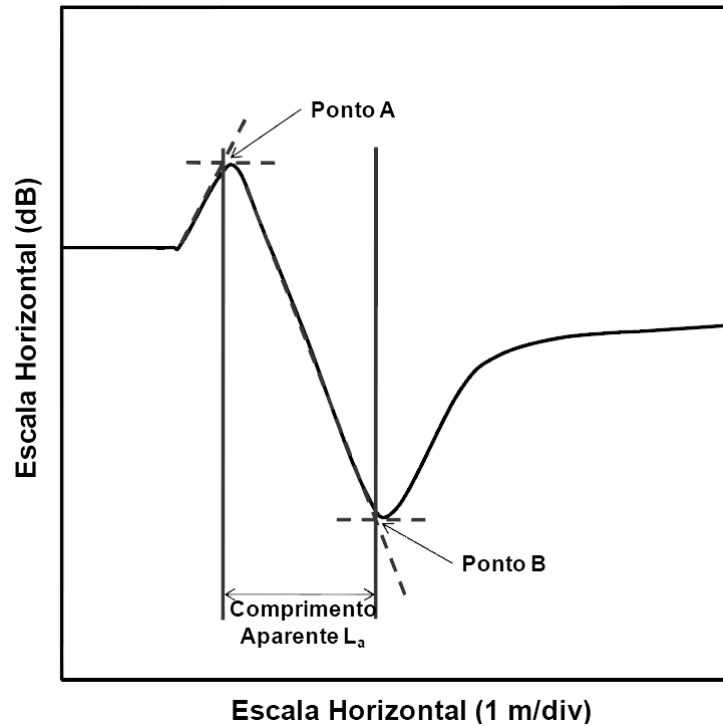


Figura 2.22– Método das tangentes alternativas (KLEMUNES, 1998).

Na Figura 2.23, apresentada a seguir, é representado o método científico de Campbell, o ponto de inflexão inicial (ponto A) é encontrada onde o cabo coaxial conecta à sonda TDR. Este ponto de inflexão está localizado na intersecção da linha horizontal e a linha positivamente inclinada no ponto de máximo valor da curva. O ponto de inflexão final (ponto B) está localizado na intersecção das tangentes geradas em ambos os lados do ponto de mínimo valor da curva.

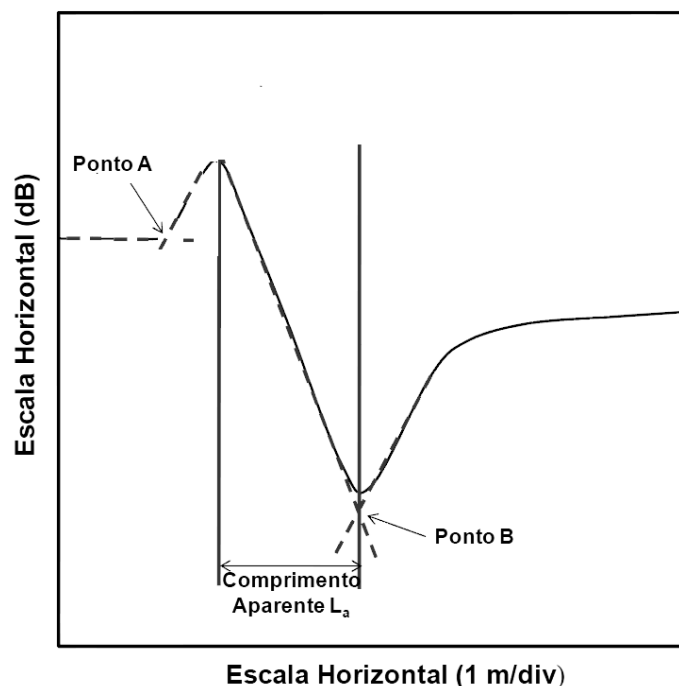


Figura 2.23– Método científico de Campbell (KLEMUNES, 1998).

Klemunes (1998), comparando, através de uma análise estatística, os cinco métodos para determinar o comprimento aparente, concluiu que o método que apresenta uma melhor aproximação na determinação dos pontos de inflexão é o Método das Tangentes (Tabela 2.2). Tal método é utilizado no presente trabalho nas determinações das constantes dielétricas (K).

Tabela 2.2 - Análise estatísticas feitas por Klemunes (1998).

Metodologia	Função	R	Se	Se/Sy	e	e/y
Método das Tangentes	Polinom.	81,20	4,59	0,45	0,34790	0,01727
	Comp.	81,00	4,44	0,43	0,03030	0,00150
Método dos Picos	Polinom.	67,50	5,80	0,57	-0,01430	-0,00071
	Potencial	66,40	5,90	0,58	0,05300	0,00263
Método das Linhas Divergentes	Polinom.	32,80	8,34	0,82	0,00070	0,00004
	Potencial	30,70	8,47	0,83	0,01220	0,00060
Método das Tangentes alternativas	Polinom.	52,70	7,00	0,69	-0,00280	-0,00014
	Potencial	51,30	7,10	0,70	0,01260	0,00063
Método científico de Campbell	Polinom.	66,10	5,92	0,58	0,01120	0,00056
	Potencial	64,60	6,06	0,60	0,04120	0,00204

Outro fator que influi nas medições de constante dielétrica é o tipo de mineral que constitui o solo. Geralmente, solos finos e grossos possuem diferentes composições mineralógicas. Solos finos são compostos predominantemente por magnésio e cálcio, enquanto solos grossos são compostos predominantemente por sílica e quartzo (KLEMUNES, 1998). As constantes dielétricas dos minerais presentes nos solos finos e solos grossos são aproximadamente 4 e 8, respectivamente (HANDBOOK OF CHEMISTRY AND PHYSICS, 1986, apud KLEMUNES, 1998, p.6).

Vieira *et al.* (2005) constataram que a influência da massa específica é maior na medida em que o teor de umidade volumétrico diminui, pois a constante dielétrica do solo dependerá em maior proporção da constante dielétrica das partículas sólidas.

Existem diferentes opiniões quanto à influência da temperatura na determinação do valor da constante dielétrica dos solos.

De acordo com Look e Reeves (1992), ensaios realizados em temperaturas compreendidas no intervalo de 0 até 25 °C produzem uma mínima influencia nos valores de constante dielétrica. Em contradição, Mansukhani e Selig (1975) e Rada *et al.* (1994), tais autores concluíram que ensaios no mesmo intervalo de temperatura, produzem uma influencia significativa nos valores de constante dielétrica dos solos. Um incremento de 10% nos valores originais das constantes dielétricas de areias e argilas foi encontrado nos estudos feitos por Davis e Chudobiak (1975). Esses autores atribuem que o fato é devido a um incremento de temperatura de aproximadamente 39 °C. Entretanto, Drnevich *et al.* (2001), por meio de ensaios realizados num intervalo entre 4 °C e 40 °C, concluíram que a constante dielétrica do solo depende de sua temperatura.

Teor de sais no solo é outro fator que afeta a precisão das leituras de constante dielétrica através da técnica TDR. Topp *et al.* (1980) mostraram que, ao adicionar sal às amostras de solo, há maiores dispersões quando é utilizada a equação proposta por eles.

Quando a solução salina está presente no material onde a sonda TDR encontra-se inserida, pode ocorrer um curto-circuito no corpo da sonda, dificultando a interpretação do segundo ponto de reflexão no ensaio. Segundo Scott *et al.* (1983), condição salina fortes tem significativa influência na curva de calibração.

Segundo Wang e Schmutge (1978), Topp *et al.* (1980) e Hallikainen *et al.* (1985), a constante dielétrica do solo depende de sua granulometria, o que é presumível devido à interação entre as fases sólidas e líquidas. O estudo feito por Keng e Topp (1983) demonstrou que o efeito da textura do solo pode ser negligenciável.

A água é imaginada como uma fina película em torno da fase sólida. De acordo com Dobson *et al.* (1985), devido à restrição da liberdade de rotação das moléculas de água nessa película, sua constante dielétrica é menor do que da constante dielétrica da água pura. O valor desse efeito depende da carga e da superfície específica do grão sólido. Geralmente, para um mesmo teor de umidade, a constante dielétrica é menor nos solos de granulometria fina do que nos de granulometria grossa. Dasberg e Hopmans (1992) mostram que, de um modo geral, o efeito desse fator não deve ser desprezado, como havia sido sugerido por Topp *et al.* (1980), sobretudo no caso de solos argilosos. Os resultados do estudo de Zegelin *et al.* (1992) indicam que a equação de calibração de Topp *et al.* (1980) se aplica melhor para solos arenosos que para solos argilosos.

Outros fatores além dos mencionados anteriormente também afetam o valor da constante dielétrica dos solos. De acordo com Herkelrath *et al.* (1991) e Vaz e Hopmans (2001), a presença de matéria orgânica afeta o valor da constante dielétrica do solo, podendo chegar a valores próximos de 5. Deve salientar-se também que, além dos efeitos das características do solo, existem outros fatores de ordem técnica que podem afetar as medidas de constante dielétrica, tais como ruídos eletromagnéticos e o comprimento do cabo de TDR na reflexão do sinal. Herkelrath *et al.* (1991) verificaram em estudos realizados em laboratório

que os cabos longos tendem a atenuar o sinal. Esses autores concluíram que cabos com comprimento de até 27 m não causam problemas na reflexão do sinal.

Em relação ao tipo de sonda empregada na técnica TDR, Zegelin *et al.* (1989) afirmam que sondas de três e quatro hastes são muito similares na determinação da constante dielétrica. Porém, o distúrbio causado na introdução das sondas de quatro hastes as torna menos adequadas para aplicações no campo (JOAQUIM JR., 2003).

Além da influência da área da sonda, deve se levar em conta também a região monitorada, que compreende desde o início até o final da sonda. Desta forma, uma sonda de 15 cm de comprimento de haste instalada na superfície do terreno, fornecerá uma medida da umidade global dos primeiros 15 cm do perfil do solo. Conseqüentemente as medidas são sempre globais, e não em um único ponto (CARNEIRO;CONCIANI, 1997). Desejando-se conhecer a umidade em profundidades específicas é preciso instalar a sonda exatamente nesta profundidade. Para superar esta dificuldade, Topp e Davis (1985) desenvolveram uma sonda segmentada. Esta consiste em uma linha de transmissão com trechos previamente demarcados com valores distintos de impedância. Assim, emprega-se uma única sonda para medir o teor de umidade em diversas profundidades de um perfil de solo. Na prática, isto significa construir uma sonda em que as hastes têm trechos com diâmetros diferentes. Estes trechos apresentam um sinal característico e, portanto, é possível medir a constante dielétrica somente na região desejada. Uma sonda que emite sinal através de um cabo coaxial tem a vantagem de apresentar a menor perda do sinal na linha e também do lóbulo de irradiação da onda ficar confinado.

Trintinalha *et al.* (2001) avaliaram o efeito das condições de instalação e das características de cada sonda na correlação entre teor de umidade volumétrico e a constante dielétrica. De acordo com esses autores, quando a umidade do solo atinge valores para os quais o solo começa a retrair ao secar, parte dos poros desse solo estará preenchida por ar e

parte por água. Nessas condições, um melhor contato entre a matriz do solo e a sonda assegura um aumento da constante dielétrica do meio entre as hastes da sonda. Com esse procedimento, faz-se que, em uma determinada umidade do solo, os valores de K obtidos com as sondas instaladas após a saturação sejam maiores que os obtidos com as sondas instaladas antes da saturação.

Vieira et al. (2005) também verificaram a interferência do contato sonda-solo nas medidas da constante dielétrica durante a instalação da sonda. Esses autores afirmam que a influência da massa específica é maior à medida que o teor de umidade volumétrico diminui. Isso porque a constante dielétrica do solo dependerá em maior proporção do valor da constante das partículas sólidas.

2.2.6 O emprego da técnica TDR em campo

Uma das primeiras determinações do teor de umidade volumétrico (θ), em campo, através da técnica de TDR, foi realizada por Topp et al. (1984). Esses autores realizaram medições de constante dielétrica do solo em profundidades que variavam entre 50 e 300 mm através de sondas instaladas horizontal e verticalmente no solo. Foram realizadas diversas séries de leituras da constante dielétrica (K), determinando θ através da equação de Topp et al. (1980). Para avaliar a acurácia da técnica TDR, os valores dos teores de umidade, estimados através da técnica da reflectometria no domínio do tempo, foram comparados com os valores de teor de umidade obtidos com o método da estufa. As amostras foram retiradas no mesmo local de instalação da sonda. No caso das sondas instaladas horizontalmente, a média da diferença entre o teor de umidade volumétrica obtido mediante a técnica TDR (θ_t) e o teor de umidade volumétrica, obtido por método da estufa (θ_g), foi de 1,3 %, com um desvio padrão de 0,6 %. Para as sondas inseridas verticalmente, entre as diversas séries de medidas realizadas, verificou-se uma diferença média máxima entre θ_t e θ_g de 3,7 %, com desvio

padrão de 2,9 %. A Figura 2.24 mostra o gráfico θ_t versus θ_g , obtidos através de ambas as técnicas, para o caso de sondas instaladas verticalmente.

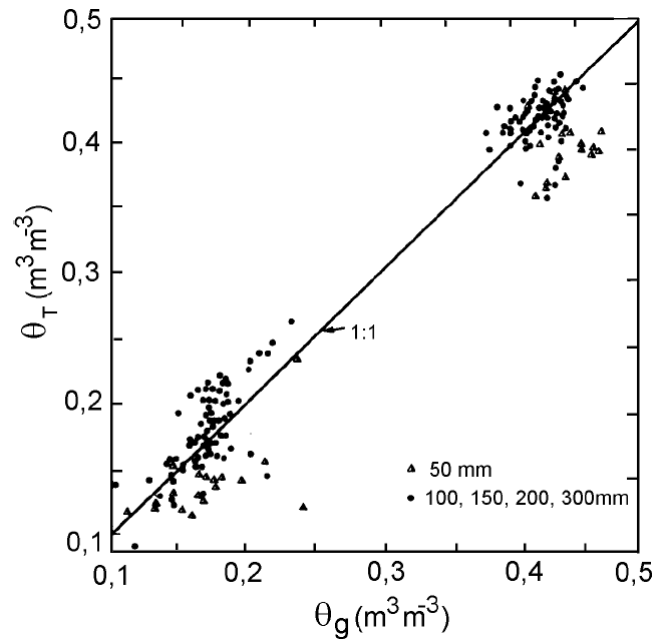


Figura 2.24– Correlação entre θ_g e θ_t para sondas de 50 a 300 mm (TOPP et al., 1984).

Topp e Davis (1985) avaliaram o desempenho de sondas contínuas e segmentadas, instaladas vertical e horizontalmente num perfil de solo argiloso. Através de leituras de constante dielétrica realizadas num metro de profundidade foram então determinados os valores de teor de umidade volumétrico através da Equação de Top et al. (1980). Esses autores observaram uma diferença média máxima entre θ_t e θ_g próximo de 2,1 %, com um desvio padrão de 6,1. Os referidos autores concluíram que as diferenças dos valores de umidade obtidos através das duas técnicas são atribuídas à variabilidade do solo e às imprecisões inerentes às técnicas.

A Figura 2.25 mostra a variação do teor de umidade do solo com a profundidade, para sondas instaladas horizontal e verticalmente. De modo a possibilitar comparações, é também plotada a variação do teor de umidade gravimétrico.

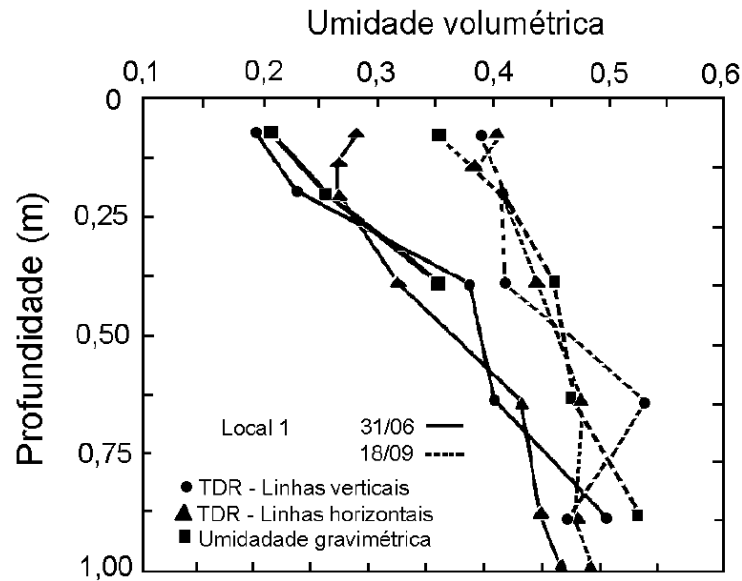


Figura 2.25 – Perfis de teor de umidade comparando dados de sondas verticais e horizontais com dados obtidos a partir de coleta de amostras (TOPP ; DAVIS, 1985).

Assis (2008) avaliou o desempenho em campo da sonda desenvolvida por Esquivel e Giacheti (2007), realizando ensaios de campo. Uma vez cravada a sonda, foram realizadas as leituras com o equipamento TDR. A seguir era retirada uma amostra do terreno naquela profundidade, para a determinação do teor de umidade através do processo de secagem em estufa. Com base nas leituras obtidas, foram determinados os teores de umidade com a utilização das correlações determinadas em laboratório. Esses teores de umidade foram então comparados com aqueles determinados através do processo de secagem em estufa.

As Figuras 2.26 e 2.27 apresentam os valores dos teores de umidade obtidos no ensaio de campo (Solos S2 e S3). Nessas figuras, w_1 , w_2 , w_3 e w_4 , representam o teor de umidade gravimétrico obtido pelo método de secagem em estufa, os teores de umidade gravimétricos obtido através da correlação proposta por Yu e Drnevich (2004), a correlação $K \times w(\%)$ e a correlação $\sqrt{K} \times w(\%)$, respectivamente.

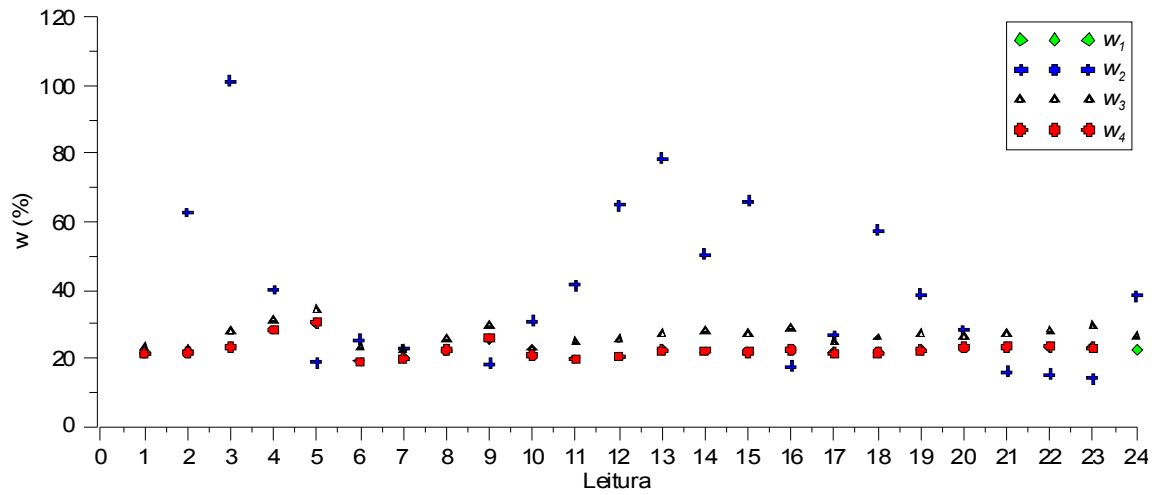


Figura 2.26 – Teores de umidade obtidos no ensaio de campo para amostra S2 - Modificado de Assis (2008).

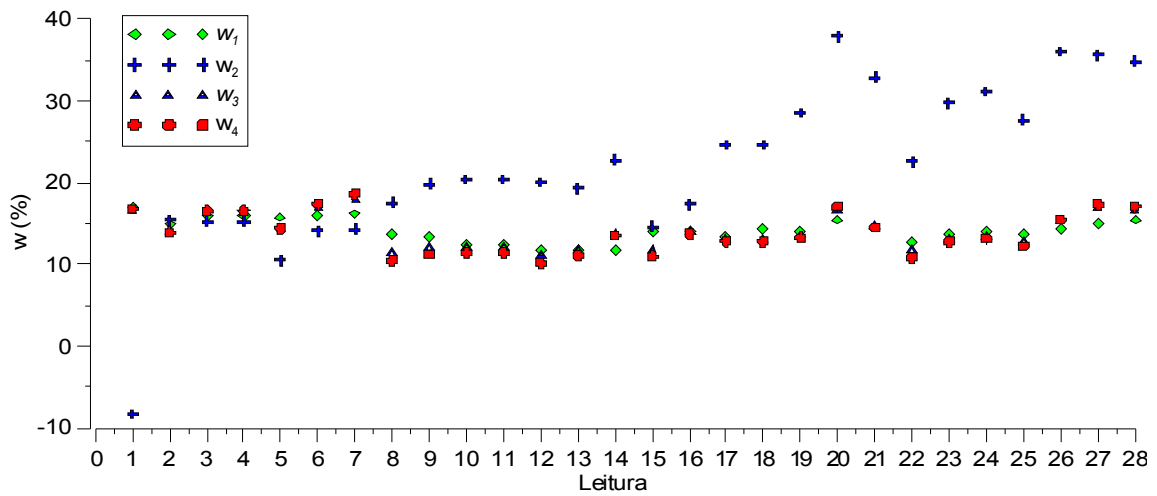


Figura 2.27– Teores de umidade obtidos no ensaio de campo para amostra S3 - Modificado de Assis (2008).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais utilizados

3.1.1 Sonda TDR Helicoidal

A sonda utilizada neste trabalho, idealizada e desenvolvida por Esquivel e Giacheti (2007), está baseada no conceito de sondas com eletrodos helicoidais (NISSEN et al., 1998; VAZ E HOPMANS, 2001; PERSON e WRAITH, 2002). Esta mesma sonda foi utilizada em trabalho anterior por Assis (2008) e Lima (2009), apresentando bons resultados.

A sonda apresenta o diâmetro de 35,68 mm e comprimento de 302,26 mm. Cada eletrodo helicoidal possui comprimento de 280 mm. Esta é conectada ao equipamento TDR através de um cabo coaxial com 10 m de comprimento.

3.1.2 Sonda TDR de três hastes

Para efeito de comparação, foi utilizada uma sonda TDR com três hastes dispostas em paralelo (Figura 3.1). Essa sonda foi denominada como sonda TDR convencional ou padrão, devido à boa concordância dos seus resultados quando comparados com valores de constante dielétrica conhecidos.

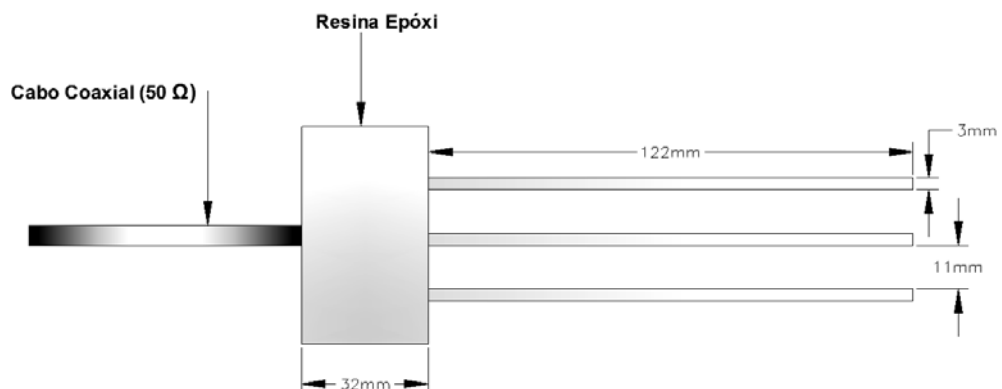


Figura 3.1 – Sonda convencional TDR.

3.1.3 Testador de Cabos Tektronix 1502-C

Neste projeto, foi utilizado um testador de cabos da marca Tektronix, modelo 1502C (Figura 3.2). Os controles presentes no painel frontal do aparelho são:

1. conector BNC fêmea, onde é conectado o cabo da sonda;
2. controle do filtro de ruídos;
3. ajuste da escala vertical;
4. ajuste da quantidade de metros por divisão do gráfico;
5. ajuste da velocidade relativa de propagação (V_p);
6. interruptor de força;
7. controle de posição vertical;
8. controle de posição horizontal;
9. acesso ao menu do aparelho;
10. visualização do *input*;
11. visualização do sinal armazenado;
12. visualização da diferença entre o sinal atual e o sinal armazenado;
13. salvar sinal corrente;
14. porta serial RS232.



Figura 3.2 – Painel frontal do Tektronix 1502C.

Quando conectado ao computador por meio da porta serial RS232, o testador Tektronix 1502C pode ser totalmente controlado pelo programa WinTDR.

3.1.4 Programa WinTDR

O software WinTDR, desenvolvido pelo grupo de Física dos Solos da *Utah State University*, tem por finalidade controlar um refletômetro através de um computador. O WinTDR foi escrito inicialmente em 1993 para ser usado com o reflectômetro Tektronix, modelo 1502C, tendo como objetivo a determinação direta do teor de umidade dos solos. Entretanto, durante os últimos anos, foram introduzidas modificações para permitir também a determinação da condutividade elétrica dos solos. A intenção inicial dos autores do programa foi criar uma interface de fácil utilização para Windows, a fim de realizar de análises eficientes e precisas, sob diferentes condições.

O programa de interface WinTDR, versão 6.1, facilita a interpretação da onda TDR, detectando facilmente o tempo de percurso das ondas refletidas. Os dados são armazenados no disco rígido do computador. Este programa faz a comunicação entre o equipamento Tektronix 1502C e o computador, através da porta serial RS232 (OR *et al.*, 2004).

Utilizando algoritmos próprios, o software é capaz de determinar o comprimento aparente (L_a), calculando a constante dielétrica (K) e a condutividade elétrica bruta (EC_b). Outra vantagem do uso do software WinTDR é a possibilidade de armazenamento de dados de cada medição realizada, gravando-se tanto os resultados numéricos como o *trace* de cada leitura.

3.1.5 Amostra de Solo

Para a realização dos ensaios de calibração foi coletada uma amostra deformada de solo no Campus I da Escola de Engenharia de São Carlos. Foi nesse mesmo local que Assis (2008) coletou a amostra de solo designada como Solo 7. Em seguida a amostra foi

devidamente acondicionada em sacos plásticos e identificada. Posteriormente, foi transportada até o laboratório de mecânica dos solos da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP). Na calibração da sonda helicoidal TDR, foi realizada no mesmo solo as medições de constante dielétrica, com 10 valores diferentes de teor de umidade.

O município de São Carlos encontra-se localizado na zona de transição das unidades geomorfológicas das encostas basálticas e de arenitos, entre o Planalto Central e a Depressão Periférica Paulista. Esse município, que está situado cerca de 900 m de altitude em relação ao nível do mar, está assentado sobre as rochas do Grupo São Bento, compostas por arenitos da Formação Botucatu, Pirambóia e derrames de efusivas basálticas da Formação Serra Geral. Nessa região, originaram-se depósitos superficiais aluviais e coluviais produzidos pela ação do intemperismo, com posterior retrabalhamento dos materiais do Grupo Bauru e das Formações Serra Geral e Botucatu. Esses depósitos são chamados de Sedimentos Cenozóicos e estão separados por uma linha de seixos situada entre cinco e sete metros de profundidade (BORTOLUCCI, 1983). A Figura 3.3 mostra um esquema do perfil geológico da região de São Carlos.

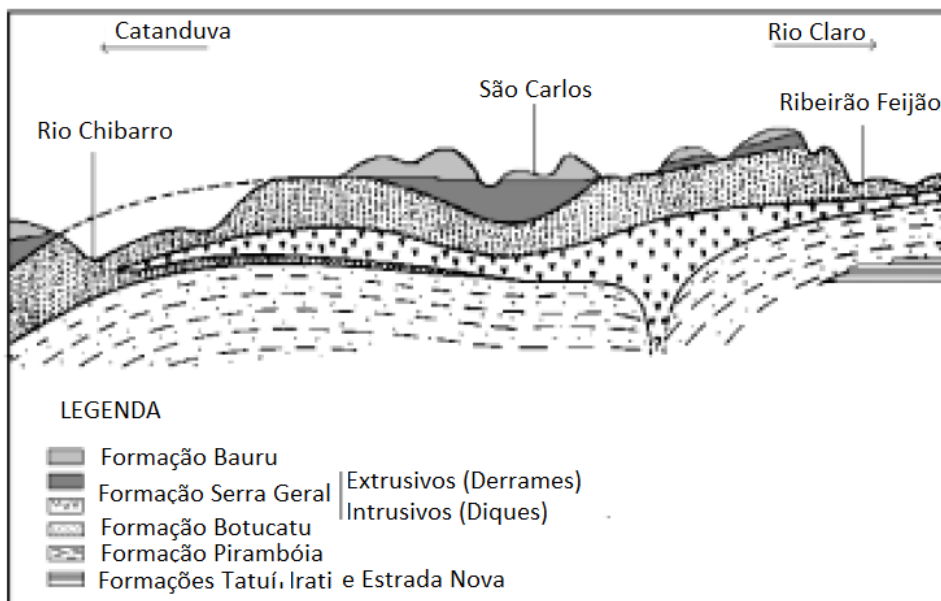


Figura 3.3 – Perfil geológico da região de São Carlos (DAEE, apud COSTA, 1999).

3.1.6 Soluções líquidas

Para a calibração da sonda helicoidal TDR, foram usadas soluções aquosas de etanol e ácido acético, em diferentes concentrações. As soluções foram preparadas com água destilada a uma temperatura aproximada de 20 °C. A Figura 3.4 mostra materiais utilizados na realização deste ensaio.



Figura 3.4 – Ensaio realizado com as soluções aquosas de ácido acético.

3.1.7 Equipamentos de laboratório

Para a calibração, também foram utilizados os seguintes equipamentos de laboratório:

1. balança BG-4000 Gehaka (Mínimo = 0.50 g; Máximo = 4040 g; Erro \pm 0.1 g);
2. balança C&F (Mínimo = 250 g; Máximo = 30 kg; Erro \pm 10 g);
3. bandeja metálica;
4. betoneira MetalPama;
5. cápsulas de alumínio para a determinação do teor de umidade;
6. compactador;
7. conjunto composto por uma furadeira (utilizado para fazer rotação) e uma haste misturadora (Figura 3.5a);
8. dispositivo de suporte das sondas (Figura 3.5b);

9. ferramentas para coleta de amostras (concha e espátulas);
10. funil;
11. martelo de borracha;
12. micro-computador;
13. pipeta;
14. provetas;
15. Amostra do solo 7 especificado anteriormente com diversos teores de umidade.

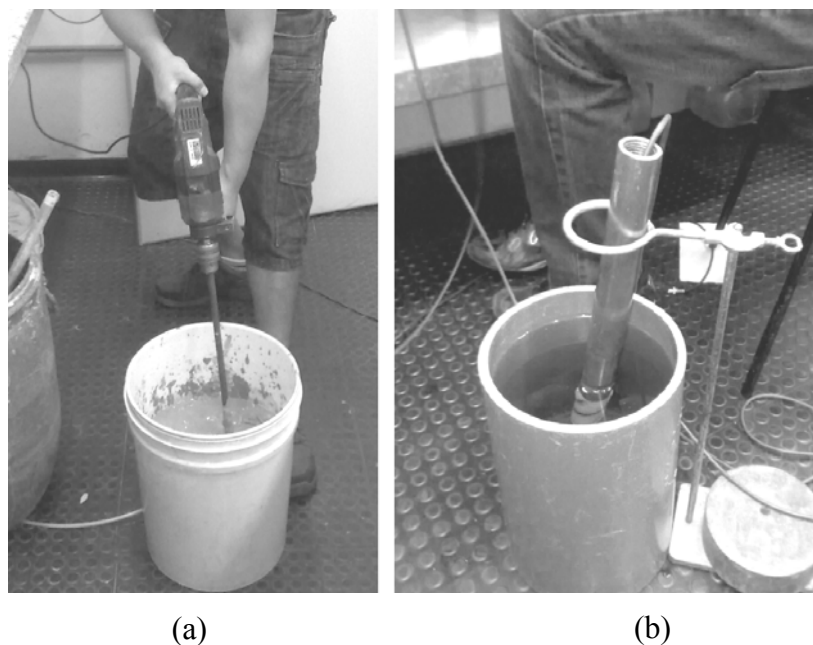


Figura 3.5 – Alguns acessórios utilizados em laboratório. (a) Conjunto composto por uma furadeira e uma haste misturadora. (b) Dispositivo de suporte utilizado nos ensaios.

3.2 Método do trabalho

O programa experimental desta pesquisa foi realizado nos laboratórios de Mecânica dos Solos do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos-USP. Inicialmente, foram coletadas as amostras de solos citados anteriormente. Em seguida,

realizaram-se ensaios de determinação de constante dielétrica em diferentes soluções líquidas e em amostras de solos com diferentes teores de umidade. Finalmente foram realizadas análises dos resultados obtidos em laboratório e determinando-se equações de calibração através de um Modelo Misto Dielétrico. Neste capítulo, serão abordados os detalhes referentes aos processos experimentais realizados em laboratório, ao processo de calibração e análises dos resultados.

3.2.1 Processo experimental realizado em laboratório

A fim de comparar os dados obtidos com os dois tipos de sondas, a constante dielétrica foi lida dez vezes, continuamente, em cada solução. Considerando como cada ponto de leitura sua média aritmética. Essas leituras de constante dielétrica foram realizadas empregando o software WinTDR v. 6.1. O roteiro para a utilização do software para cada uma das leituras realizadas é o seguinte:

1. Iniciar o programa WinTDR versão 6.1;
2. Encontrar o *trace* da onda eletromagnética inicial gerada pelo testador de cabos;
3. Através do comando *Sweep* preparar o equipamento para adquirir um sinal novo;
Para uma melhor visualização da onda e obtenção de melhores resultados é necessário ajustar a escala e o cursor;
4. Realizar um ajuste manual inicial para o software encontrar a primeira reflexão da onda;
5. Após o ajuste inicial, com o comando *Auto Analyze*, determinar automaticamente as duas reflexões da onda e realizar todos os cálculos necessários para a obtenção dos valores da constante dielétrica (K) e de EC_b ;

O comando *Manual Analyze* permite ao usuário indicar a posição das reflexões da onda e os cálculos são realizados a partir dessas indicações.

A janela *Analysis Output Window* (Figura 3.6) apresenta os resultados dos cálculos efetuados e mostra os resultados das últimas cinquenta análises feitas. A Figura 3.7 mostra a janela de ajuste de opções do software WinTDR.

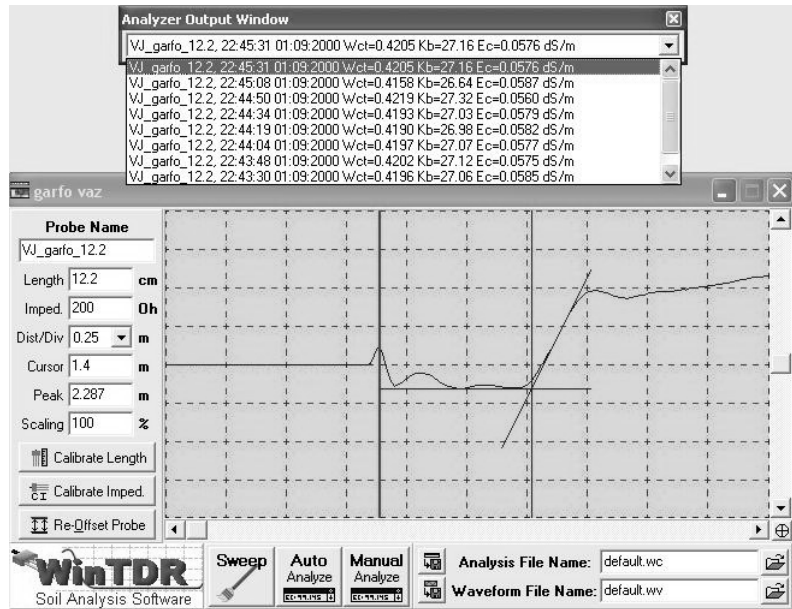


Figura 3.6 - Janela após a execução de um ensaio TDR.

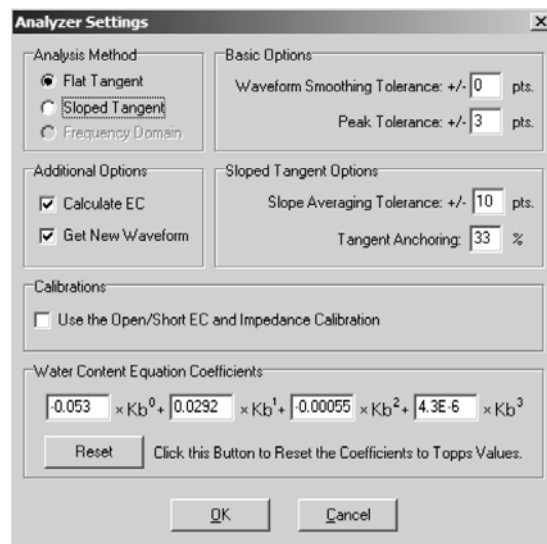


Figura 3.7 - Janela de ajuste de opções do software WinTDR.

Nesta etapa, usando tanto a sonda helicoidal como a sonda convencional, foram medidas as constantes dielétricas de diferentes amostras de solo e soluções líquidas. Estes

ensaios foram realizados a fim de comparar os resultados dos valores de constante dielétrica obtidos com os dois tipos de sondas.

Para proporcionar maior detalhe da execução dos ensaios com solo, apresenta-se o seguinte roteiro que foi seguido:

1. A amostra coletada do campo, em condição natural de teor de umidade, foi colocada em uma bandeja de aço e deixada secar à sombra em local com ventilação moderada até alcançar o teor de umidade higroscópico. Durante esse período, a amostra foi revolvida e foram desmanchados os torrões. Aqueles torrões que não desmancharam manualmente foram colocados em um britador e, posteriormente, em uma galga até que se desfizessem.
2. Após a amostra secar, foram separados 20 kg de material para a execução do ensaio.
3. A amostra de solo foi compactada em recipiente de PVC rígido em três camadas com um soquete de massa de 4.95 kg. Aplicaram-se cinco golpes em cada camada.
4. Após executada a compactação, o solo no topo do recipiente foi nivelado utilizando uma régua biselada.
5. O recipiente com o solo foi pesado em balança com capacidade de 30 kg. Esse processo foi necessário para a determinação da massa específica do solo.
6. Inicialmente a sonda convencional foi inserida verticalmente na amostra de solo e as leituras de constante dielétrica foram realizadas em cada ponto.
7. Uma vez retirada a sonda convencional, foi feito um pré-furo no solo com um tubo de PVC de 20 mm, com intuito de facilitar a penetração da sonda TDR helicoidal.
8. A seguir, foi inserida a sonda helicoidal, o suficientemente afastado dos furos criados pela sonda convencional.
9. Com a sonda inserida no solo, foram realizadas as medidas da constante dielétrica e condutividade elétrica do solo.

10. Na tela de visualização do *trace*, marcou-se o primeiro ponto de inflexão. Depois disso, o programa calculou o segundo ponto e forneceu os valores de constante dielétrica e condutividade elétrica.
11. Depois de feitas as medidas, foram retiradas as amostras de solo do recipiente, colocadas em cápsulas e depositadas em estufa a 105 °C, para a determinação do teor de umidade gravimétrico.
12. A seguir, o material foi retirado do recipiente e adicionou-se a ele água, com intuito de aumentar o teor de umidade, e homogeneizou-o em uma betoneira por 15 minutos.
13. Após esse tempo, o material foi retirado da betoneira, ensacado e lacrado, para não perder umidade. Deixou-o descansar por um período que variou de duas a 48 horas, dependendo do material utilizado. Para solos arenosos, o tempo de descanso foi de duas horas; para os solos argilosos, o tempo chegou até 48 horas de descanso.
14. Depois do descanso, o processo do ensaio foi repetido utilizando as duas sondas até chegar aos teores de umidades desejados.

É importante inserir a sonda helicoidal cuidadosamente no solo e, impedindo a criação de espaços de ar em torno da sonda, o que poderia levar a erros significativos na determinação da constante dielétrica. As leituras de constante dielétrica com a sonda helicoidal foram realizadas imediatamente após a inserção da sonda convencional. A integridade do sistema de sonda foi verificada após cada medição, fazendo leituras com a sonda no ar. Leituras próximas a 1 significam que o sistema está operando adequadamente.

Nas etapas seguintes, o teor de umidade do solo foi aumentado pela adição gradual de água. Após isso, o solo foi colocado em sacos plásticos, que foram hermeticamente fechados e deixados em repouso por algumas horas para assegurar a homogeneidade do teor de umidade. Posteriormente, uma nova série de leituras seria executada.

A Figura 3.8 esquematiza resumidamente a realização dos ensaios TDR realizados com solos.

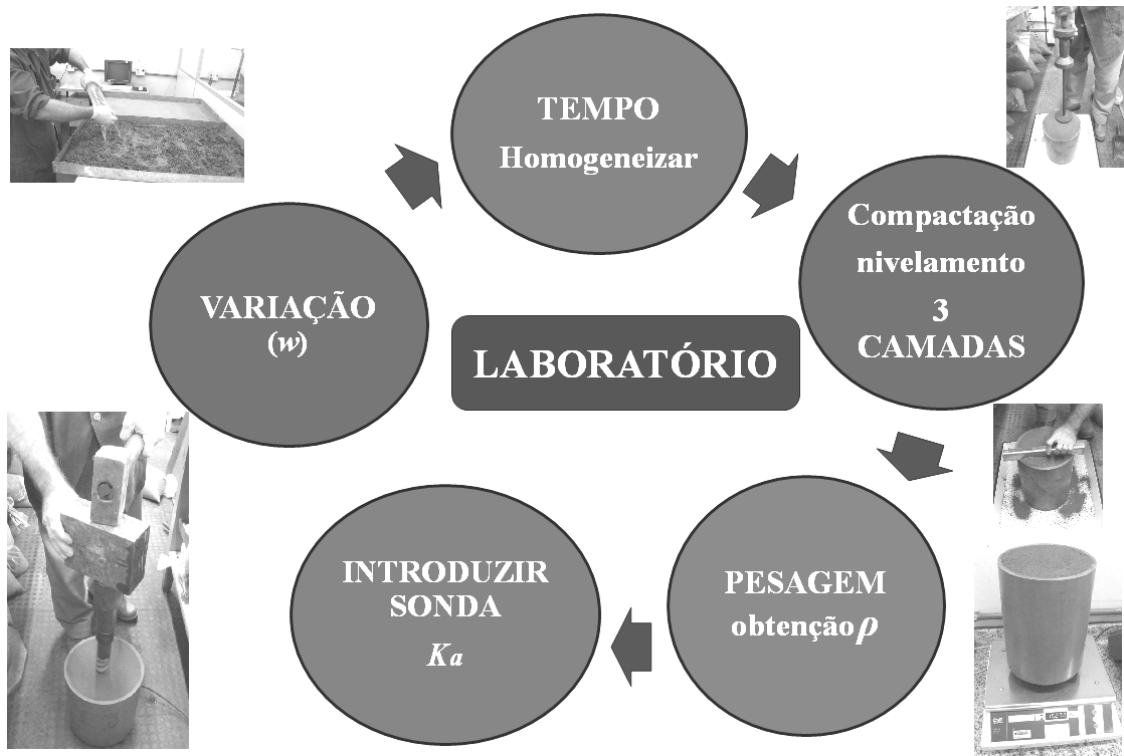


Figura 3.8– Esquema de realização dos ensaios TDR realizados com solos.

Após a conclusão dessas leituras, o teor de umidade gravimétrico (w) foi determinado pelo método da secagem em estufa. Com os dados obtidos em seguida, o teor de água volumétrico (θ), a massa específica seca (ρ_d) e porosidade (n) foram calculados através das seguintes equações:

$$w = \frac{M_w}{M_s} \quad (3.1)$$

$$\theta = w \frac{\rho_d}{\rho_w} \quad (3.2)$$

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w} \quad (3.3)$$

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{G_s \rho_w} \quad (3.4)$$

onde M_w e M_s representam a massa de água e massa de sólidos em um dado volume de solo; ρ_w representa a massa específica da água e G_s a massa específica das partículas sólidas do solo.

As soluções líquidas foram preparadas diretamente em um molde cilíndrico de PVC, onde as leituras foram feitas inicialmente com a sonda convencional e, em seguida, com a sonda helicoidal. As leituras correspondem ao ar, à água, ao etanol puro e a solução de etanol em 20%. De maneira similar, para cada solução e amostras de solo foi adotada como constante dielétrica a média aritmética das dez leituras contínuas. A tabela 3.1 mostra os teores de umidade e concentração de soluções com ácido acético.

Tabela 3.1 – Teores de umidade e concentração de soluções com ácido acético.

Ensaio	Teor de umidade do solo (%w)	Concentração de soluções com ácido acético. (mol) (T=20°)
A	5.76	17.36
B	10.34	16.49
C	19.20	16.44
D	19.62	15.52
E	23.74	15.42
F	27.16	13.20
G	31.56	12.93
H	50.47	11.75
I	58.43	11.35
J	70.16	10.02
K	-	9.42
L	-	7.85
M	-	6.94
N	-	4.96

3.2.2 Processo de calibração

A calibração da sonda helicoidal TDR foi realizada em duas etapas. Na primeira etapa, foram comparados os resultados das constante dielétricas tanto da sonda helicoidal como da sonda convencional. Os pontos de coordenadas K_{ref} e K_{coil} foram plotados em um gráfico e foi ajustado uma curva (Equação 2.16), sendo obtidos por regressão os parâmetros p , β e K_{probe} .

Na segunda etapa, os dados correspondentes às amostras do solo (Tabela 3.1), acrescentado aos dados obtidos por Assis (2008) (Tabela 3.2), foram usadas no desenvolvimento de uma nova abordagem denominada Modelo Dielétrico Misto. A tabela 3.2 mostra a classificação dos solos mediante o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), as porcentagens de argila, silte, areia e pedregulho, a gravidade específica (G_s) e o índice de plasticidade de cada amostra de solo estudada por Assis (2008).

Tabela 3.2- Características dos solos usados por Assis (2008).

Solo	SUCS	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedregulho (%)	G_s	IP
1	SC	22.00	16.00	60.00	2.00	2.59	13
2	CH	60.00	32.00	8.00	-	2.67	39
3	CH	28.50	23.50	47.00	1.00	2.86	25
4	SC	22.00	13.00	62.00	3.00	2.91	10
5	CL	58.00	27.00	15.00	-	3.09	17
6	MH	5.00	50.00	45.00	-	2.72	19
7	SC	21.00	9.00	70.00	-	2.70	9
8	SC	31.00	9.00	60.00	-	2.66	14
9	SC	36.00	9.00	55.00	-	2.93	14
10	SC	34.00	6.00	60.00	-	2.69	8

3.2.3 Análises de resultados

A equação de calibração é determinada por meio de uma interpretação física do solo, denominada Modelo Dielétrico Misto. Este se refere às constantes dielétricas de uma mistura multi-fase com as constantes dielétricas e frações de volume dos seus constituintes. Nesta abordagem, foi considerado o conceito fundamental da Mecânica de Solos tradicional, onde o solo é constituído por uma mistura de três fases que são as fases sólida, líquida e gasosa (Fig. 3.9). Desta maneira, é possível derivar uma relação que descreve a constante dielétrica do solo através da seguinte relação:

$$K^{\alpha} = \frac{V_s}{V} K_s^{\alpha} + \frac{V_{air}}{V} K_{air}^{\alpha} + \frac{V_w}{V} K_w^{\alpha} \quad (3.5)$$

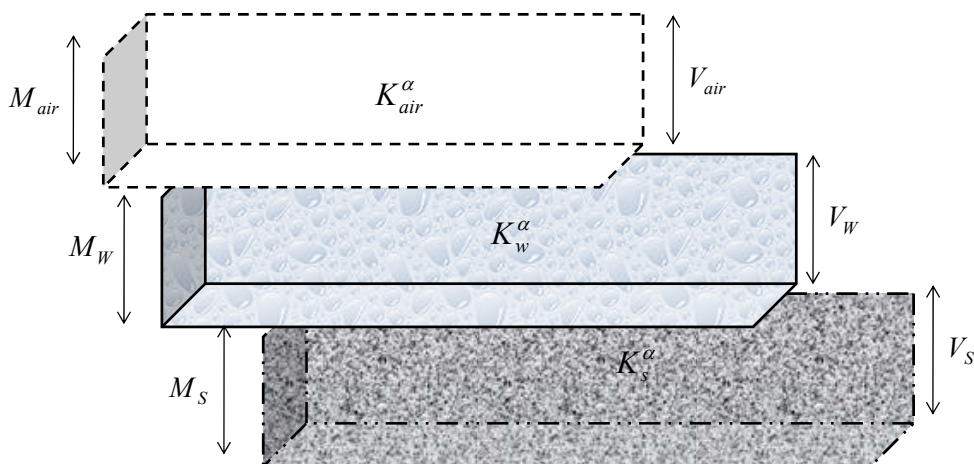


Figura 3.9 – Esquema do conceito básico para o desenvolvimento do Modelo Dielétrico Misto.

De maneira geral, para um solo com diferentes fases e diferentes volumes, a constante dielétrica pode ser determinada através da seguinte expressão:

$$K^{\alpha} = \frac{\sum V_i K_i^{\alpha}}{\sum V_i} \quad (3.6)$$

onde:

V_i = Volume da i-ésima fase

K_i = Constante dielétrica do i -ésima material

α = Parâmetro exponencial que depende da geometria do ensaio.

Relacionando as propriedades volumétricas aos índices físicos do solo foi possível desenvolver o Modelo Dielétrico Misto de Três fases. Sabendo que o volume de vazios (V_v) é definido como a soma do volume de água (V_w) e volume do ar (V_{air}) contido no solo e o volume de sólidos é igual ao volume total menos o volume de vazios. Assim tem-se:

$$V_v = V_w + V_{air} \quad (3.7)$$

$$V_s = V - V_v \quad (3.8)$$

$$V_s = V - nV \quad (3.9)$$

Sendo a porosidade do solo (n) definida como o quociente entre o volume de vazios (V_v) e o volume total (V) da amostra do solo, resulta:

$$V_s = V (1 - n) \quad (3.10)$$

$$n = \frac{V_v}{V} \Rightarrow V_v = nV \quad (3.11)$$

Sabendo que o teor de umidade volumétrico é determinado pela razão entre o volume de água contido numa amostra de solo (V_w) e o volume total dessa amostra do solo (V), como é mostrado:

$$\theta = \frac{V_w}{V} \Rightarrow V_w = \theta V \quad (3.12)$$

Semelhantemente, o volume de ar é dado por:

$$V_{air} = V - V_s - V_w \Rightarrow V_{air} = V - (V - nV) - \theta V$$

$$V_{air} = V (n - \theta) \quad (3.13)$$

Assim, a Equação 3.5 pode ser expressa da seguinte forma:

$$K^\alpha = \frac{V(1-n)}{V} K_s^\alpha + \frac{V(n-\theta)}{V} K_{air}^\alpha + \frac{\theta V}{V} K_w^\alpha \quad (3.14)$$

Desta forma, a constante dielétrica lida com uma sonda convencional TDR, quando inserida num solo, pode ser determinada através da seguinte expressão:

$$K_{soil} = \sqrt[\alpha]{(1-n)K_s^\alpha + (n-\theta)K_{air}^\alpha + \theta K_w^\alpha} \quad (3.15)$$

Combinando a Equação (2.16) com a Equação (3.15), a constante dielétrica medida com a sonda helicoidal pode ser representada da seguinte forma (VAZ; HOPMANS, 2001):

$$K_{coil} = \sqrt[\beta]{pK_{probe}^\beta + (1-p)\left[(1-n)K_s^\alpha + (n-\theta)K_{air}^\alpha + \theta K_w^\alpha\right]^\frac{\beta}{\alpha}} \quad (3.16)$$

A abordagem que utiliza o Modelo Dielétrico Misto nas calibrações é mais precisa, pois considera uma interpretação física dos resultados das medições. Como já foi mencionado anteriormente, a constante dielétrica dos sólidos presentes no solo varia ligeiramente em função da sua composição mineralógica. Nesta pesquisa foi adotada K_s , igual a 3,9, valor recomendado por Vaz e Hopmans (2001). As constantes dielétricas da água e do ar foram assumidas iguais a 80 e 1, respectivamente (ROTH *et al.* 1990; DASBERG e HOPMANS, 1992; YU *et al.*, 1999, VAZ e HOPMANS, 2001). Utilizando os valores de porosidade (n), os teor de umidade volumétrico (θ) obtidos por Assis (2008), e os valores de p , β e K_{probe} obtidos na primeira etapa dessa pesquisa, foi possível avaliar o parâmetro α da Equação 3.16. Esta análise foi realizada individualmente para cada solo e para todos os solos em conjunto.

Uma vez que todos os parâmetros da Equação 3.16 tenham sido determinados, o teor de umidade volumétrico pode ser calculados em função da constante dielétrica lida com a sonda helicoidal e a porosidade do solo (Equação 3.17).

$$\theta(\%) = \frac{1}{(K_w^\alpha - K_{air}^\alpha)} \left[\left(\frac{K_{coil}^\beta - pK_{probe}^\beta}{1-p} \right)^{\frac{\alpha}{\beta}} - K_s^\alpha + n(K_s^\alpha - K_{air}^\alpha) \right] \quad (3.17)$$

Da mesma forma, o teor de umidade gravimétrico pode ser estimado em termos de constante dielétrica, porosidade (n) e G_s , como segue:

Substituindo $\theta = w\rho_d$ na Equação 3.17, resulta:

$$\begin{aligned} \frac{K_{coil}^\beta - pK_{probe}^\beta}{(1-p)} &= \left[K_s^\alpha - nK_s^\alpha + nK_{air}^\alpha - \rho_d (wK_{air}^\alpha - wK_w^\alpha) \right]^{\frac{\beta}{\alpha}} \\ \rho_d w (K_{air}^\alpha - K_w^\alpha) &= - \left(\frac{K_{coil}^\beta - pK_{probe}^\beta}{1-p} \right)^{\frac{\alpha}{\beta}} + K_s^\alpha - nK_s^\alpha + nK_{air}^\alpha \\ w &= \frac{1}{\rho_d (K_{air}^\alpha - K_w^\alpha)} \left[K_s^\alpha - nK_s^\alpha + nK_{air}^\alpha - \left(\frac{K_{coil}^\beta - pK_{probe}^\beta}{1-p} \right)^{\frac{\alpha}{\beta}} \right] \end{aligned} \quad (3.18)$$

A equação 3.18 mostra uma a relação entre o teor de umidade gravimétrico e a massa específica seca do solo. Esta expressão poderia ser eventualmente utilizada para estimar a massa específica seca em diferentes profundidades, caso fossem conhecidos os teores de umidade volumétricos.

Substituindo $\rho_d = G_s (1-n)$ na Equação 3.18, resulta:

$$w(\%) = \frac{1}{G_s (1-n) (K_{air}^\alpha - K_w^\alpha)} \left[K_s^\alpha - nK_s^\alpha + nK_{air}^\alpha - \left(\frac{K_{coil}^\beta - pK_{probe}^\beta}{1-p} \right)^{\frac{\alpha}{\beta}} \right] \quad (3.19)$$

4 RESULTADOS

4.1 Sonda convencional versus sonda helicoidal

A Figura 4.1 mostra uma comparação entre as formas de onda típicas para a água utilizando a sonda TDR convencional e a sonda TDR helicoidal. Pode-se observar que essas ondas não são iguais. A razão é que a geometria e a constante dielétrica dos materiais componentes de cada sonda são diferentes.

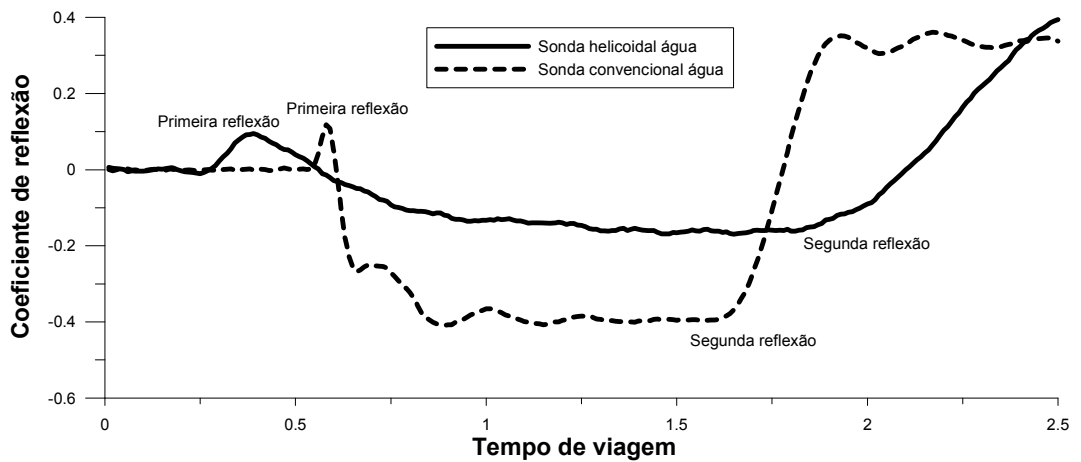


Figura 4.1 – Comparação entre os traços típicos para leituras na água, usando a sonda convencional e a sonda helicoidal TDR.

A Figura 4.2 mostra o gráfico K_{coil} versus K_{ref} , correspondentes aos materiais descritos na Seção 3.2.1. Esta figura também mostra a correlação entre K_{ref} e K_{coil} , obtida pelo Modelo Dielétrico Misto de duas fases (Equação 2.16). Observa-se que existe uma baixa dispersão dos pontos experimentais em relação à curva ajustada, mostrando o bom desempenho da sonda TDR helicoidal e boa sensibilidade.

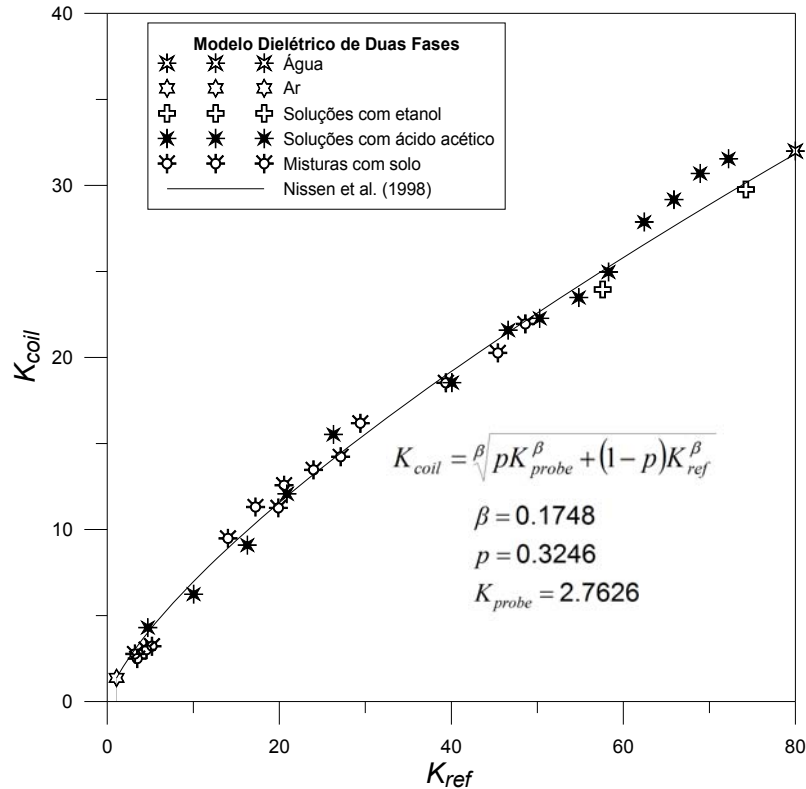


Figura 4.2 – Correlação entre K_{ref} e K_{coil} , obtido através do Modelo Dielétrico Misto de duas fases (NISSEN et al., 1998).

4.2 Constante dielétrica versus teor de umidade volumétrico

A Figura 4.3 mostra o gráfico K_{coil} versus teor de umidade volumétrico determinado em laboratório (θ_{lab}), para os solos listados na Tabela 3.2. Ajustando a curva correspondente à Equação 3.16 aos dados correspondentes a todos esses solos, foi possível determinar um valor global para o parâmetro α igual a 0,55, que é muito próximo de 0,5. Esse valor representa que os ensaios foram realizados de forma adequada, garantindo que tais ensaios, tiveram um adequado contato solo – sonda (DOBSON et. al., 1995; DASBERG e HOPMANS, 1992; ROTH et al., 1990; PANIZOVSKY et al., 1999; VAZ E HOPMANS, 2001). O parâmetro α foi determinado também para cada solo individualmente (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Valores do parâmetro α .

Solo	α
Global (10 solos)	0,55
1	0,75
2	0,61
3	0,32
4	0,41
5	0,76
6	0,54
7	0,62
8	0,48
9	0,76
10	0,65

Pode-se notar que, para a maioria dos solos, os valores do parâmetro α estão entre 0,5 e 1, sendo consistente com os valores encontrados por diversos autores. Os baixos valores encontrados do parâmetro α para os solos 3 e 4 pode ser atribuído ao contato inadequado solo-sonda (ROTH *et al.*, 1990, DOBSON *et al.* 1985; VAZ e HOPMANS, 2001).

Substituindo o valor global do parâmetro α , bem como os parâmetros p , β , K_{probe} , K_s , K_w e K_{air} nas Equações 3.17 e 3.19, resultam as Equações 4.1 e 4.2, que permitem a determinação do teor de umidade volumétrico (θ) e do teor de umidade gravimétrico (w), utilizando a sonda helicoidal, em termos de constante dielétrica, porosidade e massa específica dos sólidos do solo.

$$\theta(\%) = 0.0995(1.4806K_{coil}^{0.1748} - 0.5740)^{3.1368} + 0.1103n - 0.2098 \quad (4.1)$$

$$w(\%) = \left(\frac{1}{10.038G_s(1-n)} \right) \left[(1.481K_{coil}^{0.1748} - 0.574)^{3.137} + 1.108n - 2.108 \right] \quad (4.2)$$

A Figura 4.3 também mostra a Equação 4.1, assumindo uma porosidade média igual a 0,60. Enquanto a Figura 4.4 inclui as curvas obtidas a partir dos valores extremos do parâmetro α .

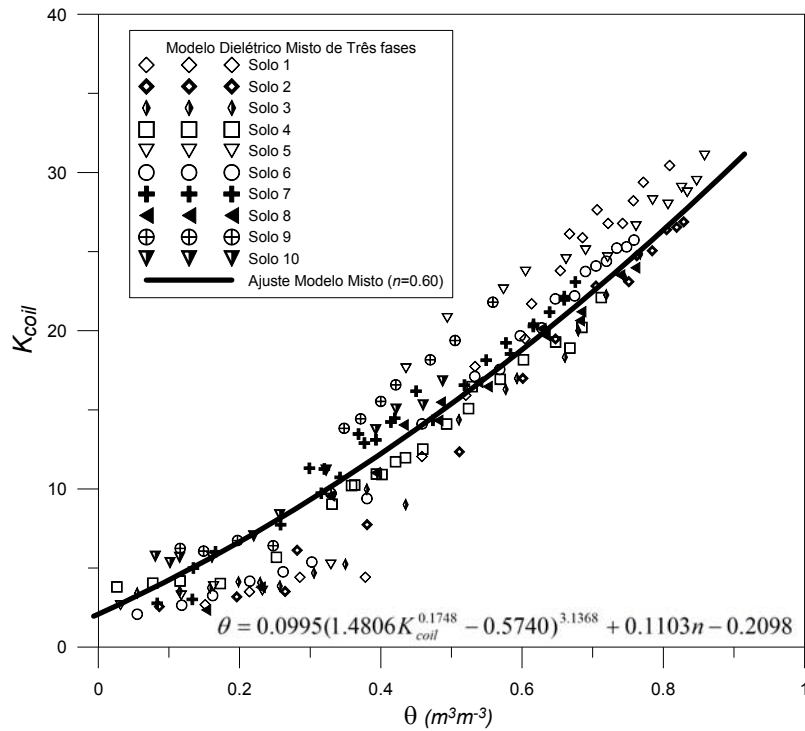


Figura 4.3 – Dados de calibração para a sonda TDR helicoidal usando a Equação 4.1 para os 10 solos, assumindo um valor médio de porosidade igual a 0,60.

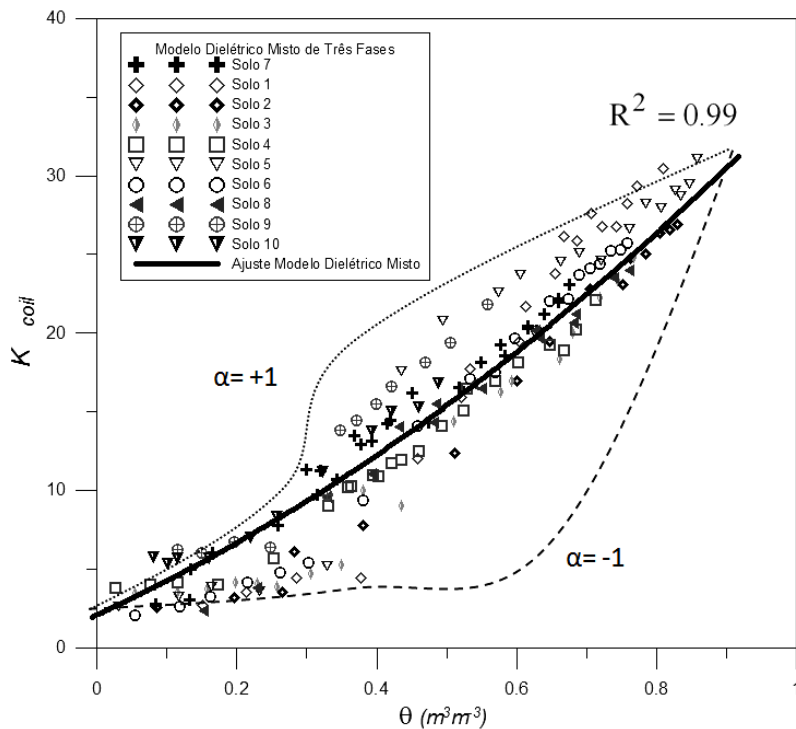


Figura 4.4 – Calibração da sonda TDR incluindo as curvas obtidas a partir dos valores extremos do parâmetro α .

Foram verificadas as limitações da correlação proposta por Topp et al., (1980) (Eq. 2.6) mencionadas na revisão bibliográfica deste trabalho. A Figura 4.5 mostra uma comparação entre as curvas de calibração obtidas através do Modelo Dielétrico Misto (Eq. 4.1) comparado com a calibração proposta por Topp et al. (1980). Na mesma Figura, é possível observar que os resultados do teor de umidade volumétrico obtidos usando a Equação 4.1, são mais sensíveis e mais próximos às umidades reais, quando comparados com os teores de umidade obtidos utilizando a Equação 2.6.

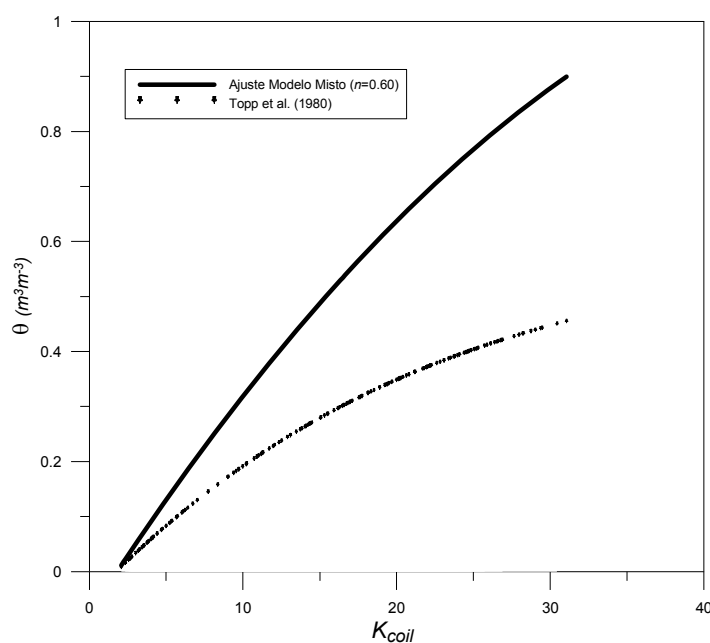


Figura 4.5 – Comparação entre as calibrações feitas através da Equação 4.1 versus a Equação 2.6.

4.3 Análises numéricas do Modelo Dielétrico Misto

Os dados correspondentes às diferentes amostras do solo (Tabela 3.1), incluindo os dados de dez diferentes solos estudados por Assis (2008), foram usadas no desenvolvimento de uma nova abordagem denominado Modelo Dielétrico Misto.

4.3.1 Resultados correspondentes ao Solo 1

A Tabela 4.2 mostra os valores de Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade, Índice de Plasticidade, Massa Específica dos Sólidos e a denominação do solo segundo a

classificação unificada. A Tabela 4.3 mostra as determinações dos valores de porosidade (n), massa específica seca (ρ_d), teor de umidade volumétrico (θ), leituras de constantes dielétricas (K) e a constante dielétrica estimada através do Modelo Dielétrico Misto.

Tabela 4.2 – Resultados de ensaios de caracterização para o Solo 1 (ASSIS, 2008)

ρ_s (g/cm ³)		2.59
Limites de Consistência	w_L (%)	35
	w_P (%)	22
	IP (%)	13
Classificação Unificada		SC

Tabela 4.3 – Resultados correspondentes ao Solo 1

Ensaio	Porosidade (n)	ρ_d (g/cm ³)	θ	K_{coil} (Leitura)	K_{coil} (Estimado)
1	0,5649	1,175	0,15	2,690	5,488
2	0,5671	1,169	0,21	3,510	7,041
3	0,5757	1,146	0,29	4,420	8,927
4	0,5548	1,202	0,38	4,420	11,678
5	0,5346	1,257	0,46	12,050	14,260
6	0,5635	1,179	0,52	15,920	16,202
7	0,5857	1,119	0,53	17,740	16,561
8	0,6330	0,991	0,60	19,490	18,833
9	0,6472	0,952	0,61	21,700	19,113
10	0,6682	0,896	0,65	23,790	20,497
11	0,6809	0,862	0,67	26,120	20,923
12	0,6987	0,813	0,69	25,880	21,526
13	0,7182	0,761	0,71	27,640	22,215
14	0,7337	0,719	0,72	26,780	22,740
15	0,7531	0,667	0,74	26,780	23,438
16	0,7680	0,626	0,76	28,210	23,959
17	0,7814	0,590	0,77	29,380	24,453
18	0,8166	0,495	0,81	30,440	25,746

4.3.2 Resultados correspondentes ao Solo 2

A Tabela 4.4 mostra os valores de Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade, Índice de Plasticidade, Massa Específica dos Sólidos e a denominação do solo segundo a classificação unificada. A Tabela 4.5 mostra as determinações dos valores de porosidade

(n), massa específica seca (ρ_d), teor de umidade volumétrico (θ), leituras de constantes dielétricas (K) e a constante dielétrica estimada através do Modelo Dielétrico Misto.

Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios de caracterização para o Solo 2 (ASSIS, 2008).

ρ_s (g/cm ³)	2,67
w_L (%)	115
Limites de Consistência	w_p (%) 76
	IP (%) 39
Classificação Unificada	CH

Tabela 4.5 – Resultados correspondentes ao Solo 2

Ensaio	Porosidade (n)	ρ_d (g/cm ³)	θ	K_{coil}	K_{coil}
				(Leitura)	(Estimado)
19	0,5657	1,173	0,09	2,560	4,007
20	0,6107	1,051	0,20	3,180	6,456
21	0,6461	0,955	0,26	3,520	8,143
22	0,6602	0,917	0,28	6,130	8,562
23	0,6694	0,893	0,38	7,740	11,372
24	0,6364	0,982	0,51	12,350	15,628
25	0,6597	0,919	0,60	16,990	18,623
26	0,6968	0,819	0,65	19,480	20,128
27	0,7261	0,739	0,70	22,830	22,121
28	0,7590	0,651	0,75	23,090	23,751
29	0,7658	0,632	0,76	24,740	24,161
30	0,7868	0,576	0,78	25,050	24,914
31	0,8073	0,520	0,80	26,380	25,626
32	0,8211	0,483	0,82	26,530	26,132
33	0,8314	0,455	0,83	26,880	26,475

4.3.3 Resultados correspondentes ao Solo 3

A Tabela 4.6 mostra os valores de Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade, Índice de Plasticidade, Massa Específica dos Sólidos e a denominação do solo segundo a classificação unificada. A Tabela 4.7 mostra as determinações dos valores de porosidade (n), massa específica seca (ρ_d), teor de umidade volumétrico (θ), leituras de constantes dielétricas (K) e a constante dielétrica estimada através do Modelo Dielétrico Misto.

Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios de caracterização para o Solo 3 (ASSIS, 2008).

	ρ_s (g/cm ³)	2.86
Limites de Consistência	w_L (%)	53
	w_P (%)	28
	IP (%)	25
Classificação Unificada		CH

Tabela 4.7 – Resultados correspondentes ao Solo 3

Ensaio	Porosidade (n)	ρ_d (g/cm ³)	θ	K_{coil}	K_{coil}
				(Leitura)	(Estimado)
34	0,5707	1,159	0,05	3,430	3,328
35	0,5842	1,123	0,12	3,550	4,603
36	0,6026	1,073	0,16	3,750	5,552
37	0,6172	1,034	0,20	4,130	6,504
38	0,6345	0,987	0,23	4,080	7,240
39	0,6473	0,952	0,26	3,860	7,931
40	0,6312	0,996	0,31	4,690	9,309
41	0,6192	1,028	0,35	5,240	10,628
42	0,6141	1,042	0,38	9,980	11,543
43	0,6090	1,056	0,44	9,010	13,260
44	0,6110	1,050	0,51	14,370	15,701
45	0,6195	1,027	0,58	16,290	17,924
46	0,6403	0,971	0,59	16,990	18,403
47	0,6413	0,968	0,66	18,330	20,836
48	0,6613	0,914	0,68	20,000	21,458
49	0,7027	0,803	0,72	22,260	22,768
50	0,7302	0,728	0,74	23,390	23,622
51	0,7538	0,665	0,77	24,850	24,392

4.3.4 Resultados correspondentes ao Solo 4

A Tabela 4.8 mostra os valores de Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade, Índice de Plasticidade, Massa Específica dos Sólidos e a denominação do solo segundo a classificação unificada. A Tabela 4.9 mostra as determinações dos valores de porosidade (n), massa específica seca (ρ_d), teor de umidade volumétrico (θ), leituras de constantes dielétricas (K) e a constante dielétrica estimada através do Modelo Dielétrico Misto.

Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de caracterização para o Solo 4 (ASSIS, 2008).

	ρ_s (g/cm ³)	2.91
Limites de Consistência	w_L (%)	25
	w_P (%)	15
	IP (%)	10
Classificação Unificada		SC

Tabela 4.9 – Resultados correspondentes ao Solo 4

Ensaio	Porosidade (n)	ρ_d (g/cm ³)	θ	K_{coil}	K_{coil}
				(Leitura)	(Estimado)
52	0,4301	1,539	0,03	3,810	3,058
53	0,4707	1,429	0,08	4,050	4,031
54	0,5485	1,219	0,12	4,180	4,705
55	0,5306	1,267	0,17	4,020	6,102
56	0,4960	1,361	0,25	5,680	8,255
57	0,4470	1,493	0,33	9,040	10,628
58	0,4228	1,558	0,36	10,210	11,532
59	0,4478	1,491	0,36	10,250	11,579
60	0,4473	1,492	0,39	10,940	12,524
61	0,4629	1,450	0,40	10,910	12,717
62	0,4825	1,397	0,42	11,710	13,247
63	0,4963	1,360	0,43	11,970	13,646
64	0,5031	1,342	0,46	12,520	14,406
65	0,5234	1,287	0,49	14,100	15,442
66	0,5408	1,240	0,52	15,080	16,416
67	0,5649	1,175	0,53	16,460	16,499
68	0,5796	1,135	0,57	16,930	17,806
69	0,6081	1,058	0,60	18,160	18,853
70	0,6205	1,025	0,65	19,280	20,440
71	0,6422	0,966	0,67	18,900	21,102
72	0,6606	0,916	0,68	20,210	21,650
73	0,6904	0,836	0,71	22,090	22,555

4.3.5 Resultados correspondentes ao Solo 5

A Tabela 4.10 mostra os valores de Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade, Índice de Plasticidade, Massa Específica dos Sólidos e a denominação do solo segundo a classificação unificada. A Tabela 4.11 mostra as determinações dos valores de porosidade (n), massa específica seca (ρ_d), teor de umidade volumétrico (θ), leituras de constantes dielétricas (K) e a constante dielétrica estimada através do Modelo Dielétrico Misto.

Tabela 4.10 – Resultados dos ensaios de caracterização para o Solo 5 (ASSIS, 2008).

ρ_s (g/cm ³)	3.09	
Limites de Consistência	w_L (%)	43
	w_P (%)	26
	IP (%)	17
Classificação Unificada	CL	

Tabela 4.11 – Resultados correspondentes ao Solo 5

Ensaio	Porosidade (n)	ρ_d (g/cm ³)	θ	K_{coil} (Leitura)	K_{coil} (Estimado)
74	0,5142	1,312	0,03	2,650	2,976
75	0,5579	1,194	0,12	3,270	4,715
76	0,5760	1,145	0,16	3,860	5,745
77	0,5594	1,190	0,23	3,570	7,542
78	0,5330	1,261	0,33	5,220	10,302
79	0,5295	1,270	0,44	17,620	13,551
80	0,5386	1,246	0,49	20,802	15,417
81	0,5325	1,262	0,57	22,610	18,150
82	0,5844	1,122	0,60	23,730	19,049
83	0,6257	1,011	0,66	24,520	20,964
84	0,6455	0,957	0,69	25,080	21,904
85	0,6815	0,860	0,72	24,640	22,929
86	0,7272	0,737	0,76	26,600	24,278
87	0,7540	0,664	0,78	28,250	25,078
88	0,7788	0,597	0,81	27,970	25,826
89	0,8007	0,538	0,83	29,030	26,491
90	0,8100	0,513	0,83	28,740	26,777
91	0,8253	0,472	0,85	29,470	27,243
92	0,8380	0,437	0,86	31,060	27,638

4.3.6 Resultados correspondentes ao Solo 6

A Tabela 4.12 mostra os valores de Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade, Índice de Plasticidade, Massa Específica dos Sólidos e a denominação do solo segundo a classificação unificada. A Tabela 4.13 mostra as determinações dos valores de porosidade (n), massa específica seca (ρ_d), teor de umidade volumétrico (θ), leituras de constantes dielétricas (K) e a constante dielétrica estimada através do Modelo Dielétrico Misto.

Tabela 4.12 – Resultados dos ensaios de caracterização para o Solo 6 (ASSIS, 2008).

ρ_s (g/cm ³)	2.72
Limites de Consistência	w_L (%) 52
	w_P (%) 33
	IP (%) 19
Classificação Unificada	MH

Tabela 4.13 – Resultados correspondentes ao Solo 6

Ensaio	Porosidade (n)	ρ_d (g/cm ³)	θ	K_{coil}	K_{coil}
				(Leitura)	(Estimado)
93	0,6152	1,039	0,06	2,080	3,230
94	0,6270	1,007	0,12	2,650	4,558
95	0,6211	1,023	0,16	3,260	5,595
96	0,6187	1,030	0,21	4,170	6,906
97	0,6088	1,056	0,26	4,760	8,176
98	0,6045	1,068	0,30	5,380	9,307
99	0,5716	1,157	0,38	9,390	11,694
100	0,5416	1,238	0,46	14,110	14,237
101	0,5533	1,206	0,53	17,110	16,669
102	0,5812	1,131	0,57	17,550	17,778
103	0,6113	1,050	0,60	19,680	18,681
104	0,6388	0,975	0,63	20,180	19,654
105	0,6534	0,936	0,65	22,010	20,297
106	0,6728	0,884	0,67	22,200	21,219
107	0,6881	0,842	0,69	23,740	21,725
108	0,7028	0,802	0,70	24,090	22,219
109	0,7176	0,763	0,72	24,390	22,718
110	0,7327	0,722	0,73	25,220	23,211
111	0,7467	0,684	0,75	25,300	23,682
112	0,7569	0,656	0,76	25,730	24,042

4.3.7 Resultados correspondentes ao Solo 7

A Tabela 4.14 mostra os valores de Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade, Índice de Plasticidade, Massa Específica dos Sólidos e a denominação do solo segundo a classificação unificada. A Tabela 4.15 mostra as determinações dos valores de porosidade (n), massa específica seca (ρ_d), teor de umidade volumétrico (θ), leituras de constantes dielétricas (K) e a constante dielétrica estimada através do Modelo Dielétrico Misto.

Tabela 4.14 – Resultados dos ensaios de caracterização para o Solo 7 (ASSIS, 2008).

ρ_s (g/cm ³)		2.70
Limites de Consistência	w_L (%)	25
	w_P (%)	16
	IP (%)	9
Classificação Unificada		SC

Tabela 4.15 – Resultados correspondentes ao Solo 7.

Ensaio	Porosidade (n)	ρ_d (g/cm ³)	θ	K_{coil}	K_{coil}
				(Leitura)	(Estimado)
113	0,4359	1,523	0,299	11,310	9,737
114	0,4642	1,447	0,083	2,770	4,185
115	0,5234	1,287	0,133	3,020	5,167
116	0,3819	1,669	0,320	11,260	10,520
117	0,4253	1,552	0,368	13,470	11,819
118	0,4349	1,526	0,414	14,230	13,208
119	0,4678	1,437	0,450	16,180	14,229
120	0,5717	1,156	0,584	18,530	18,348
121	0,6096	1,054	0,616	20,270	19,345
122	0,6517	0,940	0,660	21,950	20,763
123	0,5321	1,263	0,13	5,000	5,180
124	0,5336	1,259	0,17	6,030	5,922
125	0,4208	1,564	0,26	7,740	8,642
126	0,3802	1,673	0,32	9,730	10,397
127	0,3872	1,655	0,34	10,730	11,163
128	0,4255	1,551	0,38	12,900	12,075
129	0,4404	1,511	0,39	13,100	12,523
130	0,4595	1,459	0,42	14,470	13,291
131	0,4910	1,374	0,47	14,340	14,917
132	0,5190	1,299	0,52	16,560	16,301
133	0,5497	1,216	0,55	18,140	17,235
134	0,5775	1,141	0,58	19,230	18,102
135	0,6172	1,034	0,62	20,410	19,331
136	0,6396	0,973	0,64	21,170	20,058
137	0,6603	0,917	0,66	22,150	20,730
138	0,6754	0,876	0,68	23,080	21,250

4.3.8 Resultados correspondentes ao Solo 8

A Tabela 4.16 mostra os valores de Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade, Índice de Plasticidade, Massa Específica dos Sólidos e a denominação do solo segundo a classificação unificada. A Tabela 4.17 mostra as determinações dos valores de porosidade

(n), massa específica seca (ρ_d), teor de umidade volumétrico (θ), leituras de constantes dielétricas (K) e a constante dielétrica estimada através do Modelo Dielétrico Misto.

Tabela 4.16 – Resultados dos ensaios de caracterização para o Solo 8 (ASSIS, 2008).

	ρ_s (g/cm ³)	2.66
Limites de Consistência	w_L (%)	35
	w_P (%)	21
	IP (%)	14
Classificação Unificada		SC

Tabela 4.17 – Resultados correspondentes ao Solo 8.

Ensaio	Porosidade (n)	ρ_d (g/cm ³)	θ	K_{coil}	K_{coil}
				(Leitura)	(Estimado)
139	0,5581	1,193	0,15	2,350	5,543
140	0,5259	1,280	0,23	3,790	7,570
141	0,4424	1,505	0,33	9,560	10,574
142	0,4753	1,417	0,43	14,040	13,637
143	0,5129	1,315	0,39	11,020	12,271
144	0,5156	1,308	0,49	15,480	15,202
145	0,5224	1,289	0,48	14,330	15,062
146	0,5501	1,215	0,54	16,750	16,856
147	0,5597	1,189	0,55	16,470	17,270
148	0,6361	0,982	0,63	19,700	19,872
149	0,6302	0,999	0,63	20,130	19,678
150	0,6841	0,853	0,68	20,640	21,455
151	0,6859	0,848	0,68	21,200	21,517
152	0,7412	0,699	0,74	23,510	23,364
153	0,7620	0,643	0,76	23,970	24,094

4.3.9 Resultados correspondentes ao Solo 9

A Tabela 4.18 mostra os valores de Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade, Índice de Plasticidade, Massa Específica dos Sólidos e a denominação do solo segundo a classificação unificada. A Tabela 4.19 mostra as determinações dos valores de porosidade (n), massa específica seca (ρ_d), teor de umidade volumétrico (θ), leituras de constantes dielétricas (K) e a constante dielétrica estimada através do Modelo Dielétrico Misto.

Tabela 4.18 – Resultados dos ensaios de caracterização para o Solo 9 (ASSIS, 2008).

	ρ_s (g/cm ³)	2.93
Limites de Consistência	w_L (%)	35
	w_P (%)	21
	IP (%)	14
Classificação Unificada		SC

Tabela 4.19 – Resultados correspondentes ao Solo 9.

Ensaio	Porosidade (n)	ρ_d (g/cm ³)	θ	K_{coil}	K_{coil}
				(Leitura)	(Estimado)
154	0,5577	1,194	0,12	6,240	4,682
155	0,5608	1,186	0,15	6,070	5,448
156	0,5389	1,245	0,20	6,740	6,687
157	0,5095	1,324	0,25	6,410	8,091
158	0,4428	1,505	0,33	9,720	10,601
159	0,4671	1,439	0,35	13,830	11,071
160	0,4931	1,369	0,37	14,430	11,685
161	0,5133	1,314	0,40	15,530	12,487
162	0,5138	1,313	0,42	16,580	13,149
163	0,5152	1,309	0,47	18,160	14,710
164	0,5341	1,258	0,51	19,380	15,800
165	0,5658	1,172	0,56	21,800	17,500

4.3.10 Resultados correspondentes ao Solo 10

A Tabela 4.20 mostra os valores de Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade, Índice de Plasticidade, Massa Específica dos Sólidos e a denominação do solo segundo a classificação unificada. A Tabela 4.21 mostra as determinações dos valores de porosidade (n), massa específica seca (ρ_d), teor de umidade volumétrico (θ), leituras de constantes dielétricas (K) e a constante dielétrica estimada através do Modelo Dielétrico Misto.

Tabela 4.20 – Resultados dos ensaios de caracterização para o Solo 10 (ASSIS, 2008).

ρ_s (g/cm ³)	2.690	
Limites de Consistência	w_L (%)	28
	w_P (%)	20
	IP (%)	8
Classificação Unificada	SC	

Tabela 4.21 – Resultados correspondentes ao Solo 10.

Ensaio	Porosidade (n)	ρ_d (g/cm ³)	θ	K_{coil}	K_{coil}
				(Leitura)	(Estimado)
166	0,5450	1,228	0,08	5,740	3,930
167	0,5672	1,169	0,10	5,340	4,334
168	0,5793	1,136	0,12	5,670	4,610
169	0,5544	1,203	0,16	5,680	5,745
170	0,5200	1,296	0,22	7,030	7,332
171	0,5081	1,328	0,26	8,360	8,344
172	0,4624	1,451	0,32	11,180	10,335
173	0,4481	1,490	0,39	13,730	12,494
174	0,4680	1,436	0,42	15,040	13,321
175	0,4889	1,380	0,46	15,300	14,476
176	0,5054	1,335	0,49	16,820	15,321

A Figura 4.6 mostra a comparação entre os valores de teor de umidade volumétrico estimados utilizando o parâmetro α_{global} e aqueles determinados em laboratório ($\theta_{estimado}$ versus θ_{lab}), onde a linha reta, que passa pela origem, mostra uma boa concordância entre as duas medições. Assim, com esta calibração feita em laboratório, pode-se obter uma boa acurácia nas medições de campo. A Figura 4.7 mostra a comparação semelhante, usando o parâmetro α para cada solo.

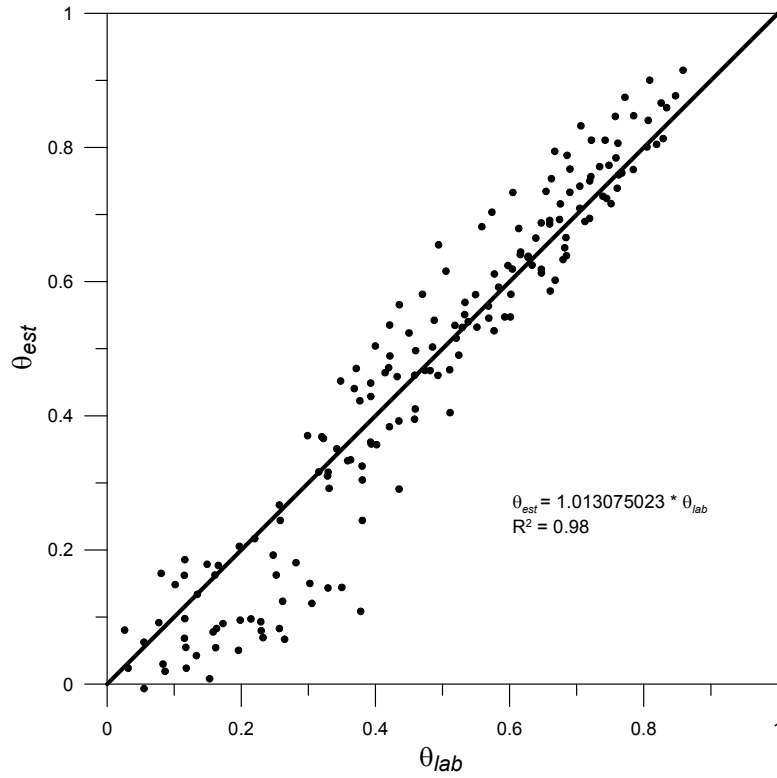


Figura 4.6 – Comparação entre valores de teor de umidade volumétrico e aqueles determinados no laboratório, usando o parâmetro global α .

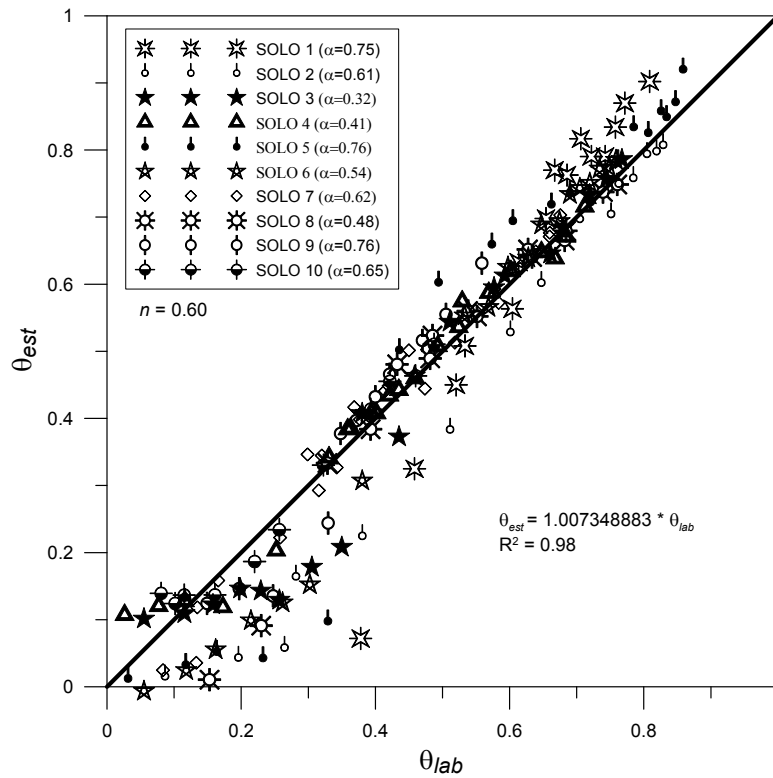


Figura 4.7 – Comparação entre valores de teor de umidade volumétrico e aqueles determinados no laboratório, usando o parâmetro α para cada solo.

Como era de se esperar, o uso de valores específicos do parâmetro α para cada solo levam à menor dispersão entre os valores estimados do teor de umidade volumétrico que aqueles determinados em laboratório.

4.4 O efeito da porosidade do solo

A Figura 4.8 mostra uma comparação entre os valores de teor de umidade volumétrico estimados e as constantes dielétricas lidas com a sonda helicoidal. Para a determinação dos valores de teor de umidade volumétrico estimados foram utilizados valores de porosidade determinados através da Equação 3.4 (n_{lab}), e aqueles estimados utilizando um valor médio de porosidade (n_{avg}). A Figura 4.9 mostra os erros dos valores estimados para o teor de umidade volumétrico versus n_{lab} .

Verificou-se que, quando se usa a Equação 4.1 para a determinação do teor de umidade volumétrico, a influência da porosidade é muito pequena. Para $0,5 < n < 0,7$ o erro está próximo a zero. Fora deste intervalo, o erro é inferior a 5%. Portanto, alternativamente, um valor médio de porosidade poderia ser adotado.

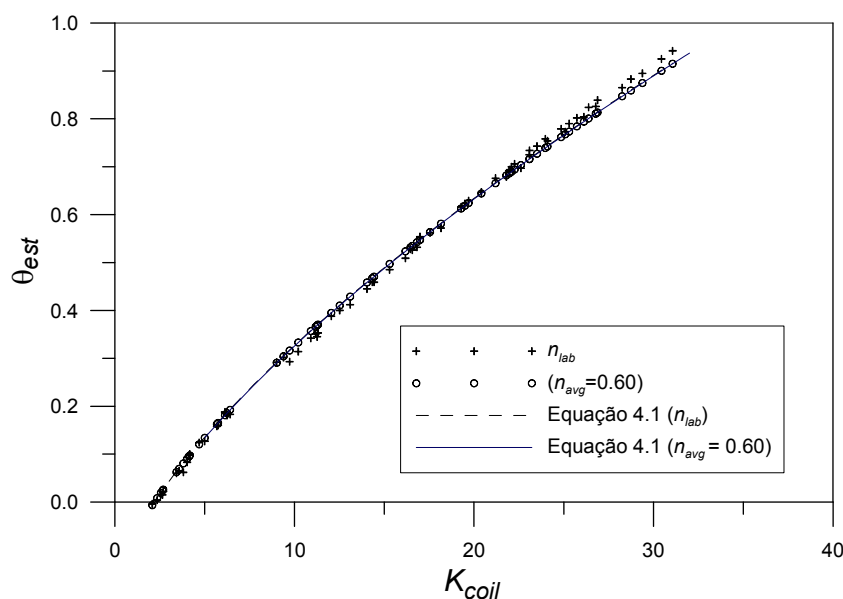


Figura 4.8 – Comparação entre os valores do teor de umidade volumétrico estimados usando valores de porosidades determinados através da Equação 4.1 e aqueles estimados usando um valor médio de porosidade.

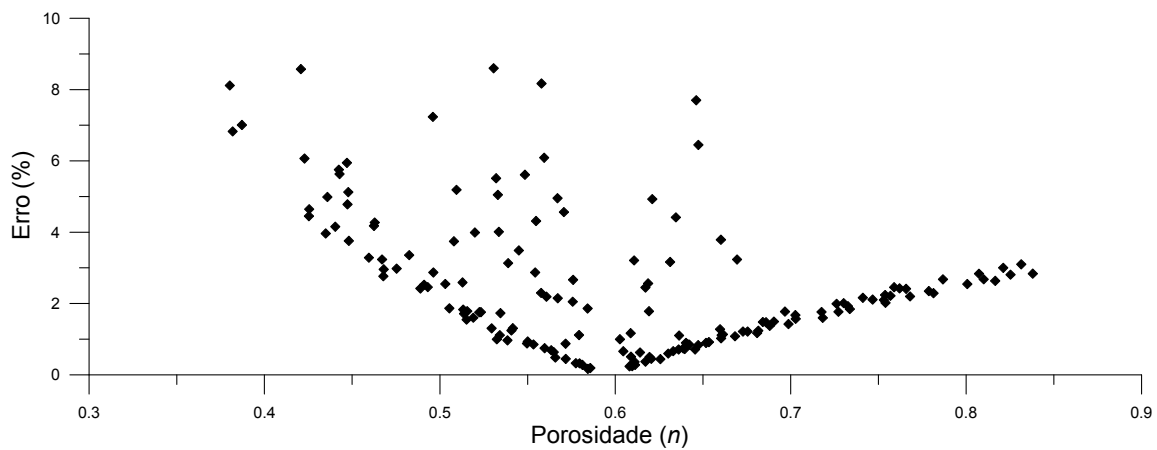


Figura 4.9 – Erros estimados para o teor de umidade volumétrico.

4.5 Influência da plasticidade na determinação da constante dielétrica

Pode-se observar na Tabela 2 que os solos 1, 2, 3, 5 e 6 apresentam alta plasticidade, enquanto que os solos 4, 7 e 10 mostram a plasticidade de baixo a média. Ele pode ser observado na Figura 4.4, onde os solos altamente plásticos mostram uma maior dispersão em relação à equação ajustada quando comparados aos solos com baixa a média plasticidade. Uma explicação para esse comportamento pode ser a de que é mais difícil obter uma distribuição homogênea da água em solos que possuem alta plasticidade.

5 CONCLUSÕES

A concepção da nova sonda TDR para fins geotécnicos foi avaliada. A principal vantagem desta sonda é que ela pode ser usada para determinar o teor de umidade tanto gravimétrico quanto volumétrico dos solos, em diferentes profundidades do mesmo. Comparado com a sonda padrão TDR, com hastes em linha reta, a nova sonda consiste em duas tiras de cobre paralelas enrolada em torno de um núcleo de aço-nylon.

Ensaio realizados em laboratório permitirem o desenvolvimento de duas equações de calibração (Eq. 4.1 e Eq.4.2) para a avaliação satisfatória do conteúdo volumétrico e gravimétrico de água no solo.

Os resultados mostram que o teor de umidade volumétrico determinado pelo modelo misto dielétrico, através da Eq. 4.1 com um parâmetro alfa constante, é apropriado para descrever a constante dielétrica de diferentes solos. O melhor valor do parâmetro alfa ajustado em nosso estudo é próximo a 0,5 - valor este utilizado por razões teóricas por Birchak *et al.* (1974).

Fica claro que o teor de umidade volumétrico depende da granulometria do solo, o que é presumível devido a uma interação entre as fases sólida e líquida. Em nosso estudo não foi possível detectar uma grande influência da porosidade na determinação do teor de umidade volumétrico, especialmente quando este parâmetro encontra-se no intervalo entre 0,5 e 0,7 (Figura 4.8). Na maioria dos casos, este parâmetro poderá ser estimado com base em dados de informação sobre o solo.

A concordância entre $\theta_{estimado}$ versus θ_{lab} foi excelente (Figura 4.3). Assim, com esta calibração, pode-se obter boa acurácia nas medições de teor de umidade em campo. No

entanto, será importante uma cuidadosa instalação da sonda, pois, a criação de lacunas de ar perto da sonda TDR levaria a cometer erros significativos.

Sugestões para trabalhos futuros:

Devido que a sonda TDR helicoidal calibrada neste trabalho é um protótipo, torna-se necessário aperfeiçoar sua geometria, de tal forma seja capaz de trabalhar juntamente com um equipamento CPT (cone penetration test). Além disso, precisam-se proteger as hastes da sonda, para que esta seja capaz de suportar altos esforços durante sua cravação em campo.

5.1 REFERÊNCIAS

ANDRADE, C. L. T.; COSTA, E. L.; ALBUQUERQUE, E. P. *Desenvolvimento e calibração de guias de onda para TDR*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. V. 7, nº. 1, p. 173-176, 2003.

ASTM D 6780. *Standard test method for water content and density of soil in place by time domain reflectometry (TDR)*. Annual Book of ASTM Standards, 2005.

ASSIS, C. D. DE. *Avaliação de uma sonda TDR helicoidal para a estimativa do teor de umidade dos solos em campo e laboratório*. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 178 p., 2008.

BAKER, T. H.; GOODRICH, L. E. *Measurement of soil water content using the combined time domain reflectometry – thermal conductivity probe*. Canadian Geotechnical Journal, v.24; p. 160-163.1987.

BAUMGARTNER, N.; PARKIN, G. W.; ELRICK, D. E. *Soil water content and potential measured by hollow time domain reflectometry probe*. Soil Sci. Soc. Am. J., v.58, p. 315-318.1994.

BENSON, C. H. ; BOSSCHER, P. J. ; LANE, D. T. ; PLISKA, R. J. *Monitoring system for hydrologic evaluation of landfill covers*. Geotechnical Testing Journal, V.17, nº 2, p. 138-149, 1994.

BIRCHAK, J. R.; C. G. GARDNER, J. E. HIPPIE; J.M. VICTOR. *High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture*, Proc. IEEE, v.62(1), p.93-98, 1974.

BORTOLUCCI, A. A. *Caracterização geológico-geotécnica da região urbana de São Carlos, a partir de sondagens de simples reconhecimento*. Dissertação de Mestrado. EESC-USP. 1983.

CARNEIRO, B. J. I.; CONCIANI, W. *Emprego do TDR para Acompanhar a Evolução da Infiltração de Água no Solo*. In: Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados/ ÑSAT'97, 3, Rio de Janeiro, Ed. Abril, pp. 215-220. 1997.

CONCIANI, W.; HERRMANN JR. P.S.P; MACHADO S.L.; SOARES, M.M. *Uso da técnica de reflectometria no domínio do tempo (TDR) para a determinação da umidade do solo in situ*. Solos e Rochas, São Paulo, 19 (3), 189 -199, Dezembro 1996.

COSTA, Y. D. J. *Estudo do comportamento de solo não saturado através de provas de carga em placa*. São Carlos, 1999. 138p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

DAVIS, J. L.; CHUDOBIAK, W. J. *In situ meter for measuring relative permittivity of soils*. Geol. Surv. Can., Part A Paper, 75:75-79, 1975.

DASBERG, S.; HOPMANS, J. W. *Time-domain reflectometry calibration for uniformly and nonuniformly wetted sandy and clayey loam soils*. Soil Sci. Soc. Am. J. 56, 1341–1345, 1992.

DIENE, A. A. *Desenvolvimento de tensiômetros para a sucção elevada, ensaiados em lisímetros de laboratório*. Tese de Mestrado. COPPE-UFRJ. 2004.

DIRKSEN, C.; DASBERG, S. *Improved calibration of time-domain reflectometry soil water content measurement*. Soil Sci. Soc. Am. J. 57, 660 – 668, 1993.

DOBSON, M. C. ; ULABY, F. T. ; HALLIKAINEN, M. T. ; EL-RAYES, M. A. *Microwave dielectric behavior of wet soil. Part II: dielectric mixing models*. IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing GE-23: 35-46. 1985

DOWDING, D. G.; HUANG, F. C. *Early detection of rock movement with time domain reflectometry*. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, V. 120, nº 8, p. 1413-1427, 1994.

DRNEVICH, V. P. ; YU, X. ; LOVELL, J. ; TISHMACK, J. *Temperature effects on dielectric constant determined by time domain reflectometry*. TDR 2001: Second International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Geotechnical Applications. 10 p., 2001.

ESQUIVEL, E.R.; GIACHETI, H. L. *Development of a new TDR probe for determining soil water content and dry density*. ASCE – Geotechnical Special Publication, V. 162, 2007.

FERRE, P. A.; RUDOLPH, D. L.; KACHANOSKI, R. G. *Spatial averaging of water content by time domain reflectometry: implications for twin rod probes with and without dielectric coating*. Water Resources Research. V. 32, nº. 2, p. 271-279. 1996.

FRIEDMAN, S.P. *A saturation degree-dependent composite spheres model for describing the effective dielectric constant of unsaturated porous media.* Water Resour. Res. 34 (11), pp. 2949–2961, 1998.

HALLIKAINEN, M. T.; ULABY, F. T.; DOBSON, M. C.; EL-RAYES, M. A. *Microwave dielectric behavior of wet soil, Empirical models and experimental observations.* Geoscience Remote Sens. V. 23, nº 1, p. 25-34. 1985.

HEIMOVAARA, T. J. *Frequency domain analysis of time domain reflectometry waveforms. 1. Measurement of the complex dielectric permittivity of soils.* Water Resources Research. V. 30, p.189-199, 1994.

HERKELRATH, W. N.; HAMBURG, S. P.; MURTHY, F. *Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry.* Water Resources Research. V. 27, nº. 5, p. 857-864. 1991.

HERRMANN JÚNIOR, P. S. P. *Construção de um equipamento para medida de umidade do solo através de técnica de microondas.* São Carlos: USP, 1993. 124 p. Dissertação de mestrado.

HUGH, B. G. *Comparison of techniques for measuring the water content of soil and other porous media.* Thesis of Master of Science in Agriculture. University of Sidney - New South Waley. Australia. 1999.

INOUE, Y., WATANABE, T., KITAMURA, K. *Prototype time-domain reflectometry probes for measurements of moisture content near the soil surface for applications to on the move measurements*. *Agric. Water Manag.*, 50:41-52, 2001.

JACOBSEN O.H; SCHJONNING P. *A laboratory calibration of time-domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture*. *Journal of Hydrology*, 151:147-157.1993.

JOAQUIM JR., G. O. *Desempenho do reflectômetro no domínio do tempo na detecção de variações de umidade do solo*. Dissertação de Mestrado. ESALQ-USP. 2003.

JONES, S. B.; WRAITH, J. M.; OR. D. *Time domain reflectometry (TDR) measurements principles and applications*. *HP Today Scientific Briefing. Hydrol. Process J.* 16:141-153, 2002.

KENG, J. C. W.; TOPP, G. C. *Measuring water content of soil columns in the laboratory: A comparison of gamma ray attenuation and time-domain techniques*. *Can. J. Soil Sci.*, 63, 37-43. Lancaster, G., 1983.

KLEMUNES JR., J. *Determining soil volumetric moisture content using time domain reflectometry*. FHWA-RD-97-139, 1998.

KUJALA, K.; RAVASKA, O. *Soil water content measurement with a time domain reflectometer*. Rotterdam, Holanda A.A. Balkema 1994.

LOOK, B.; REEVES, I. *The Application of Time Domain Reflectometry in Geotechnical Instrumentation*, ASTM Geotechnical Testing Journal. Set. 1992.

MALICKI, M. A. ; PLAGGE, R. ; RUTH, C. H. *Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into consideration the solid soil*. European Journal Soil Science. V. 47, n° 3, p. 357-366. 1996.

NISSEN, H. H.; MOLDRUP, P.; HENRIKSEN, K. *High-Resolution time domain reflectometry coil probe for measuring soil water content*. Soil Science Society America Journal. V. 62, p. 1203-1211. 1998.

OR, D.; JONES, S. B.; VANSHAAR, J. R.; HUMPHRIES, S.; KOBERSTEIN, L. *WintTDR Soil Analysis Software – Users Guide*. Utah State University, Plants, Soils & Biometeorology, Logan, 2004.

PERSSON, M.; BERNDTSSON, R. *Noninvasive Water Content and Electrical Conductivity Laboratory Measurements Using Time Domain Reflectometry*. Soil Science Society American Journal, vol. 62, pp. 1471-1476. 1998.

PERSSON, M.; WRAITH, J. M. *Shaft-mounted time domain reflectometry probe for water content and electrical conductivity measurements*. Vadose Zone Journal. V.1, p. 316-319, 2002.

PONIZOVSKY, A.A.; CHUDINOVA, S.M.; PACHEPSKY, Y.A. *Performance of TDR calibration models as affected by soil texture*. Journal of Hydrology, Amsterdam, v.218, p.35-42, 1999.

RADA, G. R.; ELKINS, G. E.; HENDERSON, B.; VAN SAMBEEK, B.; LÓPEZ, A. JR. *LTPP Seasonal Monitoring program: Instrumentation Installation and Data Collection Guidelines*, FHWA-RD-94-110. Abril 1994.

RAMO, S.; WHINNERY, J.R.;VAN DUZER, T. *Fields and waves in communication electronics*. 3rd ed. John Wiley & Sons, New York. 1994.

REDMAN, J. D.; S. M. DERYCK. *Monitoring non-aqueous phase liquids in the subsurface with multilevel time domain reflectometry probes*. p. 207-214, 1994.

ROTH, K.; SHULIN, R.; FLÜHLER, H; ATTINGER, W. *Calibration of Time Domain Reflectometry for Water Content Measurement Using a Composite Dielectric Approach*. Water Resources Research, V. 26, nº. 10, pp. 2267-2273, Oct. 1990.

SCOTT, M. G.; PHANG, W. A.; PATTERSON, D. E. *Developments In Situ Monitoring of Moisture in Pavement Structures by Time Domain Reflectometry (TDR)*, The Transportation technology and Energy Branch, Ontario Ministry of Transportation and Communications. Julio 1983.

SELIG, E. T.; MANSUKHANI, S. *Relationship of Soil Moisture to the Dielectric Property*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 101, N.8, pp. 755-770, Ag. 1975.

SELKER, J. B.; GRAFF, L.; STEENHUIS, T. *Noninvasive time domain reflectometry moisture measurement probe*. Soil Science Society of America Journal. V. 57, p. 934-936, 1993.

SIDDIQUI, S. I.; DRNEVIVICH, V. P. *A new method of measuring density and moisture content of soil using the technique of Time Domain Reflectometry*. Rep. N° FHWA/IN/JTRP-95/9, Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation Purdue University, 1995.

SIDDIQUI, S.I.; DRNEVICH, V.; DESCHAMPS, R. J. *Time domain reflectometry for use in geotechnical engineering*. Geotechnical Testing Journal, V. 23, N° 1, p. 9-20, March 2000.

SIHVOLA, A. H. *Eletromagnetic mixing formulas and applications*. Institution of Electrical Engineers, London. 1999.

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

SOUZA, C.F.; MATSURA, E. E.; FOLEGATTI, M. V.; COELHO, E. F.; OR, D. *Sondas de TDR para a estimativa da umidade e da condutividade elétrica do solo*. ISSN 1808-3765. Irriga, Botucatu, v. 11, n. 1, p. 12-25. Janeiro-Março, 2006.

TEKTRONIX 1502C, USER MANUAL. Metallic Time-Domain Reflectometer, serial number: B020000 November, 1999

TOMMASELLI, J. T. G.; BACCHI, O. O. S. *Calibração de um equipamento de refletometria de microondas para dois solos paulistas típicos*. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 25., 1995, Viçosa: UFV, 1995. V. 1, p. 24-26.

TOMMASELLI, J. T. G.; BACCHI, O. O. S. *Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade se solos*. Pesquisa Agropecuária Brasileira. V. 36, nº. 9, p. 1145-1154. Brasília, 2001.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN A. P. *Eletromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission line*. Water Resource Research, V.16, nº 3, p. 574-582, 1980.

TOPP, G.C.; DAVIS, J. L.; ANNAN A. P. *Electromagnetic determination of soil water content using TDR: II. Evaluation of installation and configuration of parallel transmission lines*. Soil. Sci. Soc. Am. J. 46, pp. 678–684. 1982.

TOPP G. C.; DAVIS J. L. *Measurement of soil water content using time domain reflectometry (TDR): A field evaluation*. Soil Sci. Soc. Am. J., vol.49, p.19-24. 1985.

TOPP, G. C.; FERRÉ, P.A. *The soil solution phase*. In: DANE, J.H. & TOPP, G.C., eds. Methods of soil analysis. Wisconsin, Soil Science Society of America, P. 417-1071, 2002.

TRINTINALHA, M. A.; GONÇALVES, A. C. A.; VINICIUS, M. *Efeito da instalação e da variabilidade entre sondas no uso da técnica de TDR em um Nitossolo Vermelho Distroférico*. Acta Scientiarum, Maringá. V. 23, nº. 5, p. 1165-1171. 2001.

VAZ, C. M. P.; HOPMANS, J. W. *Simultaneous measurements of soil penetration resistance and water content with a combined penetrometer - TDR moisture probe*. Soil Science Society of America Journal. Madison: V. 65, nº.1, p. 4-12, 2001.

VIEIRA, A. M.; OLIVEIRA, O. M.; MARINHO, F. A. M. *Aspectos da curva de calibração do TDR para um solo residual compactado*. Solos e Rochas, São Paulo. V. 28, nº. 3, p. 295-306. 2005.

WANG, J. R.; SCHMUGGE, T. J. *An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content*. NASA Technology Memo. 1978.

WARD, A. L.; KACHANOSKI R.G.; ELRICK, D. E. *Laboratory measurements of solute transport using time domain reflectometry*. Soil Sci. Soc. Am. J., vol.58, p.1031-1039.1994.

WOBSCHALL, D. *A theory of the complex dielectric permittivity of soil containing water: The semidisperse model*, IEEE Transactions on Geoscience Electronics, GE-15(1), p. 49-58. 1977.

YU, C.; WARRICK, A. W.; CONKLIN, M. H.; YOUNG, M. H.; ZREDA, M. *Two and three parameter calibrations of time domain reflectometry for soil moisture measurement*. Water Resources Research. V. 33, p. 2417-2421, 1997.

YU, X.; DRNEVICH, P. *Soil water content and dry density by time domain reflectometry*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, V. 130, n°. 9, p. 922-934, 2004.

ZEGELIN, S. J.; WHITE, I.; JENKINS, D. R. *Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry*. Water Resource Res., 25(11), 2367-2376, 1989.

ZEGELIN, S. J.; WHITE, I.; RUSSELL, G.F. *A critique of the time domain reflectometry technique for determining soil-water content*. In: Topp, G.C., Reynolds, W.D., Green, R.E. (Eds.), *Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice*. Soil Sci. Soc. Amer., Madison, WI, USA, SSSA Spec. Publ. 30, 187–208, 1992.

