JOSIANE DA CRUZ GRAMELICH

AVALIAÇÃO DA FUNÇÃO DE CALIBRAÇÃO USADA PARA ESTIMATIVA DA UMIDADE VOLUMÉTRICA DE DIFERENTES SOLOS COM A TÉCNICA DE TDR

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Kátia Vanessa Bicalho

Coordenador: Marta Monteiro da Costa Cruz

VITÓRIA 2015 Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP) (Biblioteca Setorial Tecnológica, Universidade Federal Do Espírito Santo, ES, Brasil)

Gramelich, Josiane da Cruz, 1984-

G745a Avaliação da função de calibração usada para estimativa da umidade volumétrica de diferentes solos com a técnica de TDR / Josiane da Cruz Gramelich. – 2015.
 104 F. : il.

Orientador: Kátia Vanessa Bicalho. Dissertação (Mestrado Em Engenharia Civil) – Universidade Federal Do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

 Solos – Umidade. 2. Calibração. 3. Técnica Tdr (Reflectometria no Domínio do Tempo). I. Bicalho, Kátia Vanessa. II. Universidade Federal Do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

RESUMO

AVALIAÇÃO DA FUNÇÃO DE CALIBRAÇÃO USADA PARA ESTIMATIVA DA UMIDADE VOLUMÉTRICA DE DIFERENTES SOLOS COM A TÉCNICA DE TDR

Objetivo: Esta dissertação avalia o uso de uma sonda que utiliza a técnica da reflectometria no domínio do tempo, conhecida como TDR, para estimativa da umidade volumétrica (θ) de diferentes solos. As vantagens do TDR incluem a possibilidade de determinação de θ do solo através do uso de uma técnica não destrutiva, que permite realizar várias medidas no mesmo local ao longo do tempo. Entretanto, os resultados obtidos pela técnica dependem da calibração adotada, ou seja, a relação entre a constante dielétrica relativa aparente do solo e a sua correspondente umidade volumétrica. Assim, esta pesquisa verifica, através de ensaios de campo e laboratório, a validade do uso da calibração do TDR, conhecida como "Equação Universal", proposta por Topp et al. (1980) para diferentes tipos de solos e valores de umidades volumétricas. Os solos ensaiados são do grupo barreiras da região litorânea do município de Serra, localizada na Grande Vitória, ES, e apresentam mais de 30% de finos. Foram também ensaiadas microesferas de vidro, utilizadas como solo padrão. Avaliam-se, também, se algumas das equações existentes na bibliografia podem ser utilizadas na calibração dos materiais estudados.

Resultados: Os resultados experimentais mostram que a calibração proposta por Topp et al., (1980) não é aplicável para os solos ensaiados para θ entre 15% e 30%. Porém, no caso das microesferas de vidro, as medidas ficaram dentro do intervalo de incerteza. Somente a equação proposta por Medeiros *et al.* (2011) apresentou bons resultados para os solos ensaiados. **Conclusão**: Recomenda-se uma calibração específica para cada tipo de solo utilizado, quando há a necessidade de determinações mais precisas.

Descritores: Umidade volumétrica, TDR, calibração

ABSTRACT

AVALIAÇÃO DA FUNÇÃO DE CALIBRAÇÃO USADA PARA ESTIMATIVA DA UMIDADE VOLUMÉTRICA DE DIFERENTES SOLOS COM A TÉCNICA DE TDR

Purpose: This dissertation evaluates the use of a probe that uses the technique of time domain reflectometry, known as TDR, to estimate the volumetric water content (θ) of different soils. The TDR advantages include the possibility of determining θ through the use of a non-destructive technique that allows performing severals measurements at the same place over time. However, the results obtained depend on the calibration, meaning the relationship between the apparent relative dielectric constant of the soil and its water content adopted. Thus, this research verifies, through field and laboratory tests, the validity of using the calibration of the TDR, known as "Universal Equation", proposed by Topp et al. (1980) for different soil types and volumetric water content. The tested soils are the barriers group from the city of Serra, located in Vitória, ES, and present more than 30% of fines. Glass microspheres were also tested, used as standard soil. It is also evaluated if some of the existing equation in the literature can be used for calibration of the materials studied.

Results: The experimental results show that the calibration proposed by Topp et al., (1980) do not apply for the tested soils for θ between 15% and 30%. However, as for the glass microspheres, the measures were within the range. Only the equation proposed by Medeiros et al. (2011) showed good results for the tested soils. **Conclusion**: We recommend a specific calibration for each studied soil.

Key words: volumetric moisture, TDR, calibration

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - ESQUEMA DE UMA SONDA DE NÊUTRONS NO SOLO	18
FIGURA 2 - MODELOS DE CONFIGURAÇÕES DE SONDAS TDR	23
FIGURA 3 - ALGUMAS SONDAS TDR COMUMENTE UTILIZADAS: (A) SONDA COAXIAL, (B) SONDA DE DUAS HASTES, (C) SONDA COMPOSTA POR TRÊS HASTES, (D) SONDA DE QUATRO HASTES	24
FIGURA 4 - ESQUEMA DE INTERPRETAÇÃO DA TÉCNICA TDR	26
FIGURA 5 – CONVERSOR SM-USB CONECTADO À SONDA TDR-32	47
FIGURA 6 – DADOS APRESENTADOS PELO TRIME TOOL A CADA ENSAIO	48
FIGURA 7 - LOCALIZAÇÃO DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO E SUA CAPITAL VITÓRIA NO MAPA	49
FIGURA 8 – MUNICÍPIOS INTEGRANTES DA REGIÃO METROPOLITANA DA GRANDE VITÓRIA (RMGV)	49
FIGURA 9 - LOCALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE CAMPO COM O TDR EM MANGUINHOS, SERRA, ES	50
FIGURA 10 - DISTRIBUIÇÃO DE DEPÓSITOS TERCIÁRIOS DA FORMAÇÃO BARREIRAS AO LONGO DO LITORAL CAPIXABA.	51
FIGURA 11 - TRIME PICO 32 NA AMOSTRA DE MICROESFERAS DE VIDRO	53
FIGURA 12 - RESULTADOS DOS ENSAIOS PRELIMINARES COM DIFERENTES PROFUNDIDADES DE CRAVAÇÃO DA SONDA TDR	56
FIGURA 13 - ANEL VOLUMÉTRICO COM A AMOSTRA DE SOLO AMARELO	57
FIGURA 14 – LOCAL DE MEDIÇÃO DO SOLO VERMELHO UTILIZANDO TRADO MANUAL PARA CRAVAÇÃO DA SONDA NO SOLO	58
FIGURA 15 - TDR TRIME-PICO 64 DA IMKO NA VERTICAL E TRIME-PICO 32 NA HORIZONTAL	58
FIGURA 16 – MICROESFERAS DE VIDRO NO CILINDRO DE ACRÍLICO	60
FIGURA 17 - TUBO DE PVC UTILIZADO NOS ENSAIOS EM LABORATÓRIO	61
FIGURA 18 - SOQUETE DE MADEIRA FABRICADO PARA A COMPACTAÇÃO DA AMOSTRA	62
FIGURA 19 - AMOSTRA DAS MICROESFERAS NO MOMENTO DA COMPACTAÇÃO DA AMOSTRA	63
FIGURA 20 - TDR PICO 32 DURANTE A MEDIDA DA UMIDADE VOLUMÉTRICA	63

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - COMPARAÇÃO ENTRE OS GRÁFICOS DE UMIDADE VOLUMÉTRICA VERSUS CONSTANTE DIELÉTRICA PARA AS DUAS ETAPAS DE ENSAIOS COM AS MICROESFERAS DE VIDRO:	69
GRÁFICO 2 - COMPARAÇÃO ENTRE OS GRÁFICOS DE UMIDADE VOLUMÉTRICA VERSUS CONSTANTE DIELÉTRICA PARA AS DUAS ETAPAS DE ENSAIOS COM AS MICROESFERAS DE VIDRO, RETIRANDO-SE OS PONTOS DE INCERTEZA:	70
GRÁFICO 3 – COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA DE ENSAIOS PARA OS SOLOS VERMELHO E AMARELO	71
GRÁFICO 4 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DAS DUAS ETAPAS DE ENSAIOS PARA OS SOLOS VERMELHO E AMARELO	72
GRÁFICO 5 - COMPARAÇÃO ENTRE AS EQUAÇÕES EMPÍRICAS DE TOPP <i>ET AL.</i> (1980), LEDIEU (1986), JACOBSEN E SCHJONNING (1993), TOMMASELLI E BACCHI (2001) E MEDEIROS <i>ET AL.</i> (2007) (1)	75
GRÁFICO 6 - COMPARAÇÃO ENTRE AS EQUAÇÕES EMPÍRICAS DE TOPP ET AL. (1980), LEDIEU (1986), JACOBSEN E SCHJONNING (1993), TOMMASELLI E BACCHI (2001) E MEDEIROS <i>ET AL.</i> (2007) COM OS PONTOS OBTIDOS COM OS ENSAIOS REALIZADOS PELO AUTOR	76
GRÁFICO 7 - RESULTADOS OBTIDOS PARA TODOS OS MATERIAIS ENSAIADOS EM COMPARAÇÃO COM O GRÁFICO DA "EQUAÇÃO UNIVERSAL"	77
GRÁFICO 8 - RESULTADOS OBTIDOS PARA TODOS OS MATERIAIS ENSAIADOS EM COMPARAÇÃO COM A EQUAÇÃO DE LEDIEU (1986)	80
GRÁFICO 9 - RESULTADOS OBTIDOS PARA OS SOLOS ENSAIADOS EM COMPARAÇÃO COM A EQUAÇÃO DE MEDEIROS <i>ET AL.</i> (2007)	83

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÌMBOLOS

- w umidade gravimétrica
- θ umidade volumétrica
- ρ_d densidade aparente do solo (massa específica seca)
- ρ_a densidade da água
- n porosidade do solo
- S grau de saturação do solo
- Q carga elétrica
- C₀ capacitância no vácuo
- V diferença de potencial
- A área das placas do capacitor
- s distância entre as placas
- ko permissividade do vácuo
- C capacitância
- k permissividade do material dielétrico
- La comprimento aparente da haste da sonda
- Vp velocidade de propagação do pulso elétrico
- L comprimento da haste da sonda
- t tempo de percurso
- c velocidade da luz
- µ0 permeabilidade magnética do vácuo
- µr permeabilidade magnética relativa
- Kr constante dielétrica relativa
- kr permissividade relativa complexa
- kr' parte real da permissividade
- k_{relax} relaxamento molecular
- CE condutividade elétrica
- f frequência
- K constante dielétrica relativa aparente
- T temperatura
- ka permissividade relativa da parte líquida do solo
- ks permissividade relativa da parte sólida do solo

- kg permissividade relativa da parte gasosa do solo
- k_c permissividade relativa dos componentes do solo
- al relativo à água livre no solo
- aa relativo à água adsorvida no solo
- g relativo à parte gasosa do solo
- M número de camadas de água adsorvida
- δ espessura da camada monomolecular d'água
- Ae área específica
- θc umidade volumétrica da água confinada
- θc, max máximo teor de umidade volumétrica da água confinada
- Kc constante dielétrica aparente da água confinada

SUMÁRIO

1 INT	RODUÇÃO	12
1.1 C	BJETIVO	.13
2 RE	VISÃO DE LITERATURA	.15
2.1 D	ETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE VOLUMÉTRICA DO SOLO	15
2.1.1	Massa específica do solo	.16
2.1.2	Metódo da Secagem em Estufa	.16
2.1.3	Determinação da umidade volumétrica em campo	.17
2.2 T	DR PARA MEDIDA DE UMIDADE VOLUMÉTRICA DO SOLO	20
2.2.1	Tipos de sondas TDR	.22
2.2.2	Fundamentos teóricos da técnica TDR	25
2.2.3	Fatores que influenciam no valor da constante dielétrica	28
2.3 C	ALIBRAÇÃO DA SONDA TDR	30
2.3.1	Modelos Empíricos	31
2.3.1.1	Equação de Topp <i>et al</i> . (1980)	32
2.3.1.2	Relação linear de Ledieu <i>et al.</i> (1986)	33
2.3.1.3	Proposta de Jacobsen e Schjonning (1993)	35
2.3.1.4	Equação de Tommaselli e Bacchi (2001)	35
2.3.1.5	Equações de Medeiros <i>et al.</i> (2007)	36
2.3.1.6	Modelo de Gonçalves <i>et al.</i> (2011)	37
2.3.2	Modelos Dielétricos Mistos	38
2.3.2.1	Modelo Complexo do Índice de Refração	40
2.3.2.2	Estudo de Dobson <i>et al.</i> (1985)	41
2.3.2.3	Fórmula geral De Loor (1968)	42
2.3.2.4	Ponizovsky <i>et al.</i> (1999)	43
3 MA	TERIAIS E MÉTODOS	46
3.1 E	QUIPAMENTO TDR	46
3.1.1	Programa Trime Tool	46
3.2 N	IATERIAIS	48
3.2.1	Região do estudo dos solos ensaiados	48
3.2.2	Características dos solos ensaiados	51
3.2.3	Microesferas de vidro	53

3.3 MÉTODO DO TRABALHO	54			
3.3.1 Variáveis da pesquisa	54			
3.3.2 Primeira Etapa de Ensaios	55			
3.3.2.1 Ensaios Preliminares	55			
3.3.2.2 Ensaios de campo	56			
3.3.2.3 Ensaios em laboratório	59			
3.3.3 Segunda etapa - Ensaios laboratoriais com controle da densidade	60			
3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA	64			
4 RESULTADOS	66			
4.1 RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA DE ENSAIOS	66			
4.1.1 Ensaios de campo	66			
4.1.2 Ensaios de laboratório – Microesferas de vidro	67			
4.2 SEGUNDA ETAPA DE ENSAIOS	67			
4.2.1 Microesferas de vidro	68			
4.2.2 Resultados para os Solos ensaiados	70			
5 DISCUSSÃO	74			
5.1.1 Comparações entre os resultados experimentais e as calibrações avaliadas neste estudo	76			
5.1.2 Resultados experimentais e Topp et al. (1980)	77			
5.1.3 Método de Ledieu <i>et al.</i> (1986)				
5.1.4 Tommaselli e Bacchi (2001)	81			
5.1.5 Gonçalves et al. (2011)	81			
5.1.6 Medeiros <i>et al.</i> 2007	82			
6 CONCLUSÕES E SUGESTÔES PARA PESQUISAS FUTURAS	86			
REFERÊNCIAS				
APÊNDICE 1 - EQUAÇÕES DE CALIBRAÇÃO PARA OS MATERIAIS DES ESTUDO	STE 98			

1 INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

É reconhecida a importância do monitoramento de campo para os engenheiros geotécnicos verificarem hipóteses adotadas em projetos. A determinação do teor de água dos vazios do solo é indispensável para sua caracterização, na realização do controle de compactação e também para obtenção de outros parâmetros utilizados nos projetos geotécnicos.

As propriedades dielétricas dos solos podem ser utilizadas para determinar a sua umidade volumétrica. O uso das sondas que utilizam a técnica da reflectometria no domínio do tempo, conhecida como TDR, como medida indireta de umidade volumétrica de solos, tem despertado interesse na área geotécnica pela possibilidade de determinação da umidade volumétrica do solo através do uso de uma técnica não destrutiva com resposta direta e rápida.

A técnica de TDR consiste na emissão de um pulso eletromagnético, cuja velocidade de propagação no meio poroso é função de uma constante denominada constante dielétrica ou permissividade relativa.

O valor da constante dielétrica do solo depende dos teores dos componentes do material poroso (ou seja, minerais, água e ar) e, nas frequências entre 1 MHz e 1 GHz, é muito dependente da umidade volumétrica do solo (TOPP *et al.*, 1980). Quanto maior o teor de umidade volumétrica do solo, maior será a constante dielétrica do mesmo e menor será a velocidade de propagação da radiação eletromagnética nele.

Como a constante dielétrica é correlacionada com o teor de água do solo, torna-se possível estabelecer uma função de relação entre ambas, de forma que se possa, a partir de uma, determinar-se a outra através de calibrações.

Como existe uma grande diferença entre os valores da constante dielétrica da água (aproximadamente 80) e dos outros constituintes do solo (no caso dos minerais, varia geralmente de 4 a 10 e do ar é aproximadamente 1 (ROBINSON *et al.*, 2003); pode-se esperar que a constante dielétrica não varie de acordo com a composição mineralógica do solo. No entanto tem-se observado variações na calibração de acordo com a natureza e o estado do solo, principalmente solos argilosos ou com

INTRODUÇÃO 13

alto teor de finos, solos orgânicos e com presença de óxidos de ferro livre (SOUZA *et al.*, 2001).

Topp *et al.* (1980) propuseram uma relação empírica entre umidade volumétrica do solo e constante dielétrica, com aplicação para vários tipos e texturas de solos, motivo pelo qual esta relação ficou conhecida como "Equação Universal" de calibração do TDR (SOUZA *et al.,* 2001). É importante mencionar que os solos estudados por Topp *et al.* (1980) não consideram o elevado grau de intemperismo observado em regiões de clima tropical (SANTOS *et al.,* 2012).

Marinho (2005), ao avaliar um solo residual de gnaisse, menciona que o uso do TDR para estimar a umidade volumétrica de solos também é influenciado pela sua densidade e requer assim, uma calibração que depende do tipo do solo e, em alguns casos, do estado do mesmo.

1.1 OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa é, através de resultados experimentais que incluem ensaios de campo e laboratório, verificar a validade e restrições do uso da calibração do TDR, conhecida como "Equação Universal" proposta por Topp et al. (1980), para diferentes tipos de solos em um intervalo de umidade volumétrica de 0 a 32%.

Procura-se, através de várias equações de calibração publicadas na literatura, analisar as variações dos resultados para os solos estudados. E, se possível, definir calibrações específicas para as condições apresentadas neste trabalho.

Este trabalho objetiva avaliar:

- 1. A validade e restrições da calibração padrão de Topp et al. (1980);
- 2. Variações nos valores de K para diferentes tipos de solo;
- 3. Calibrações previamente publicadas na literatura para diferentes solos;
- 4. A influência da densidades nos valores de K.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2 REVISÃO DE LITERATURA

A importância da determinação do teor de água nos vazios do solo é reconhecida na geotecnia. O teor de água nos vazios do solo varia de zero (solo seco) ao valor correspondente à saturação, ou seja, os vazios do solo estão todos preenchidos por água. Ele pode ser expresso em termos de umidade gravimétrica, volumétrica ou grau de saturação.

Para a obtenção da umidade do solo é necessário determinar a quantidade em termos de volume (umidade volumétrica) ou massa (umidade gravimétrica) de água presente nos vazios do solo. Para isso, existem diversos métodos diretos e indiretos, alguns deles mais complexos, como a sonda de nêutrons, necessitam de mais características do solo para sua determinação, nesse caso, a densidade do solo (ZAZUETA; XIN, 1994).

Neste capítulo é realizada uma revisão bibliográfica sobre o uso do TDR como instrumento para estimativa de umidade volumétrica e suas aplicações. Também são avaliadas as restrições no uso da técnica.

2.1 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE VOLUMÉTRICA DO SOLO

A umidade gravimétrica (w) é dada pela razão entre a massa de água no solo e a massa de sólidos no mesmo; já a umidade volumétrica (θ) é a razão entre o volume de água em uma amostra do solo e o volume total, assim, pode-se correlacionar a umidade gravimétrica e a volumétrica por meio da massa específica seca da amostra (Equação 1):

$$\theta = w \times \left(\frac{\rho_d}{\rho_a}\right) \tag{1}$$

onde ρ_d é a massa específica seca do solo e ρ_a é a massa específica da água.

A umidade volumétrica também pode ser expressa pela Equação 2:

$$\theta = n \times S \tag{2}$$

onde n é igual a porosidade do solo e S o grau de saturação do solo.

Como a constante dielétrica do material é função da fração do volume de água na mistura, a utilização da umidade volumétrica é preferida para estudos utilizando técnicas eletromagnéticas. Hallikainen *et al.* (1985) demonstraram essa afirmação com regressões lineares, provando que o ajuste entre a constante dielétrica do solo e a umidade volumétrica é superior ao se utilizar a umidade gravimétrica.

2.1.1 Massa específica do solo

A massa específica aparente seca, também conhecida como densidade do solo, é um parâmetro de caracterização física da estrutura do solo, e afeta diretamente a infiltração e retenção de água no mesmo. Ela é dada pela razão entre a massa de uma amostra de solo seco pelo volume total, no caso, a soma dos volumes ocupados pelas partículas e pelos poros, chamado de volume aparente.

Segundo Hugh (1999), muitas técnicas de campo para obtenção da umidade volumétrica são calibradas de acordo com a massa específica do solo. Portanto, a precisão dessa medida é de suma importância para os resultados.

Os métodos mais simples e conhecidos para a obtenção da densidade do solo são descritos nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas. Podemos citar a NBR 9813 (1987), que apresenta o método para determinação da massa específica aparente in situ com emprego de cilindro de cravação. A NBR 10838 (1988), conhecida como método da Balança Hidrostática, e também o método do frasco de areia, especifícado na NBR 7185 (1986).

2.1.2 Metódo da Secagem em Estufa

Existem diversos métodos para a determinação da umidade gravimétrica do solo em campo, cada qual com suas vantagens e desvantagens. A maioria dos métodos conhecidos é normalizada e suas descrições podem ser obtidas através das normas correspondentes.

O método da estufa para obtenção da umidade gravimétrica do solo é considerado o método padrão, portanto o mais confiável e utilizado. A técnica é especificada na Norma Brasileira NBR 6457 (1986) e apresenta resultados precisos a um custo relativamente baixo, porém o acondicionamento e transporte das amostras podem reduzir a precisão dos resultados e, ainda, amostragens repetidas em uma pequena área podem causar interferência no local em estudo.

De acordo com Assis (2008) as principais vantagens do método da estufa são:

- resultados precisos;
- pode ser utilizado para calibrar outros métodos devido à sua precisão;
- simplicidade do processo;
- o custo do equipamento é baixo quando comparado aos outros métodos.

Por outro lado, os mesmos pesquisadores citam as principais desvantagens do método:

- a necessidade da escavação de um poço para a retirada de amostras;
- a repetibilidade do processo é dificultada devido à impossibilidade de se retirar amostras do mesmo local de onde foram retiradas as originais;
- processo de escavar, coletar e secar as amostras demanda muito tempo;
- possibilidade de perda de umidade na manipulação das amostras;
- não é apropriado para turfas e solos orgânicos, pois pode ocorrer perda de massa;
- não é automatizado, impossibilitando, por exemplo, a monitoração da umidade durante um intervalo de tempo.

2.1.3 Determinação da umidade volumétrica em campo

Para a estimativa da umidade volumétrica, pode-se citar a sonda de nêutrons, a tomografia computadorizada de raios gama, o densímetro nuclear e o TDR.

A sonda de nêutrons é uma sonda que contém uma fonte de radiação que emite nêutrons rápidos para o solo. As colisões com os átomos do solo, mais especificamente com os de hidrogênio, fazem com que esses nêutrons se espalhem, diminuam a velocidade e percam energia. Através de um detector de nêutrons, localizado na extremidade da sonda, é medida a quantidade de nêutrons que perdeu velocidade, sendo esse valor diretamente relacionado à quantidade de água no solo, pois em sua grande maioria, a fonte de hidrogênio é proveniente das moléculas de água presentes (ASSIS, 2008).

A sonda basicamente é composta por uma fonte de *nêutrons rápidos*, um detector de *nêutrons lentos*, um contador de pulsos, um cabo para conectar a sonda e o contador de pulsos e uma embalagem para transporte. A Figura 1 apresenta o esquema de uma sonda de nêutrons inserida no solo.



FIGURA 1 - ESQUEMA DE UMA SONDA DE NÊUTRONS NO SOLO

Fonte: BELL (1987) adaptado por ASSIS (2008)

Para a inserção da sonda no solo, é feito um pré-furo com um trado especial e utilizado um tubo de acesso, geralmente de aço ou alumínio com 44,5 mm de

diâmetro. Deve-se atentar para não haver vazios entre a parede do tubo e o solo, pois eles podem levar a falsos resultados (BELL, 1987; ASSIS, 2008).

A sonda de nêutrons pode fornecer o perfil do solo, processo que pode ser automatizado para controle de certa área. Tem também como vantagens a natureza não destrutiva da técnica, a possibilidade de medição com a água em qualquer estado físico e a rapidez para a obtenção dos resultados (ZAZUETA; XIN, 1994).

Porém, há algumas desvantagens que devem ser listadas. A técnica necessita de calibração para os tipos de solos especificamente analisados, sendo que a porosidade e o peso específico do solo influenciam fortemente nos resultados (ROTH *et al.*, 1990).

Próximo à superfície do terreno, as medidas fornecidas pela sonda são menos precisas pois os nêutrons tendem a serem perdidos na atmosfera (BELL, 1987).

Outras importantes desvantagens para o método da sonda de nêutrons são o fato de ser necessário um treinamento especial para os operadores, incluindo o conhecimento de normas e leis que regulamentam e fiscalizam o uso do equipamento e o alto custo do mesmo (ZAZUETA; XIN, 1994; ASSIS, 2008).

Um outro exemplo de método não destrutivo para a obtenção da umidade volumétrica do solo é o uso da tomografia computadorizada de raio x ou gama. Através do método de reconstrução de imagens, é realizado o cruzamento de vários feixes de radiação que interagem com a amostra, e por meio de manipulações matemáticas, relacionam uma unidade arbitrária, conhecida como unidade tomográfica, a cada uma das posições do objeto (PIRES, 2006).

O método permite a determinação rápida e simultânea da densidade do solo e sua umidade volumétrica, sendo a umidade volumétrica dada pela variação da densidade estimada (ZAZUETA; XIN, 1994).

Tanto o método da sonda de nêutrons, quanto o da tomografia computadorizada com emissão de raios gama exigem forte proteção para os operadores durante o procedimento, pelo fato de emitir radiação (ROTH *et al.*, 1990).

Outras desvantagens deste método são o alto custo, a dificuldade no manuseio, a forte influência da densidade nas medições e a possiblidade de erros no uso em solos muito estratificados (ZAZUETA; XIN, 1994).

Pode-se citar, ainda, para a obtenção da umidade volumétrica em campo, o método do densímetro nuclear. Ele é baseado na propriedade da água de moderar a

velocidade das emissões de nêutrons. Um emissor de nêutrons rápidos é colocado em uma sonda e é usado um contador de nêutrons lentos, registrando valores proporcionais à umidade volumétrica no espaço entre eles. O instrumento é aferido para a água pura e para a areia seca, a variação da umidade volumétrica é lida em gráficos. Geralmente o aparelho é utilizado para avaliar a densidade aparente do solo, no entanto, o método não é muito utilizado no Brasil devido ao elevado custo do equipamento. Suas vantagens e desvantagens são as mesmas da sonda de nêutrons (ZAZUETA; XIN, 1994).

2.2 TDR PARA MEDIDA DE UMIDADE VOLUMÉTRICA DO SOLO

Devido a todos fatores negativos listados para os métodos de obtenção da umidade volumétrica do solo em campo, outras técnicas vêm sendo desenvolvidas e pesquisadas, como o método de reflectometria no domínio do tempo, ou TDR.

O uso da reflectometria no domínio do tempo permite eliminar algumas das limitações que outros métodos possuem na obtenção do teor de umidade volumétrica, permitindo, por exemplo, o monitoramento do solo em seus diversos estágios, ao longo do tempo, com a variação da profundidade, diretamente no campo (TOPP *et al.*, 1980).

No entanto, a maioria dos sistemas TDR tem sido desenvolvida para fins agrícolas, com sondas adequadas para medição do teor de umidade volumétrica apenas em camadas superficiais do solo. Caso essas sondas sejam utilizadas para determinar os teores de umidade ao longo da profundidade de um solo não saturado, é então necessário abrir poços para a instalação nas cotas desejadas (CALDERÓN, 2010).

A determinação do teor de umidade volumétrica através da técnica TDR foi pioneiramente introduzida por Davis e Chudobiak em 1975 e implementado e validado por Topp *et al.* em 1980 (ASSIS, 2008).

No Brasil, alguns dos primeiros estudos utilizando a técnica TDR, especificamente para a medida do teor de umidade volumétrica do solo, foram as pesquisas de Herrmann Jr. em 1993 e de Tommaselli e Bacchi em 1995. Posteriormente, Conciani

et al. (1996) utilizaram a técnica para medir a umidade volumétrica e estimar a sucção do solo durante provas de carga de fundações (CALDERÓN, 2010).

As principais vantagens do uso do TDR são (CALDERÓN, 2010):

- Permitir leituras contínuas em tempo real;
- Ser de natureza não destrutiva;
- Possuir grande exatidão de resultados, entre 1 e 2% de teor de umidade;
- Facilidade para calibração, ressaltando que em alguns solos a calibração não é necessária;
- Não oferecer riscos radioativos, 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.

Entre as vantagens descritas, pode-se destacar 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 rádio e/ou telefone) aplicados para esta técnica. Calderon (2010) cita que esse sistema permitiu, por exemplo, monitorar a umidade volumétrica de um campo agrícola situado à distância de aproximadamente 150 km da base onde os dados foram analisados. Atualmente já existem aparelhos que transmitem as informações via Bluetooth, facilitando ainda mais o uso da técnica.

Como desvantagens no uso do TDR, pode-se citar a dependência de atributos físicos e químicos do solo, necessidade de calibração e custo elevado (SANTOS *et al.*, 2012).

2.2.1 Tipos de sondas TDR

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) apud Calderón (2010), o espaçamento é a variável de maior influência. Knight (1992) apud Calderón (2010) 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. Porém, quanto maior D, mais pertubação haverá no solo no momento da cravação.

Knight (1992) *apud* Evett (2003) afirma que o espaçamento entre as hastes pode variar, contanto que D/e seja menor ou igual a 0,1. Quanto mais baixo esse valor, menor o volume medido pelo TDR. Nesse caso, as medidas podem se tornar muito sensíveis à heterogeneidade do solo próximo às hastes, porque o volume medido pela sonda se estende somente de 1 a 2 cm acima e abaixo do plano da mesma.

Topp *et al.* (1980), 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 umidecimento do solo, não dificulte sua inserção no terreno.

Evett (2003), por sua vez, fornece valores para o comprimento das hastes de 0,05 a 1,5 metros. Na Figura 2 são apresentados os esquemas da distribuição dos campos magnéticos para diferentes modelos de sondas TDR.



FIGURA 2 - MODELOS DE CONFIGURAÇÕES DE SONDAS TDR

Fonte: 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 3 mostra os modelos de sondas TDR anteriormente mencionados: a sonda coaxial, a sonda de duas hastes, a sonda composta por três hastes e de quatro hastes.

FIGURA 3 - ALGUMAS SONDAS TDR COMUMENTE UTILIZADAS: (A) SONDA COAXIAL, (B) SONDA DE DUAS HASTES, (C) SONDA COMPOSTA POR TRÊS HASTES, (D) SONDA DE QUATRO HASTES





Fonte: HUGH (1999)

Além dos exemplos citados, também foi desenvolvida a sonda multi-haste segmentada, que consiste em um sensor com hastes metálicas com trechos de distintos valores de impedância, permitindo a estimativa da umidade volumétrica em diferentes profundidades no perfil do solo, utilizando uma única sonda. Esses trechos são então obtidos pela variação dos diâmetros das hastes (CALDERÓN, 2010).

Selker et al. (1993), apud Calderón (2010), introduziram 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.

2.2.2 Fundamentos teóricos da técnica TDR

As propriedades elétricas do solo são controladas principalmente pelo magnetismo, condutividade elétrica e permissividade dielétrica. (SAARENKETO, 1998). A técnica para uso do TDR é utilizada em muitos estudos para se determinar a condutividade elétrica e monitoramento de solutos no solo (TOPP et al., 1988; NADLER et al., 1999; SANTOS et al., 2009).

Trata-se de um dispositivo que propaga ondas eletromagnéticas para o solo através de um cabo coaxial e uma sonda especial. Quando a onda encontra uma diferença de impedância, ou seja, no instante que a onda atinge a sonda, parte da onda é refletida de volta ao equipamento, registrando um pico inicial. Um segundo pico é registrado quando a porção restante da onda atinge o final da sonda. Desta forma são estimadas a constante dielétrica aparente e a condutividade elétrica volumétrica do solo, baseando-se no tempo de propagação da onda (ASSIS, 2008).

A configuração das hastes na sonda pode ser comparada à construção de um capacitor, em que o material dielétrico entre as placas é o solo. Um capacitor ideal no vácuo armazena cargas elétricas nas placas quando submetido a uma diferença de potencial (Equação 3) (PEREIRA, 2001).

 $Q = C_0 \times V$ (3) Onde Q é a carga elétrica (C), C₀ é a capacitância no vácuo (F) e V a diferença de potencial (V).

A capacitância no vácuo de um capacitor ideal, construído com placas planas e paralelas, com uma separação específica entre elas, é calculada pela Equação 4 (PEREIRA 2001):

$$C_0 = \frac{A}{s} \times k_0 \tag{4}$$

sendo A a área das placas (m²), s, a distância entre elas (m) e k₀, a permissividade do vácuo.

Sabendo que a maioria dos capacitores contém um material isolante elétrico entre as placas, ao invés de vácuo, com o intuito de aumentar a capacitância do capacitor, a Equação 4 passa a apresentar a seguinte forma (PEREIRA 2001):

$$C = \frac{A}{s} \times k \tag{5}$$

onde C é a capacitância (F) e k, a permissividade do material dielétrico (F/m).

Assim, a relação entre a capacitância C_0 de um capacitor ideal e a capacitância C de um capacitor dielétrico entre duas placas é dada pela Equação 6 (PEREIRA 2001):

$$C = C_0 \times \left(\frac{k}{k_0}\right) \tag{6}$$

sendo k_0 a permissividade do vácuo e k, a permissividade do material dielétrico (F/m).

Na Figura 4 apresenta-se o esquema do funcionamento de uma sonda TDR em uma amostra. Um sinal eletromagnético, com uma velocidade de propagação conhecida, é emitido por um testador de cabos, que segue pelo cabo coaxial ligado à sonda. O sinal é refletido de volta ao final da sonda. O resultado pode ser observado no gráfico à esquerda da figura, sendo La o comprimento aparente da haste da sonda. obtido pela diferença entre as reflexões geradas no começo e no final da sonda (CALDERÓN, 2010).



FIGURA 4 - ESQUEMA DE INTERPRETAÇÃO DA TÉCNICA TDR

Fonte: CALDERÓN (2010)

A leitura do gráfico gerado traz duas grandes desvantagens para o método: componentes eletrônicos de alta frequência dispendiosos e possíveis erros na leitura, principalmente para solos com baixos valores de umidade volumétrica ou sondas curtas. Com o intuito de sanar essas dificuldades, foram desenvolvidos aparelhos mais modernos utilizando o método TRIME: Time Domain Reflectometry with Intelligent Micromodule Elements ou Reflectometria no Domínio do Tempo com Elementos de Micromódulos Inteligentes. O tempo de percurso é determinado por diferentes níveis de voltagens, o que permitiu a criação de um sensor menor e com pouco consumo de energia (JEROME, 2009).

O tempo de percurso da onda 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 através da Equação 7:

$$V_p = \frac{2L}{t} \tag{7}$$

onde Vp é a velocidade de propagação do pulso, L o comprimento da haste e t o tempo de percurso (ASSIS, 2008).

A velocidade de propagação de uma onda eletromagnética plana que depende das propriedades eletromagnéticas do material em que se propaga é dada pela Equação 8 (ROBINSON et al., 2003).

$$V_{p} = \frac{1}{\sqrt{\mu_{0} \mu_{r} \cdot k_{0} \cdot K_{r}}} = \frac{c}{\sqrt{\mu_{r} \cdot K_{r}}}$$
(8)

onde, K_r a permissividade elétrica relativa do meio k₀, a permissividade do vácuo, c é a velocidade da luz (3 x 108 ms⁻¹), μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo (1,257 x 10-6 Hm⁻¹) e μ_r , a permeabilidade magnética relativa, cujo valor é unitário para a maioria dos materiais terrestres, com exceção de alguns óxidos de ferro (ROBINSON et al., 1994).

Assim é obtida a Equação 9:

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{K_r}} \tag{9}$$

Combinando as Equações (7) e (9) é encontrada a Equação 10 para a permissividade elétrica relativa:

$$K_r = \left(\frac{c}{v_p}\right)^2 = \left(\frac{c_t}{2L}\right)^2 \tag{10}$$

O solo não saturado é composto por ar, água e sólidos e as propriedades eletromagnéticas dos três componentes fornecem a constante dielétrica do solo. A constante dielétrica relativa (K_r), termo mais comumente utilizado na literatura, é dada pela razão entre a permissividade do material (k) e a permissividade do vácuo (k₀) (Equação 11) e é sempre maior que a unidade, para qualquer material dielétrico (PEREIRA, 2001).

$$K_r = \frac{k}{k_0} \tag{11}$$

No estudo do eletromagnetismo, o solo é considerado um meio com perdas e com propriedades dispersivas; a constante dielétrica do solo refere-se à capacidade das partículas de se alinhar com um campo magnético induzido, sendo uma grandeza física que descreve como um campo elétrico afeta e é afetado pelo meio dielétrico (HUGH, 1999; HEMMATI et al, 2008).

A origem da permissividade é a assimetria da carga na molécula de água, que forma um dipolo constante. Quando sob influência de um campo elétrico, as moléculas se alinham com o campo, retendo energia elétrica, sendo esta liberada quando a aplicação do campo elétrico é cessada (ROBINSON *et al.*, 2003).

2.2.3 Fatores que influenciam no valor da constante dielétrica

A constante dielétrica ou permissividade elétrica (Kr) é um número complexo. A parte real descreve a energia concentrada no material dielétrico e a

parte imaginária as perdas dielétricas (BITTELLI, 2007). Essas perdas podem ser devido à condutividade iônica ou porque as moléculas não conseguiram manter a velocidade do campo alternado (HEMMATI et al., 2008).

A Equação 12 apresenta a fórmula para a permissividade relativa complexa:

$$k_{\rm r} = k'_{\rm r} - j \left(k_{\rm relax} + \frac{CE}{2\pi f k_0} \right)$$
(12)

em que k'_r é a parte real da permissividade relativa, j é o numeral imaginário $\sqrt{-1}$, k_{relax} diz respeito ao relaxamento molecular, CE é a condutividade elétrica, *f* é a frequência e k_0 é a permissividade do vácuo (ROBINSON et al., 2003).

A parte imaginária da constante dielétrica está relacionada com a condutividade elétrica do solo, podendo ser utilizada no estudo de sua salinidade (ASSIS, 2008). Geralmente, no uso do TDR para a determinação do teor de umidade volumétrica do solo, é considerada apenas a parte real da constante dielétrica; as perdas elétricas da parte imaginária não influenciam consideravelmente em seus valores para baixas frequências (1 MHz a 1 GHz). No entanto, há pesquisas que indicam que, para solos com superfície condutora (argilosos) ou com alta concentração de eletrólitos (solos salinos), a parte imaginária da permissividade elétrica torna-se importante. Ao negligenciá-la, geralmente os valores da umidade volumétrica acabam sendo superestimados (ROTH et al., 1990; BITTELLI, 2007).

Para evitar essas variações nas medidas da constante dielétrica, o aparelho TRIME®TDR trabalha na faixa de frequência de 600 MHz a 1,2 GHz, o que previne que os valores obtidos sejam afetados pela polarização da molécula de água. Neste intervalo, as variáveis de pertubação, como a temperatura e a condutividade elétrica, são mínimas e as medidas não são influenciadas pela salinidade dos solos (JEROME, 2009).

Topp et al. (1980) utilizam o termo constante dielétrica aparente (K) para indicar somente a parte real da constante dielétrica e a pesquisa em questão estuda a variação de K em relação à umidade, não levando em consideração a parte imaginária.

Lin et al. (2012) afirmam que a constante dielétrica é dependente do volume de água no solo e é pouco influenciada por outros fatores tais como salinidade da água presente, densidade dos grãos e tipo de solo. Entretanto, várias pesquisas citam a dificuldade de se encontrar uma equação padrão que relaciona K e umidade volumétrica, devido, em grande parte, à composição atípica de alguns solos, como por exemplo, orgânicos ou com minerais ferrosos (MOJID; CHO, 2004; PUMPANEN; ILVESNIEMI, 2005; PEREIRA et al., 2006; CECÍLIO; SANTOS, 2009; CATALDO et al., 2010).

Várias pesquisas citam outras variáveis a serem consideradas no estudo da constante dielétrica do solo: Robinson et al. (1994) concluiram que a presença de óxido de ferro e minerais de óxido de titânio influencia nos valores da constante dielétrica obtidos pela técnica TDR. Trintinalha et al. (2004) concluiram que o TDR está sujeito, além da densidade do solo, às características do contato solo-sonda, ou seja, à porosidade do solo.

Tommaselli e Bacchi (2001) citam que, além do teor de óxido de ferro, influenciam no valor de K o tamanho das partículas do solo, o teor de matéria orgânica e a superfície específica das partículas, pois quanto menores os grãos, existe uma maior quantidade de água adsorvida, que possui o valor de 3,2 para a constante dielétrica aparente, número consideravelmente menor que o da água livre, que é dado por 78,3 a 25°C (PONIZOVSKY et al., 1999).

2.3 CALIBRAÇÃO DA SONDA TDR

Para a estimativa do teor de umidade volumétrica através do TDR, são utilizadas calibrações que correlacionam a constante dielétrica aparente e o teor de umidade volumétrica.

No Brasil ainda não existe normalização oficial para o uso do TDR. A norma americana ASTM D6780, com sua última revisão em 2012, contém dois tipos de procedimento que podem ser selecionados pelo usuário. No primeiro procedimento, também conhecido como método dos dois passos, é utilizada somente a constante dielétrica aparente do solo em uma fórmula que relaciona a quantidade de água no solo, a constante dielétrica e a densidade do solo. É necessário, para o procedimento, fazer um molde do solo com medidas específicas para, além de medir

novamente a constante dielétrica nesse molde, também encontrar a sua densidade. Esses dados são todos relacionados por fórmulas para encontrar a umidade volumétrica do solo.

Já no segundo procedimento, nomeado como método de um passo, são feitas várias medidas em campo para a constante dielétrica aparente. Assim, através de um ensaio de compactação, são encontradas as constantes de calibração necessárias para a solução da equação (SIDDIQUI; DRNEVIVICH,1995). Nota-se que ambos os métodos necessitam de constantes de acordo com as características do solo. Com o intuito de dirimir a quantidade de variáveis para o cálculo da umidade volumétrica do solo em função da constante dielétrica do meio, vários modelos diretos de calibração são sugeridos na literatura, sendo um inclusive, dado como 'universal', ou seja, pode ser utilizado para todos os tipos de solos.

2.3.1 Modelos Empíricos

Como visto, para a estimativa do teor de umidade volumétrica dos solos através de medições da constante dielétrica utilizando a técnica TDR, é necessário realizar calibrações das sondas utilizadas. Para calibrar as sondas TDR, duas abordagens diferentes têm sido utilizadas: modelos empíricos e modelos mistos dielétricos.

Os modelos empíricos referem-se somente ao tipo de solo que lhes deu origem ou, eventualmente, a algum outro experimento que tenha sido realizado sob as mesmas condições. Através desses modelos, que são relações funcionais entre variáveis e não possuem necessariamente significado físico para a relação encontrada, obtémse uma 'curva de calibração' do equipamento, como é impropriamente denominada, pois não há qualquer caracterização do ponto de vista metrológico, apenas um ajuste de curva através de regressão linear ou não-linear (TOMMASELLI; BACCHI, 2001).

Métodos teóricos têm a desvantagem de necessitar de informações detalhadas sobre a geometria, composição ou propriedades físicas do solo, muitas vezes utilizando valores estimados. Desta forma, os modelos empíricos são geralmente os

escolhidos por serem de fácil utilização, precisos e poderem ser utilizados em materiais complexos sem a necessidade de estimar valores para as variáveis (REGALADO, 2004).

2.3.1.1 Equação de Topp et al. (1980)

Pressupondo que a relação entre a constante dielétrica e o conteúdo de água do solo é dependente apenas deste último, Topp *et al.* (1980) desenvolveram uma curva de calibração que, apesar de empírica, é chamada 'universal':

$$K = 3,03 + 9,3\theta + 146\theta^2 - 76,7\theta^3$$
(13)

ou

$$\theta = (-530 + 292K - 5,5K^2 + 0,043K^3) / 10^4$$
(14)

onde K é a constante dielétrica relativa aparente do solo e θ é a umidade volumétrica do solo.

As equações foram determinadas por uma análise de dados por regressão de quatro tipos de solos, com porcentagens de argila variando entre 9 e 66%. Além disso, a curva foi restringida para passar pelo ponto onde K é igual a 81.5 e 1% de umidade volumétrica, dado assumido para água pura a 20° C.

A equação de Topp *et al.* (1980) fornece bons resultados, independente da textura do solo, salinidade e temperatura (REGALADO, 2004).

As desvantagens apresentadas pela equação de Topp *et al.* (1980) incluem o fato de que não há justificativa física para a equação e que a validade da mesma não foi demonstrada para uma uma umidade acima de 32%, tampouco para uma maior quantidade de argila no solo e variação de porosidade (ROTH *et al.*, 1990).

O estudo de Topp *et al.* (1980) não incluía solos com alto grau de intemperismo, como os encontrados nas regiões de clima tropical típico do Brasil (SANTOS *et al.*, 2012), tampouco os solos de textura fina (JACOBSEN; SCHJONNING, 1993). Para solos com baixa densidade ou altas concentrações de material orgânico, uma

'calibração' específica para o solo é preferida à utilização da equação de Topp *et al.*(1980) (FERRÉ; TOPP, 2002).

Roth *et al.* (1990) também comentam que solos com alta condutividade elétrica também não têm bons resultados com a equação de Topp *et al.* (1980), pois os mesmos têm uma diferença significativa entre a constante dielétrica e seu valor complexo.

É também levantada a importância da temperatura nas medições, discordando de Topp *et al.* (1980), que encontraram resultados com pouca variação e, assim, afirmaram que a temperatura não influenciaria significativamente na constante dielétrica do solo. Okrasinski *et al.* (1978), por sua vez, declaram que temperaturas acima do congelamento têm pouco efeito no valor de K.

Roth *et al.* (1990), em sua pesquisa, concluiram que, se levada em consideração a temperatura, a relação entre a constante dielétrica aparente do solo e a umidade volumétrica se torna mais forte, porém, quanto menor a quantidade de água no solo, menor a influência da temperatura nos valores da constante dielétrica, pois a permissividade das partículas e do ar são pouco afetadas pela diferença de temperatura.

Roth *et al.* (1990) utilizaram a Equação 15 para a correção do valor da constante dielétrica da água (k_a) em função da temperatura (T) em graus Celsius (ROTH *et al.*, 1990):

$$k_a(T) = 78,54[1 - 4,579 \times 10^{-3}(T - 25) + 1,19 \times 10^{-5}(T - 25)^2 - 2,8 \times 10^{-8}(T - 25)^3]$$
 (15)

2.3.1.2 Relação linear de Ledieu et al. (1986)

Ledieu *et al.* (1986) apresenta, para um solo orgânico, uma relação linear entre o tempo de percurso da onda na sonda (t) e a umidade volumétrica do solo (θ), encontrando um desvio padrão de 1,30% e coeficiente de correlação no valor de 0,97.

$$\theta = 5,69t - 17,58$$
 (16)

sendo que a umidade volumétrica é dada em porcentagem e o tempo de percurso, em nanosegundos.

Quando se inclui a densidade na regressão, a equação toma a seguinte forma:

$$\theta$$
 = 5,688t - 3,38 ρ_d - 15,29 (17)
sendo ρ_d a densidade do solo em g/cm³.

Os pesquisadores afirmam que um erro de 0,1 g/cm³ na obtenção da densidade, causa uma variação de 0,34% na umidade, demonstrando, assim, que não existe a necessidade de grande precisão na medida da densidade, visto que a mesma tem pouca influência sobre o tempo de percurso em relação a umidade volumétrica.

O modelo da Equação 16 é uma alternativa às relações cúbicas, pois, nesse caso, a umidade volumétrica é linearmente relacionada a $K^{0,5}$, uma vez que a constante dielétrica é função de t² (YU *et al.,* 1997). Yu *et al.* (1997), pequisando a calibração de três tipos diferentes de solo, verificaram que a chamada "equação universal" se aproxima de uma reta quando a curva é plotada com a umidade volumétrica versus $K^{0,5}$, tornando o polinômio do terceiro grau desnecessário.

Assim, Ferre *et al.*, 1996 *apud* REGALADO, 2004 apresentam a equação de Topp *et al.* (1980) aproximada pelo modelo de Birchak:

$$\theta = 0,1181 \text{ K}^{0,5} - 0,1841 \tag{18}$$

Coelho *et al.* (2006) aplica a equação de Ledieu *et al.* (1986) no formato dado pela Equação 19, juntamente com outras quatro equações incluindo a "equação universal". Em seus resultados, eles encontraram os piores desempenhos para os modelos cúbicos, justificando a natureza empírica das equações, que não levam em consideração as propriedades físicas e os componentes dielétricos do solo, considerando-os como fixos.

 $\theta = 0,1138 \text{ K}^{0,5} - 0,1758 \tag{19}$

2.3.1.3 Proposta de Jacobsen e Schjonning (1993)

Jacobsen e Schjonning (1993) questionaram a equação de Topp *et al.* (1980), pois não abrangia todos os tipos de solos e densidades e solos finos. Assim, foi proposta uma nova fórmula para calibração com base na constante dielétrica:

$$\theta = (-7.01 \times 10^{-2}) + (3.47 \times 10^{-2} \text{K}) - (11.6 \times 10^{-4} \text{K}^2) + (18.0 \times 10^{-6} \text{K}^3)$$
(20)

Os pesquisadores sugerem também, outra equação que leva em consideração a densidade do solo seco, a porcentagem de argila e de matéria orgânica no solo:

$$\theta = (-3.41 \times 10^{-2}) + (3.45 \times 10^{-2} \text{K}) - (11.4 \times 10^{-4} \text{K}^2) + (17.1 \times 10^{-6} \text{K}^3) - (3.70 \times 10^{-2} . \rho_d) + (7.36 \times 10^{-4} . \text{ %argila}) + (47.7 \times 10^{-4} \% . \text{ mat. org.})$$
(21) onde ρ_d é a densidade do solo seco (g/cm⁻³).

2.3.1.4 Equação de Tommaselli e Bacchi (2001)

Muitos estudiosos se dedicaram ao monitoramento da umidade volumétrica do solo, mas poucas pesquisas lidam com a avaliação das equações de calibração para os solos brasileiros (KAISER *et al.*, 2010).

Tommaselli e Bacchi (2001) avaliaram a equação de Topp *et al.* (1980) para cinco tipos de solos da região de Piracicaba – SP: areia quartzoza, latossolo vermelho-amarelo, latossolo vermelho escuro, podzólico vermelho-amarelo e terra roxa estruturada. O melhor ajuste da equação ficou entre os valores de umidade volumétrica de 25 e 30%.

Os mesmos pesquisadores também concluiram que a equação de Topp *et al.* (1980) superestima os valores de K com o aumento da umidade volumétrica e encontraram a Equação 22 como melhor ajuste para os dados experimentais encontrados. (ROTH *et al.*, 1990; YU *et al.*, 1997)
$$\theta = 8.10^{-6} \,\text{K}^3 - 0,0007 \,\text{K}^2 + 0,0269 \,\text{K} - 0,0194 \tag{22}$$

Hashiguti *et al.* (2011) afirmam que o modelo de Topp *et al.* (1980) e a Equação 22 se mostram completamente inadequados, apontando para o risco do emprego de um método desenvolvido para outro tipo de solo argiloso, em outras condições.

Trintinalha *et al.* (2004) utilizaram um nitossolo vermelho e areia em sua pesquisa e concluiram que não existe a necessidade da curva de calibração ser um polinômio do terceiro grau. Em testes de hipótese para a estimativa dos parâmetros das equações de calibração, encontraram uma probalidade elevada de o coeficiente cúbico ser nulo, questionando a sua necessidade no modelo. Utilizando uma fórmula linear, conseguiram valores mais adequados do que através da equação de Topp *et al.* (1980), Yu *et al.* (1997) e Tommaselli *et al.* (2001).

Tommaselli *et al.* (2001) também comentam que, à medida em que a textura do solo se torna mais grosseira, o modelo cúbico deixa de ser importante.

Saarenketo (1998), por sua vez, concluiu que a relação entre K e a umidade volumétrica é mais ajustável a um modelo logarítmico do que exponencial, isso devido ao fato da estrutura molecular da água aparentar ser constante em cada camada do solo.

2.3.1.5 Equações de Medeiros et al. (2007)

Medeiros *et al.* (2007) obtiveram resultados bem distintos de Topp *et al.* (1980); a "equação universal" subestimou todos os valores medidos. Os pesquisadores optaram por fazer calibrações diferentes para dois intervalos de profundidade de um latossolo do Rio Grande do Sul, uma para profundidades de 5 a 40 metros e outra de 50 a 60 metros de profundidade, que são apresentadas pelas Equações 23 e 24 respectivamente:

$$\theta = 3.6.10^{-6} \text{ K}^3 - 4.8.10^{-4} \text{ K}^2 + 0.02698 \text{ K} + 0.0366$$
(23)

$$\theta = 4.10^{-5} \text{ K}^3 - 2.7.10^{-3} \text{ K}^2 + 0.06622 \text{ K} - 0.0054$$
(24)

2.3.1.6 Modelo de Gonçalves et al. (2011)

Gonçalves *et al.* (2011) avaliaram um Nitossolo Vermelho distroférrico e propuseram um modelo ajustado por meio de regressão polinomial múltipla com incorporação da densidade do solo.

$$\theta = [0,842538 - 0,725175\rho_d] + [-0,049601 + 0,060353 \rho_d] K + [0,001044 - 0,001061 \rho_d] K^2$$
(25)

Os pesquisadores concluíram que o efeito da densidade sobre a curva de calibração do TDR é altamente significativo, afirmando que a utilização de um modelo que despreze a densidade do solo pode levar a erros de grande magnitude na avaliação da umidade do solo em relação ao valor da disponiblidade de água nele.

Hashiguti *et al.* (2011) testaram a Equação 25 juntamente com a Equação 22 e concordam que a calibração que incorpora o valor da densidade em seus coeficientes apresenta melhor desempenho.

Os Quadros 1 e 2 reunem as características das equações empíricas listadas que serão utilizadas para comparações ao longo desta pesquisa:

REFERÊNCIAS	SOLO	INTERVALO
Topp <i>et al</i> . (1980)	6 tipos de solos e 2 tipos de microesferas de vidro	da umidade higroscópica a saturação
Ledieu et al. (1986)	Solo orgânico	$\theta = de \ 10,5 \ a \ 36,5\%$
Jacobsen e Schjonning (1993)	Variedade de solos de arenosos a argilo-arenosos	da umidade higroscópica a saturação
Tommaselli e Bacchi (2001)	5 solos da região de Piracicaba – SP	$\theta = de \ 0 \ a \ 50\%$
Medeiros et al. (2007)	Nitossolo Vermelho distroférrico	$\theta = de \ 10 \ a \ 80\%$
Gonçalves et al. (2011)	Nitossolo Vermelho distroférrico	θ = de 14 A 57%

QUADRO 1 - EQUAÇÕES EMPÍRICAS E SUAS RESTRIÇÕES

Fonte: Autor

REFERÊNCIAS	CALIBRAÇÕES
Topp <i>et al</i> . (1980)	$\theta = (-530 + 292K - 5,5K^2 + 0,043K^3) / 10^4$
Ledieu et al. (1986)	$\theta = 0,1138 K^{0,5} - 0,1758$
Jacobsen e Schjonning (1993)	$\theta = (-7.01x \ 10^{-2}) + (3.47 \ x \ 10^{-2} \ K) - (11.6 \times 10^{-4} \ K^2) + (18.0 \times 10^{-6} \ K^3)$
Tommaselli e Bacchi (2001)	$\theta = -0.0194 + 0.0269K - 0.0007K^2 + 8.10^{-6}K^3$
Medeiros et al. (2007) (1)	$\theta = 0.0366 + 0.02698K - 4.8.10^{-4} K^2 + 3.6.10 - 6K^3$
Medeiros et al. (2007) (2)	$\theta = 0,0054 + 0,06622K - 2,7.10^{-3} K^2 + 4,0.10-5K^3$
Gonçalves et al. (2011)	$\theta = [0,842538 - 0,725175\rho_{d}] + [-0,049601 + 0,060353\rho_{d}]K + [0,001044 - 0,001061\rho_{d}]K^{2}$

QUADRO 2 – EQUAÇÕES EMPÍRICAS DE CALIBRAÇÃO DO TDR PREVIAMENTE PUBLICADAS

Fonte: Autor

2.3.2 Modelos Dielétricos Mistos

Os chamados modelos dielétricos mistos têm como objetivo separar e identificar os elementos constituintes de uma sonda TDR dos componentes do terreno. Tendo em vista que a constante dielétrica é uma propriedade particular de cada material, se houver *n* materiais diferentes, então haverá *n* valores de constantes dielétricas.

Cada leitura da constante dielétrica, obtida com qualquer sonda, deve representar um único valor, que inclui as constantes dielétricas do material do corpo da sonda e as constantes dielétricas do material em que a sonda está inserida.

Como desvantagem para esse tipo de método, pode-se citar a necessidade do conhecimento do número de camadas de água adsorvida às partículas dos minerais argílicos e a constante dielétrica do solo, parâmetros que geralmente são desconhecidos e arbitrados.

O solo é um acumulado de partículas onde seus espaços vazios podem ser ocupados por ar, água ou ambos. Em um solo saturado, a água pode ser encontrada em três formas: gravitacional, capilar e adsorvida. A água gravitacional é encontrada livre no solo, e como diz a nomenclatura, é regida pela força da gravidade. A água capilar é retida pela tensão superficial em forma de películas ou capas em torno dos grãos, muito parecida com a água capilar, no que tanje a movimentação e retenção no conjunto. A água adsorvida ou higroscópica está firmemente fixada por adsorção

às partículas minerais do solo e não se movimenta por gravidade nem capilaridade, somente sob a forma de vapor d'água.

A água adsorvida se refere às moléculas de água contidas nas primeiras poucas camadas moleculares em torno das partículas do solo (HALLIKAINEN *et al.*, 1985). Ela provavelmente não está em formato de filme em volta das partículas, mas sim em uma relação mais intrínseca, onde a água é retida, pelo menos em parte, na condição de solução sólida (BUCKMAN;BRADY,1922).

Considerar a presença da água adsorvida para a calibração do TDR é importante principalmente para baixas frequências. De acordo com Dobson *et al.* (1985), para frequências abaixo de 4 GHZ, os efeitos da água adsorvida se tornam maiores.

De acordo com Laudau e Lifshitz (1960), a constante dielétrica da mistura de partículas isotrópicas pode ser calculada através da fórmula descrita na Equação 26:

$$k^{1/3} = k_1^{1/3} \cdot x_1 + k_2^{1/3} \cdot x_2 + k_3^{1/3} \cdot x_3 + \dots$$
 (26)

onde k_1 , k_2 , k_3 , etc. são as constantes do componentes do solo e x₁, x₂, x₃, etc. são as frações volumétricas dos componentes.

REGALADO (2004) afirma que grande parte dos modelos mistos dielétricos pode ser descrita pela Equação 27.

$$K^{\alpha} = \sum_{i=1}^{N} f_i k_i^{\alpha} \tag{27}$$

sendo N a quantidade de componentes do solo, que assume o valor de três, considerando ar, água e partículas sólidas, ou quatro, quando é levada em consideração também a água adsorvida, por exemplo, quando há presença de minerais argílicos no solo. f é a fração volumétrica do componente do solo, k é a permissividade do constituinte e α , o parâmetro que reflete a geometria do meio com respeito ao campo magnético aplicado. (REGALADO, 2004)

2.3.2.1 Modelo Complexo do Índice de Refração

Roth *et al.* (1990) concluiram que a constante dielétrica para solos finos é menor que em solos granulares com a mesma quantidade de água, devido à maior área superficial específica (MAROUFPOOR *et al.*, 2009). Daí a importância de se considerar a quantidade de argila no solo para a calibração.

Os pesquisadores afirmam que a equação de Topp *et al.* (1980) não tem um bom resultado para solos argilosos ou orgânicos e propuseram o uso de uma equação (Equação 28) com base na constante dielétrica de cada uma das fases do solo, bem como em sua porosidade:

$$K = (\theta, k_a^{\alpha} + (1 - n).k_s^{\alpha} + (n - \theta).k_g^{\alpha})^{1/\alpha}$$
(28)

onde n é a porosidade do solo, e k_a , k_s e k_g são, respectivamente, as constantes dielétricas da parte líquida, sólida e gasosa do solo.

O modelo ficou conhecido como modelo complexo do índice de refração e teve boa resposta para inúmeros tipos de solos (PONIZOVSKY *et al.*, 1999). A nomenclatura vem do fato do índice de refração de uma mistura de gases não magnéticos, dado pela razão entre a velocidade da luz no vácuo e da radiação no meio, ser o volume médio dos índices de seus componentes (REGALADO, 2004).

O modelo assume que os dielétricos presentes são isotrópicos ou consistem de camadas paralelas ou perpendiculares, porém Ponizovsky *et al.* (1999) questionam esses parâmetros para solos finos e consideram o volume de água adsorvida em seus cálculos.

O valor utilizado para a constante α, que é dependente da sua estrutura espacial e sua orientação no campo elétrico, foi de 0,5, encontrando, após os testes, um valor ótimo de 0,46 (ROTH *et al.*, 1990).

O valor de α varia de -1 a 1, será igual a 1 se o campo elétrico for paralelo às camadas e assumirá o valor de -1 caso o campo elétrico seja perpendicular às camadas do meio (ROTH *et al.*, 1990; YU *et al.*, 1997).

2.3.2.2 Estudo de Dobson et al. (1985)

Dobson *et al.* (1985) utilizaram modelo complexo do índice de refração e encontraram o valor de 0,65 para α. Os pesquisadores também utilizam o modelo dielétrico misto de quatro fases, que considera a água adsorvida no solo. Com o aumento da quantidade de água no solo e com a presença de minerais argílicos, ocorre a formação de um filme de água adsorvida às partículas, fazendo com que haja menos influência das forças de superfície, o que provoca a diminuição de K, que, neste caso, varia de 20 a 40 (PONIZOVSKY *et al.*, 1999).

Rearranjando a Equação 28, temos:

 $K^{\alpha} = (k_a^{\alpha} - k_g^{\alpha}) \theta + (1 - n).k_s^{\alpha} + n k_g^{\alpha}$ (29) onde K é a constante dielétrica do meio, α , o parâmetro que reflete a geometria do meio com respeito ao campo magnético aplicado, θ é a umidade volumétrica do solo, n é a porosidade e *e* k_a , k_s e k_g são, respectivamente, as constantes dielétricas da parte líquida, sólida e gasosa do solo.

Para um dado solo, a soma do segundo e do terceiro termo é constante, assim como o coeficiente do primeiro termo ($k_a^{\alpha} - k_g^{\alpha}$), uma vez que a constante dielétrica da água de um solo não é fortemente afetada pela temperatura (YU *et al.*, 1997). Assim, a Equação 29 pode ser escrita da seguinte forma:

$K^{\alpha} = C_1.\theta + C_2$	(30)
011	

 $\theta = a K^{\alpha} + b$ (31) onde C₁, C₂, *a* e *b* são constantes específicas para cada solo.

Yu *et al.* (1997) encontraram ótimos resultados para o modelo de três parâmetros da Equação 24 utilizando α igual a 0,5 para um solo isotrópico. Quando a sonda é instalada na vertical, os valores de α tendem a ser menores que 0,5, mesmo o solo

sendo homogeneo e isotrópico, pois o campo elétrico será perpendicular às camada do solo com diferentes teores de umidade (YU *et al.*, 1997).

2.3.2.3 Fórmula geral De Loor (1968)

A fórmula geral de De Loor (1968), para o modelo de cálculo da constante dielétrica da mistura, é dada por:

$$K = k_s + \sum_{i=1}^{3} \frac{V_c}{3} (k_c - k_s) \sum_{j=1}^{3} \frac{1}{1 + B\frac{k_c}{k_h} - 1}$$
(32)

onde, k_s e k_c são a permissividade relativa do solo e dos componentes (ar, água adsorvida e água livre), respectivamente, k_b é a permissividade relativa efetiva nas extremidades, V_c é o volume da fração dos componentes e B representa a depolarização dos fatores de forma elipsóide do solo dos três eixos.

Considerando que as partículas planas da fração argilosa do solo controlam a distribuição e natureza da água no solo, teremos B = (0,0,1). Sabendo que k_b tem um alcance potencial de $k_s \le k_b \le K$, é assumido que $k_b = K$. Dobson *et al.* (1985), então, reescrevem a Equação 32 da seguinte forma:

$$K = \frac{3k_s + 2V_{al}(k_{al} - k_s) + 2V_{aa}(k_{aa} - k_s) + 2V_g(k_g - k_s)}{3 + V_{al}\left(\frac{k_s}{k_{al}} - 1\right) + V_{aa}\left(\frac{k_s}{k_{aa}} - 1\right) + V_g\left(\frac{k_s}{k_g} - 1\right)}$$
(33)

sendo os índices *al, aa* e *g* relacionados à água livre, água adsorvida e parte gasosa do solo, respectivamente.

Verificando a validade da Equação 33 para oito solos e 3 argilas, Dirksen e Dasberg (1993) *apud* Ponizovsky *et al.* (1999), assumiram que $k_{aa} = 3,2$, $k_{al} = 78,3$, $k_a = 1$ e $k_s = 5$, estimando a fração de água adsorvida no solo com a Equação 34:

$$%V_{aa} = M\delta \rho A_e$$
 (34)

onde, M é o número de camadas moleculares de água adsorvida, δ , a espessura da camada monomolecular d'água (3 x 10⁻¹⁰ m), ρ , a densidade do solo em kg m⁻³ e A_e, a área específica em m² kg⁻¹.

2.3.2.4 Ponizovsky et al. (1999)

Ponizovsky *et al.* (1999) utilizaram o termo "água confinada" como sendo o volume de água próximo às partículas do solo afetado pelas forças de superfície, portanto, com constante dielétrica diferente da água livre. Toda a água no solo é considerada água confinada abaixo de um valor máximo específico para cada tipo de solo, dado por $\theta_{c,max}$. Assim, os pesquisadores utilizaram as seguintes equações para avaliar a existência de uma formulação que se adeque a solos com diferentes texturas e relacionar a constante dielétrica à posição da água nos vazios do solo:

$$K^{\alpha} = \theta K_{c}^{\alpha} + (1 - n) k_{s}^{\alpha} + (n - \theta) k_{g}^{\alpha}, \text{ se } \theta < \theta_{c,max}$$
(35)

 $\mathsf{K}^{\alpha} = \theta_{\mathsf{c},\mathsf{max}} \; \mathsf{K}_{\mathsf{c}}^{\alpha} + (\theta - \theta_{\mathsf{c},\mathsf{max}}) \; k_{a'}^{\alpha} + (1 - \mathsf{n}) \; k_{\mathsf{s}}^{\alpha} + (\mathsf{n} - \theta) \; k_{g}^{\alpha} \; \text{ , se } \theta > \theta_{\mathsf{c},\mathsf{max}}$

onde K é a constante dielétrica do meio, α , o parâmetro que reflete a geometria do meio com respeito ao campo magnético aplicado, θ é a umidade volumétrica do solo, K_c, a constante dielétrica aparente da água confinada, n é a porosidade do solo, α , a exponencial que reflete a estrutura do meio e ks, k_g e k_{al} , respectivamente, as constantes dielétricas da parte sólida, gasosa e da água livre no solo.

Os pesquisadores concluiram que K diminui quando a porcentagem de argila no solo aumenta e os valores de α e $\theta_{c,max}$ sobem à medida em que a porcentagem de argila no solo cresce.

Klemunes (1998) reuniu valores experimentais para α de alguns pesquisadores para modelos mistos de três e quatro fases, apresentados no Quadro 3.

FASES						
	Roth <i>et al.</i> (1990)	α = 0,5 (11 solos minerais				
Modelo dielétrico misto		e 2 solos orgânicos)				
de três fases	Jacobsen e Schjonning	α = 0,66 (10 solos				
	(1994)	minerais)				
	Dirkson o Dochorg (1002)	α = 0,49; 0,5; 0,52; 0,54;				
	Dirksen e Dasberg (1993)	0,6; 0,61; 0,81(8 solos)				
Modelo dielétrico misto	Correspondente aos					
de quatro fases	valores encontrados por	$\alpha = 0.7$ (10 color minoraio)				
	Jacobsen e Schjonning					
	(1994)					
	Fonte: KLEMUNES (1998)					

QUADRO 3 - VALORES DE α PARA OS MODELOS MISTOS DIELÉTRICOS DE TRÊS E QUATRO FASES

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve o programa experimental realizado nesta dissertação. Primeiramente são descritos os materiais utilizados, seguido do método da pesquisa e os ensaios realizados.

3.1 EQUIPAMENTO TDR

O equipamento utilizado neste trabalho pertence ao Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Espírito Santo. O aparelho é de fabricação alemã, IMKO Micromodultechnik, modelo TRIME TDR, que é baseado na tecnologia TDR e foi desenvolvido para medir a constante dielétrica de material com uma onda eletromagnética de alta frequência.

A onda é emitida pelo controlador e percorre as guias de metal até a ponta, onde é refletida e volta ao controlador. Durante esse percurso, a onda rastreia um volume ao redor da sonda, que redireciona os dipolos da água, retardando seu retorno. Medindo o tempo de retorno da onda, o transmissor consegue calcular a quantidade de água contida no volume rastreado.

O equipamento é composto basicamente de um sonda que faz medição de umidade volumétrica e temperatura, uma unidade de transmissão de dados sem fio, por tecnologia *bluetooth*, e uma unidade de aquisição de dados.

O equipamento é acompanhado de um PDA com software *pico-talk*® em caixa resistente a água, que permite leitura com agilidade em tela *touch-screen* de fácil uso. Em laboratório, podem ser baixados os dados por meio de computadores convencionais que possuem conexão sem fio com tecnologia *Bluetooth*, ou mesmo via entrada USB.

3.1.1 Programa Trime Tool

Para o uso da sonda TDR, tanto em campo quanto em laboratório, foi utilizado um acessório da mesma fabricante IMKO Micromodultechnik. Se trata de um conversor de dados nomeado SM-USB.



FIGURA 5 – CONVERSOR SM-USB CONECTADO À SONDA TDR-32

Fonte: Manual Trime TDR

Após a leitura da constante dielétrica pela sonda inserida no solo, os resultados podem ser visualizados em um computador conectado ao SM-USB, através do *software Trime Tool*.

Para cada amostra, podem ser feitas inúmeras medidas contínuas. No caso desta pesquisa, foram feitas doze medidas para cada amostra ensaiada.

Test ir	Mode A								2						X
No.	Time	Date	Count	ASICCount	ASICTemp	t	tp	StdMst	MatMst	Moist	TDRLevel	MatTemp	Conduct		
1	16:32:23	21.10.2010	847.546	847.546	51.10	1423.848	-28.608	-20.000	-42.010	0.000	98.300	23.0	0.000	_	
2	16:32:18	21.10.2010	704.333	704.333	50.51	1183.255	-87.057	-20.000	-42.010	0.000	76.200	23.1	1.920		
3	16:32:14	21.10.2010	1751.584	1751.584	49.98	2942.603	340.353	340.3	13.663	13.660	83.900	23.0	0.920		
4	16:32:09	21.10.2010	1665.059	1665.059	49.63	2797.243	305.039	305.0	10.980	10.980	82.900	23.0	1.050		
5	16:32:05	21.10.2010	993.675	993.675	49.10	1669.341	31.031	31.031	-16.633	0.000	82.900	23.0	1.050		
6	16:32:01	21.10.2010	833.801	833.801	48.80	1400.757	-34.218	-20.000	-42.010	0.000	73.900	23.0	2.220		
7	16:31:56	21.10.2010	1972.834	1972.834	48.56	3314.294	430.650	430.6	22.028	22.020	86.900	23.0	0.530		
8	16:31:52	21.10.2010	1989.098	1989.098	47.73	3341.618	437.288	437.2	22.685	22.680	87.400	23.0	0.460	Manura	
9	16:31:47	21.10.2010	1998.478	1998.478	46.65	3357.376	441.116	441.1	23.064	23.060	87.400	23.1	0.460	Measure	
10	16:31:43	21.10.2010	1488.004	1488.004	45.04	2499.797	232.779	232.7	6.951	6.950	97.100	23.2	0.000		
-						10000000000000		2-2020000			100025-010	in a contract	05-45-55-52	Save	
-														Class	
														Close	
-															
-															
-															

FIGURA 6 – DADOS APRESENTADOS PELO TRIME TOOL A CADA ENSAIO

Fonte: Manual Trime TDR

3.2 MATERIAIS

Para os ensaios, foram utilizados duas areias argilosas de características distintas, retiradas do mesmo local. Além disso, foram realizados ensaios utilizando microesferas de vidro, que serviram de solo padrão por sua semelhança com as microesferas utilizadas por Topp *et al.* (1980) em sua pesquisa.

3.2.1 Região do estudo dos solos ensaiados

Os ensaios de campo, e retirada das amostras foram realizados na região litorânea do município de Serra, localizada na micro-região metropolitana de Vitória, conhecida como Grande Vitória, que fica no estado do Espírito Santo, região Sudeste brasileira (Figuras 7 e 8).



FIGURA 7 - LOCALIZAÇÃO DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO E SUA CAPITAL VITÓRIA NO

Fonte: IBGE adaptado por MORAES (2008)

FIGURA 8 – MUNICÍPIOS INTEGRANTES DA REGIÃO METROPOLITANA DA GRANDE VITÓRIA (RMGV)



Fonte: IBGE adaptado por MORAES (2008)

Na primeira etapa da pesquisa, foram realizadas medidas de campo em dois solos sedimentares distintos, da formação barreira de Manguinhos, Serra, ES (Figura 9);

FIGURA 9 - LOCALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE CAMPO COM O TDR EM MANGUINHOS, SERRA, ES.



Fonte: Google Maps

O solo estudado faz parte do grupo barreira, que ocupa uma expressiva área de afloramentos da porção centro norte do Espírito Santo (Figura 10), situando-se ao longo de toda a costa e podendo ser facilmente identificada pela sua feição morfológica típica de tabuleiro. As principais litologias na região são representadas por sedimentos de coloração bastante variada. Predominam areias de granulação média, por vezes intercalada por delgadas camadas de argila. O solo mais encontrado no Grupo Barreira é o latossolo amarelo, solos profundos a muito profundos, acentuadamente drenados, elevado intemperismo, ácidos e com predominância de argila do grupo caulinita (RANGEL et al., 2000).



FIGURA 10 - DISTRIBUIÇÃO DE DEPÓSITOS TERCIÁRIOS DA FORMAÇÃO BARREIRAS AO LONGO DO LITORAL CAPIXABA.

Fonte: AMADOR; DIAS (1978) apud ALBINO et al. (2006)

3.2.2 Características dos solos ensaiados

Os seguintes ensaios foram realizados para caracterização do solo avaliado. Foi utilizada a Norma Brasileira de Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização (NBR 6457, 1986).

- Granulometria (NBR 7181, 1984);
- Limite de liquidez (NBR 6459, 1984);
- Limite de plasticidade (NBR 7180, 1984);

- Limite de contração (NBR 7183, 1982);
- Determinação da massa específica (NBR 6508, 1984);

Para a identificação dos dois tipos de solo foram utilizados os termos "solo amarelo" e "solo vermelho". A Tabela 1 apresenta os resultados da caracterização de ambos, com os ensaios de limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), limite de contração (LC) e densidade aparente dos grãos (Gs) obtidos para os solos estudados. Já a Tabela 2 contém a distribuição granulométrica dos solos investigados nesta pesquisa.

TABELA 1 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LIMITES E DENSIDADE DOS GRÃOS DOS SOLOS ESTUDADOS

Solo	LL	LP	LC	Gs (g/cm³)
Amarelo	54%	21%	32%	2,719
Vermelho	72%	30%	33%	2,702

~	,	
		LOTODADOS

Granulometria		Solo	Solo	
	Granulometria	amarelo	vermelho	
	Pedregulho Grosso	0,00%	0,00%	
	Pedregulho fino	0,47%	6,69%	
	Areia Grossa	10,30%	12,64%	
	Areia Média	17,65%	26,12%	
	Areia Fina	31,15%	19,73%	
	Finos	40,43%	34,83%	

Após a caracterização dos solos, pode-se classificá-los de acordo com o Sistema de Unificado de Classificação do Solos (SUCS). Os dois solos foram classificados como areias argilosa (SC).

3.2.3 Microesferas de vidro

As microesferas de vidro utilizadas na pesquisa são vendidas comercialmente pela Potters Industrial; são do tipo AF, com dimensões de 150 a 75µm, sua granulometria está entre as peneiras números 100 e 200 e a densidade dos grãos, encontrada através do método estipulado pela norma brasileira (NBR 6508 (1984)), foi de 2,42 g/cm³.



FIGURA 11 - TRIME PICO 32 NA AMOSTRA DE MICROESFERAS DE VIDRO

Fonte: Autor (2013)

3.3 MÉTODO DO TRABALHO

A pesquisa se divide em dois momentos: primeira e segunda etapa de ensaios.

A primeira etapa de ensaios abrange os ensaios de campo, para os dois solos analisados e os ensaios em laboratório, onde foram utilizadas as microesferas de vidro. A segunda etapa, por sua vez, foi toda realizada em laboratório, com o controle da densidade das amostras.

Ao longo do capítulo as etapas são descritas com maiores detalhes.

3.3.1 Variáveis da pesquisa

A bibliografia aponta vários fatores que podem influenciar nas medidas da umidade volumétrica através do TDR. Algumas variáveis foram desconsideradas nesta pesquisa, seja por serem de maior dificuldade para obtenção ou, de acordo com alguns pesquisadores, não influenciarem significantemente nas medidas da umidade volumétrica. É o caso da temperatura, uma vez que o estudo em questão não possui amostras de solo com temperaturas abaixo do congelamento, valores considerados relevantes (OKRASINSKI et al., 1978; TOPP et al.,1980)

As variáveis de controle, variáveis desconsideradas nesta pesquisa, são, neste caso, a temperatura, a parte imaginária da constante dielétrica relativa, a frequência e a salinidade do solo.

A composição do solo se apresenta como variável interveniente, ou seja, não podemos controlar a sua influência nos resultados.

Este trabalho foca na variação dos resultados ao se controlar a densidade do solo e ao serem utilizados materiais de características diferentes. Desta forma, a densidade do solo é uma variável independente, que será utilizada para o cálculo da umidade volumétrica do solo através do método da estufa, resultando na umidade tida como referência para essa pesquisa. Outra variável independente é a constante dielétrica, que fornecerá o valor da umidade volumétrica do solo através do TDR.

As variáveis dependentes, portanto, serão as umidades volumétricas, obtidas tanto através das medidas do TDR, quanto pela multiplicação da umidade gravimétrica do solo pela densidade do solo.

A descrição dos ensaios realizados apresenta os métodos para a obtenção de tais variáveis.

3.3.2 Primeira Etapa de Ensaios

Antes da apresentação da primeira etapa de ensaios, foram realizados ensaios preliminares para melhor domínio da técnica e equipamentos. Algumas conclusões e resultados estão listados a seguir.

3.3.2.1 Ensaios Preliminares

Primeiramente, alguns testes e ensaios de campo foram realizados para avaliação do equipamento em questão. Através de uma calibração padrão, indicada no manual, utilizando um cilindro com água, obteve-se o valor de 100% de umidade, concluindo-se que o aparelho estava com a a calibração correta.

Pode-se perceber que seria necessária uma umidade volumétrica que servisse de referência para as medidas coletadas com o TDR, uma vez que não era possível a confirmação dos dados fornecidos. Foram, então, utilizadas amostras com volumes definidos. Assim, através da densidade e umidade gravimétrica, seria possível a comparação com θ fornecido pelo aparelho.

Através desta avaliação primária, foi descoberto que o aparelho fornece diretamente o valor de θ do solo, portanto, concluiu-se também que seria necessário o conhecimento da equação de calibração padrão do TDR para se obter o valor de K, uma vez que a bibliografia possui equações com base no valor da constante dielétrica para análise. Em contato com o fabricante, foi obtida a informação que a equação padrão utilizada era a "equação universal", assim, através da mesma, pode ser obtido o valor de K para cada ponto das medições.

Outra característica avaliada foi a profundidade de cravação da sonda no solo. Observa-se (Figura 12) que os valores fornecidos pela sonda, para medidas onde a sonda não estava completamente cravada no solo (marcados em vermelho), apresentam uma disparidade dos demais resultados.

FIGURA 12 - RESULTADOS DOS ENSAIOS PRELIMINARES COM DIFERENTES PROFUNDIDADES DE CRAVAÇÃO DA SONDA TDR

MatMoist	TempMo	Moist	DR	Mea			h		
5,164	5,164	5,165	84,2	loist	TempM	i: Moist	т	DR	Mea:
5,205	5,205	5,206	84,2	,521	1,5:	1 1,521	Ť	92,6	
4,863	4,863	4,863	86	,555	1,55	5 1,556		92,6	
4,907	4,907	4,908	86	1,59	1,5	9 1,591		92,8	
5,175	5,175	5,176	84,1	1,6	1	6 1,601		92,7	
5,207	5,207	5,208	84	,637	1,63	7 1,637	1	92,9	
3.4	3.6	3.4	90.4	,639	1,63	9 1,639	4	92,9	
3,4	5/1	3,4	50,4	,126		0 0,001		95,4	
			-						

Fonte: Foto da tela do Trime Pico Software (2013)

Outra observação que pode ser feita, após essa primeira fase de análises, foi a de que, uma vez que a sonda deverá estar totalmente cravada na amostra, deve-se evitar solos muito compactados, pois os mesmos dificultam a inserção da sonda e podem danificá-lo.

3.3.2.2 Ensaios de campo

Para os primeiros ensaios em campo, na formação barreira em Manguinhos, foram moldados, para cada tipo de solo encontrado, dois anéis volumétricos, de acordo com as indicações da norma NBR 12007 (1990) para adensamento, a fim de serem pesados e, após secagem em estufa, obter a sua densidade (Figura 13).

Também foram retiradas amostras amolgadas para a realização dos ensaios de caracterização de cada solo.



FIGURA 13 - ANEL VOLUMÉTRICO COM A AMOSTRA DE SOLO AMARELO

Fonte: Autor (2013)

Para as medidas de umidade volumétrica utilizando a estufa, foram recolhidas amostras do solo, pesadas no local com o auxílio de uma balança de precisão com incerteza de 0,01 gramas e adaptador para carga em automóvel. As amostras foram lacradas para evitar perda de material.

Já em laboratório, as amostras foram levadas à estufa por 24 horas e pesadas novamente para a obtenção da umidade gravimétrica. Com os dados de volume e peso dos anéis volumétricos moldados em campo e também pesados no local, pode-se obter a densidade do solo úmido e seco (após secagem em estufa), através da relação massa sobre volume da amostra e, por conseguinte, a umidade volumétrica das amostras, multiplicando-se a umidade gravimétrica pela densidade seca do solo.

$$\theta = w \times \left(\frac{\rho_d}{\rho_a}\right) \tag{1 bis}$$

onde ρ_d é a massa específica seca do solo e ρ_a é a massa específica da água.

Para a medida da umidade volumétrica com o aparelho TDR Trime Pico 64, foi

utilizado um pequeno trado manual para facilitar a cravação da sonda TDR no talude (Figura 14). As medidas foram realizadas na horizontal para evitar possíveis diferenças entre as camadas do solo (HUGH, 1999) (Figura 15).

FIGURA 14 – LOCAL DE MEDIÇÃO DO SOLO VERMELHO UTILIZANDO TRADO MANUAL PARA CRAVAÇÃO DA SONDA NO SOLO.



Fonte: Autor (2013)

FIGURA 15 - TDR TRIME-PICO 64 DA IMKO NA VERTICAL E TRIME-PICO 32 NA HORIZONTAL



Fonte: Manual Trime TDR

Dessa forma, com o TDR e o auxílio de um computador portátil, obteve-se a

umidade volumétrica de campo, que foi comparada com a umidade volumétrica de referência, encontrada via peso específico e umidade gravimétrica (LIN et al., 2012). Foram feitas por volta de doze medidas contínuas a fim de se utilizar a média da umidade volumétrica fornecida pelo TDR.

3.3.2.3 Ensaios em laboratório

Em laboratório, foram feitas medidas utilizando microesferas de vidro, por possuir características semelhantes a um dos materiais utilizados por Topp *et al.* (1980).

Para os ensaios com as microesferas de vidro e demais ensaios em laboratório, foi utilizado o Trime Pico 32, por conta de suas dimensões menores mais apropriadas para o uso em amostras moldadas e de volume reduzido. A sonda também foi utilizada com o auxílio de um computador portátil para a leitura dos dados. O software chamado Trime Tool foi instalado e. ao ser plugada a sonda via entrada USB, é feito o reconhecimento da mesma pelo programa.

Para a moldagem das amostras, foi utilizado um cilindro de acrílico com doze centímetros de diâmetro por quinze de altura. Ao total, foram moldadas quatro amostras com diferentes teores de umidade, partindo-se da umidade higroscópica das microesferas. Toda a água utilizada nos ensaios de laboratório era destilada, como sugerido por Knoll (1996).



FIGURA 16 – MICROESFERAS DE VIDRO NO CILINDRO DE ACRÍLICO

Fonte: Autor (2014)

A cada amostra medida, utilizando a sonda TDR, o conjunto solo-cilindro era pesado e também eram retiradas três amostras para a obtenção do teor de umidade gravimétrica pelo método da estufa. Foram realizadas cerca de 12 medidas contínuas com o TDR para cada amostra e utilizada a média dos resultados.

3.3.3 Segunda etapa - Ensaios laboratoriais com controle da densidade

Hallikainen et al. (1985) concluíram que, se os efeitos da densidade são controlados, a constante dielétrica do solo seco é praticamente independente da textura e frequência. Desta forma, após a primeira etapa de ensaios, foram recolhidas amostras dos dois solos analisados em campo para os ensaios em laboratório utilizando o TDR Pico 32 com o controle da densidade e grau de compactação do solo. O objetivo foi avaliar se o controle da densidade do solo, para vários teores de umidade, influencia nos resultados e curvas de calibração. Para isso, foram feitos moldes com volume e compactação padronizados, procurando manter uma mesma proporção entre peso do solo e volume.

O solo utilizado também foi retirado da formação barreira de Manguinhos, Serra, ES e também foram feitos novos ensaios com as microesferas de vidro.

Todos os ensaios foram realizados em temperatura ambiente, por volta de 30° C, e os efeitos da temperatura nessa faixa foram novamente desprezados de acordo com as afirmações da bibliografia. (OKRASINSKI et al., 1978; TOPP et al., 1980)

Para esta segunda etapa de ensaios, foram utilizados tubos de PVC de 9,70 cm de diâmetro, com marcações a cada 5 cm de altura até uma altura máxima de 15 cm (Figura 17). A compactação do solo foi feita em 3 camadas, com peso constante para todas camadas, variando somente o grau de compactação para alcançar o volume estipulado pela marcação de altura, procurando, portanto, manter a densidade da amostra, mesmo com a variação de umidade entre as medidas.



FIGURA 17 - TUBO DE PVC UTILIZADO NOS ENSAIOS EM LABORATÓRIO

Fonte: Autor (2014)

A escolha dos materiais utilizados para a compactação da amostra para os ensaios de laboratório, o cilindro de acrílico e o de PVC, foi feita com o intuito de evitar que os materiais influenciassem nas medidas realizadas, pois a influência da parede no

tempo de percurso é menor que a resolução do TDR para esses materiais. (KENG;TOPP, 1983)

A Figura 18 apresenta o soquete fabricado na própria universidade para melhor compactação da amostra; já as figuras 19 e 20 são fotos retiradas durante os ensaios, ao ser realizada a compactação da amostra e a medição com o TDR Pico 32, respectivamente.

FIGURA 18 - SOQUETE DE MADEIRA FABRICADO PARA A COMPACTAÇÃO DA AMOSTRA



Fonte: Autor (2014)





Fonte: Autor (2014)



FIGURA 20 - TDR PICO 32 DURANTE A MEDIDA DA UMIDADE VOLUMÉTRICA

Fonte: Autor (2014)

3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para a análise estatística das equações estudadas na bibliografia, foi utilizada a proposta de Santos et al. (2012), que avalia o desempenho das equações em relação aos pontos medidos utilizando o coeficiente de concordância "d" e o desvio padrão geral (GSD), Equações 36 e 37 respectivamente.

$$d = 1 - \frac{\sum^{m} (E_i - Z_i)^2}{\sum^{m} (|E_i - \overline{M}| + |Z_i - \overline{M}|)^2}$$
(36)

$$GSD = \sqrt{\frac{\sum^{m} (E_{i} - Z_{i})^{2}}{m} \cdot \frac{1}{\overline{M}}}$$
(37)

onde E é o valor estimado, Z é o valor medido, \overline{M} , a média dos valores medidos e m, o número de medições.

Os limites a serem tomados para a avaliação do desempenho de modelos são: bom desempenho para GSD \leq 0,10 e d \geq 0,95 e desempenho ruim para GSD > 0,2 e d < 0,9. As demais faixas de variação destes índices são consideradas como de desempenho aceitável (FILA *et al.* (2003) apud SANTOS et al. (2012)).

4 ERRO! FONTE DE REFERÊNCIA NÃO ENCONTRADA.

4 RESULTADOS

Os resultados das duas etapas de ensaios são apresentados a seguir. São fornecidos, em forma de tabelas, os valores das umidades obtidas através do produto da densidade do solo e da umidade gravimétrica da amostra (θ referência), além da umidade fornecida pelo aparelho TDR, chamada aqui de θ TDR, e do valor da constante dielétrica (K) para cada amostra.

Em seguida, cada ponto obtido foi plotado ($\theta \times K$) e os gráficos são apresentados para a comparação das diferenças dos resultados entre as duas etapas de ensaios.

4.1 RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA DE ENSAIOS

4.1.1 Ensaios de campo

Solo vermelho

A Tabela 3 contém o resumo dos dados obtidos com os primeiros ensaios realizados em campo.

O aparelho já fornece o valor da umidade volumétrica diretamente, pois possui a "equação universal" como calibração padrão; através da Equação 13, foi calculada a constante dielétrica de cada ponto.

Já a umidade de referência foi calculada através da densidade dos anéis moldados em campo e da umidade gravimétrica calculada.

SOLOS ENSAIADOS E	DA GRANDE VITÓRIA-E	S:	
Solo	θ referência	θTDR	К
Solo amarelo	25%	11%	5,72

30%

19%

9,54

TABELA 3 – VALORES DAS UMIDADES VOLUMÉTRICAS DE REFERÊNCIA E DO TDR E DA CONSTANTE DIELÉTRICA APARENTE DOS ENSAIOS DE CAMPO PARA OS DOIS SOLOS ENSAIADOS DA GRANDE VITÓRIA-ES:

Observa-se que os valores que a sonda fornece diferem consideravelmente dos valores encontrados utilizando a umidade gravimétrica e a densidade do solo, o que, à primeira vista, implica que a calibração para os diferentes tipos de materiais se torna necessária. É importante ressaltar que, para os dois solos avaliados, o TDR

subestimou os valores de sua umidade, comportamento encontrado na bibliografia para solos com alta porcentagem de finos, devido à maior quantidade de água aderida às partículas (ANISKO et al, 1994; ROTH et al., 1990; LEDIEU et al., 1986).

4.1.2 Ensaios de laboratório – Microesferas de vidro

A Tabela 4 apresenta os resultados da primeira etapa dos ensaios de laboratório com as microesferas de vidro. Pode-se notar, com exceção do terceiro ponto, que os valores da umidade volumétrica foram superestimados, o que já foi constatado por Topp et al. (1980).

TABELA 4 – RESULTADOS DAS UMIDADES VOLUMÉTRICAS DE REFERÊNCIA E DO TDR E DA CONSTANTE DIELÉTRICA APARENTE DOS ENSAIOS COM AS MICROESFERAS DE VIDRO EM LABORATÓRIO:

Medida	θ referência	θTDR	К
1	1%	1%	3,22
2	2%	5%	3,87
3	9%	7%	4,33
4	12%	17%	8,63

4.2 SEGUNDA ETAPA DE ENSAIOS

Após a primeira etapa da pesquisa, foram realizados os ensaios em laboratório, procurando-se manter a densidade constante. O objetivo desta fase foi de verificar o impacto da densidade nos valores da constante dielétrica e, por conseguinte, nas medidas das umidades volumétricas.

4.2.1 Microesferas de vidro

A média das densidades das microesferas ficou em 1,43 g/cm³, com um valor mínimo de 1,40 g/cm³ e máximo de 1,44 g/cm³.

Os resultados dos ensaios utilizando as microesferas de vidro estão apresentados na Tabela 5.

TABELA 5 - RESULTADOS DOS ENSAIOS COM AS MICROESFERAS DE VIDRO EM

Medida	θ referência	θTDR (%)	K
1	1%	2	3,32
2	2%	6	4,12
3	1%	5	3,92
4	3%	7	4,37
5	8%	14	6,80
6	11%	19	9,32

Verifica-se que os valores das umidades volumétricas medidas com o TDR continuam superestimadas, como já apresentados na Tabela 4. Pode-se observar, também, que os resultados encontrados para K próximos da umidade higroscópica correspondem aos valores encontrados por Topp et al. (1980), ou seja, próximos de 3.

Os Gráficos 1 e 2 apresentam a comparação entre os primeiros ensaios com as microesferas sem o controle da densidade (etapa 1) e os ensaios posteriores (etapa 2).

No Gráfico 1, as curvas apresentam uma diferença considerável, porém, ao serem retirados os pontos de maior incerteza, sendos estes, na etapa 1, a terceira amostra, que é a única que não superestima o valor da umidade volumétrica e na etapa 2 os pontos de menor umidade (os 3 primeiros pontos), as curvas se aproximam.

Apesar da maior proximidade das curvas, os resultados sugerem que o controle da porosidade não pode ser negligenciado, o que já era conhecido por Knoll (1996), que afirma que para solos extremamente secos, K é independente da textura e frequência, dependendo somente da porosidade.Também pode-se citar Okrasinski et al. (1978), que afirmam que K diminui linearmente com o aumento da porosidade.

Pode-se observar também que a distância entre o terceiro e quarto pontos na primeira etapa de ensaios, com as microesferas, provoca uma inflexão no gráfico . A partir do momento em que, na segunda etapa de ensaios, a distância entre as umidades das amostras diminui, o gráfico apresenta uma curva com melhor distribuição, ou seja, como esperado de acordo com a revisão blibliográfica. Isso pode ser observado na curva da etapa 2, mostrada no Gráfico 1. O ponto em vermelho está praticamente no meio do intervalo entre as medidas 3 e 4 da primeira

etapa de ensaios.

GRÁFICO 1 - COMPARAÇÃO ENTRE OS GRÁFICOS DE UMIDADE VOLUMÉTRICA VERSUS CONSTANTE DIELÉTRICA PARA AS DUAS ETAPAS DE ENSAIOS COM AS MICROESFERAS DE VIDRO:



GRÁFICO 2 - COMPARAÇÃO ENTRE OS GRÁFICOS DE UMIDADE VOLUMÉTRICA VERSUS CONSTANTE DIELÉTRICA PARA AS DUAS ETAPAS DE ENSAIOS COM AS MICROESFERAS DE VIDRO, RETIRANDO-SE OS PONTOS DE INCERTEZA:



4.2.2 Resultados para os Solos ensaiados

Os mesmos ensaios com controle da densidade foram realizados para os dois tipos de solos.

Os valores das densidades para o solo amarelo variaram entre 0,97 g/cm³ e 1,03 g/cm³, com o valor médio de 1 g/cm³. Já para o solo vermelho, que possui uma quantidade maior de areia e pedregulhos, houve uma dificuldade em se manter os valores das densidades para cada medição. Nesse caso, foram obtidas densidades entre 1,05 g/cm³ e 1,24 g/cm³, com o valor médio de 1,12 g/cm³.

A Tabela 6 apresenta os resultados encontrados. Nota-se que os valores obtidos com o TDR continuam subestimando os valores de umidade volumétrica, como nos ensaios preliminares (Tabela 3).

	Medida	θ referência (%)	θTDR (%)	K	
Solo amarelo	1	16	6	4,12	
	2	21	10	5,38	
	3	27	23	11,64	
Solo vermelho	1	16	9	5,10	
	2	23	13	6,58	
	3	32	28	15,40	

TABELA 6 - RESULTADOS DOS ENSAIOS COM OS DOIS TIPOS DE SOLO EM LABORATÓRIO:

O Gráfico 3 apresenta os pontos plotados dos resultados da segunda etapa de ensaios para os dois solos analisados.

No Gráfico 4 estão incluídos os pontos da primeira etapa de ensaios. Pode-se notar que, da mesma forma que foi observado nos ensaios com as microesferas de vidro, no caso dos ensaios com o solo vermelho, quando o intervalo entre as medidas é diminuído, a curva perde a inflexão.

GRÁFICO 3 – COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA DE ENSAIOS PARA OS SOLOS VERMELHO E AMARELO



Fonte: Autor


GRÁFICO 4 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DAS DUAS ETAPAS DE ENSAIOS PARA OS SOLOS VERMELHO E AMARELO

Fonte: Autor

5 DISCUSSÃO

5 DISCUSSÃO

Terminada cada etapa de ensaios, foram definidas as correlações entre os valores das umidades volumétricas utilizando o TDR e as umidades de referência, obtidas através do produto da densidade do solo e da umidade gravimétrica.

Assim foi possível calcular os desvios entre os valores, procurando as restrições no uso da calibração que já existe no aparelho, com base na equação de Topp et al. (1980), além de analisar para quais tipos de solo e teor de umidade volumétrica se faz necessária uma calibração específica.

Com os valores de K e θ referência, foi possível estabelecer relações entre as equações da bibliografia e os resultados encontrados.

Para a avaliação dos dados obtidos, inicialmente foram comparadas cinco equações empíricas já publicadas, que relacionam a constante dielétrica e a correspondente umidade volumétrica.

REFERÊNCIAS	CALIBRAÇÕES
Topp <i>et al</i> . (1980)	$\theta = (-530 + 292K - 5,5K^2 + 0,043K^3) / 10^4$
Ledieu et al. (1986)	$\theta = 0,1138 \ K^{0,5} \ - \ 0,1758$
Jacobsen e Schjonning (1993)	$\theta = (-7.01x \ 10^{-2}) + (3.47 \ x \ 10^{-2} \ K) - (11.6 \times 10^{-4} \ K^2) + (18.0 \times 10^{-6} \ K^3)$
Tommaselli e Bacchi (2001)	$\theta = -0.0194 + 0.0269K - 0.0007K^2 + 8.10^{-6}K^3$
Medeiros et al. (2007) (1)	$\theta = 0,0366 + 0,02698K - 4,8.10^{-4} K^2 + 3,6.10 - 6K^3$

QUADRO 4 – EQUAÇÕES EMPÍRICAS UTILIZADAS NESTE ESTUDO

Fonte: Autor

O Gráfico 5 representa as equações listadas no Quadro 4 para o intervalo de umidades volumétricas dos ensaios realizados neste estudo.

GRÁFICO 5 - COMPARAÇÃO ENTRE AS EQUAÇÕES EMPÍRICAS DE TOPP *ET AL.* (1980), LEDIEU (1986), JACOBSEN E SCHJONNING (1993), TOMMASELLI E BACCHI (2001) E MEDEIROS *ET AL.* (2007) (1)



A calibração de Medeiros *et al.* (2007) utilizada para comparação foi a Equação 23, nomeada no Quadro 4 como Medeiros *et al.* (2007) (1). Uma vez que a proposta de calibração de Medeiros *et al.* (2007) para maiores profundidades (Equação 24) se distancia muito das outras referências e dos resultados obtidos nessa pesquisa, a partir deste momento no texto, a Equação 23 será chamada somente de calibração de Medeiros *et al.* (2007).

Pode-se notar que os gráficos das equações que utilizaram solos internacionais se apresentam bem unidos para este intervalo de zero a 30% de umidade volumétrica, com uma separação mais evidente para os pontos de maior umidade, acima de 25%.

Apresentando uma maior curvatura, o gráfico de Tommaselli e Bacchi (2001), que utilizaram solos brasileiros para a calibração, se distingue dos anteriores; porém, os gráficos com características mais distantes dos demais foram os encontrados por Medeiros *et al.* (2007), que demonstram que a equação de Topp *et al.* (1980) subestimou as medidas efetuadas.

5.1.1 Comparações entre os resultados experimentais e as calibrações avaliadas neste estudo

Os resultados experimentais foram utilizados para avaliar o comportamento de cada uma das equações.

GRÁFICO 6 - COMPARAÇÃO ENTRE AS EQUAÇÕES EMPÍRICAS DE TOPP ET AL. (1980), LEDIEU (1986), JACOBSEN E SCHJONNING (1993), TOMMASELLI E BACCHI (2001) E MEDEIROS *ET AL.* (2007) COM OS PONTOS OBTIDOS COM OS ENSAIOS REALIZADOS PELO AUTOR





Nota-se que, como já observado, as equações empíricas subestimam os valores das umidades volumétricas para os solos estudados.

Alguns pesquisadores obtiveram resultados condizentes com os dessa pesquisa: todos os pontos medidos por Medeiros *et al.* (2007) com um Latossolo Vermelho Distroférrico ficaram acima da curva apresentada pela "equação universal".

Andrade et al. (2003) estudaram um Latossolo Vermelho e um Neossolo quartzarênico e também tiveram seus valores e umidade volumétrica subestimados. Souza et al. (2001), também avaliando um Latossolo, obtiveram valores de umidade volumétrica subestimados até um valor de umidade volumétrica por volta de 25%.

No caso das microesferas de vidro, os valores das umidades volumétricas são superestimados pelas calibrações analisadas, resultado também encontrado por Ishizuka e Mikami (2005).

Uma explicação dada para esse comportamento é que a água não está tão uniformemente distribuída (TOPP et al., 1980).

5.1.2 Resultados experimentais e Topp *et al.* (1980)

No Gráfico 7 é apresentada a curva de calibração de Topp et al. (1980), com os pontos obtidos na primeira e segunda etapas de ensaios.



GRÁFICO 7 - RESULTADOS OBTIDOS PARA TODOS OS MATERIAIS ENSAIADOS EM

Fonte: Autor

Nota-se que, aplicando um intervalo de incerteza de <u>+</u>5%, os pontos dos ensaios com as microesferas de vidro ficam dentro do intervalo de incerteza. Pode-se citar que Todoroff e Langellier (1997) também obtiveram bons ajustes ao utilizar a "equação universal".

Já para os solos ensaiados, a distância dos pontos para a curva de Topp et al. (1980) demonstra o que já havia sido questionado por vários pesquisadores: a equação não contempla solos brasileiros com alto grau de intemperismo e de textura fina (JACOBSEN, SCHJONNING, 1993; ELAIUY et al., 2009; SANTOS et al., 2012).

Pode-se observar que os pontos se aproximam da curva de Topp et al. (1980) para os valores mais altos de umidade, o que vai ao encontro das conclusões de Roth et al. (1990), que obtiveram valores de incerteza consideravelmente menores (1,2%) para altos teores de umidade volumétrica, em comparação com a incerteza no caso dos solos extremamente secos (16%).

Os resultados de Topp et al. (1980) apresentam baixos valores para K quando a umidade volumétrica é próxima de 10% e a partir de valores por volta de 40% em solos argilosos; já os solos arenosos apresentam maior curvatura para valores de umidade volumétrica por volta de 10%.

Pode-se também confirmar a observação de algums estudos que apontam para um crescimento lento no valor de K para pontos de baixa umidade até um valor de umidade crítica, que varia de solo para solo, sendo menor para os solos arenosos; após esse, os valores da constante dielétrica crescem mais rapidamente. (KNOOL, 1996)

5.1.3 Método de Ledieu et al. (1986)

Foi utilizada a Equação de Ledieu para a obtenção da umidade volumétrica, a fim de, em seguida, comparar aos valores obtidos através do método da estufa e o TDR. Pode-se notar que os valores fornecidos pela equação de Ledieu et al. (1986) ficaram próximos dos lidos no TDR, pois ambos têm sua origem empírica em comum.

TABELA 7	/ – COMPARA	ÇÃO DOS	VALORES	OBTIDOS	PARA A	UMIDADE	VOLUMÉ	TRICA
	ATRAVÉS D	O MÉTODO	D DA ESTU	FA, EQUAÇ	XÃO PROI	POSTA POR	LEDIEU	ET AL.
	(1986) E A '	EQUAÇÃO	UNIVERSA	L" PARA A	S MICRO	ESFERAS DE	E VIDRO	SEM O
	TERCEIRO I	PONTO						

Medida	K	θLedieu et al. (1986)	θ calculado com estufa	θTDR
1	3,22	3%	1%	2%
2	3,87	5%	3%	5%
3	8,63	16%	12%	17%

TABELA 8 - COMPARAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS PARA A UMIDADE VOLUMÉTRICA ATRAVÉS DO MÉTODO DA ESTUFA, EQUAÇÃO PROPOSTA POR DE LEDIEU ET AL. (1986) E A "EQUAÇÃO UNIVERSAL" PARA AS MICROESFERAS DE VIDRO COM CONTROLE DA DENSIDADE

Medida	K	θLedieu et al. (1986)	θ calculado com estufa	θTDR
1	3,32	3%	1%	2%
2	4,12	6%	2%	6%
3	3,92	5%	1%	5%
4	4,37	6%	3%	7%
5	6,80	12%	8%	14%
6	9,32	17%	11%	18%

De maneira geral, para as microesferas de vidro, a equação de Ledieu et al. (1986) superestima os valores da umidade volumétrica, como o TDR, porém com alguns valores mais próximos do que os oferecidos pelo aparelho. Se colocado o intervalo de incerteza de <u>+</u>5%, como para equação de Topp et al. (1980), os pontos dos ensaios para as microesferas ficam localizados dentro do mesmo, como aponta o Gráfico 8.



GRÁFICO 8 - RESULTADOS OBTIDOS PARA TODOS OS MATERIAIS ENSAIADOS EM COMPARAÇÃO COM A EQUAÇÃO DE LEDIEU (1986)

No caso dos dois tipos de solo, a equação de Ledieu et al. (1986), como a "equação universal", subestima os valores da umidade volumétrica. Resultados apresentados na Tabela 9.

	AIKAVE	S DO MEI	ODO DA ESTUFA, EC	JUAÇAU PROPUSTA PU			
	AL. (1986) E A "EQUAÇÃO UNIVERSAL" PARA OS DOIS TIPOS DE SOLO						
			θLedieu et al.	θ calculado com			
	Medida	K	(1986)	estufa	θTDR		
	1	6,12	11%	16%	11%		
solo	2	4,12	6%	16%	6%		
amarelo	3	5,38	9%	21%	10%		
	4	11,64	21%	27%	23%		
	1	9,54	18%	19%	18%		
solo	2	5,10	8%	16%	9%		
vermelho	3	6,58	12%	23%	13%		
	4	15,40	27%	32%	28%		

TABELA 9 - COMPARAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS PARA A UMIDADE VOLUMÉTRICA ET

5.1.4 Tommaselli e Bacchi (2001)

Como exemplo de equação com solos brasileiros, foi feita a comparação dos resultados com a Equação de Tommaselli e Bacchi (2001), também avaliada por Hashiguti et al. (2011). Os resultados são apresentados nas Tabela 10.

TABELA 10 - APRESENTAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS PARA A UMIDADE VOLUMÉTRICA ATRAVÉS DO MÉTODO DA ESTUFA, TDR E EQUAÇÃO PROPOSTA POR TOMMASELLI E BACCHI (2001) (TB) PARA OS DOIS TIPOS DE SOLO

			θ calculado com		
	Medida	K	estufa	θTDR	θΤΒ
Solo	1	4,123	16%	6%	10%
SUIU	2	5,380	21%	10%	8%
amareio	3	11,640	27%	23%	19%
Solo	1	5,096	16%	9%	8%
SOID	2	6,581	23%	13%	8%
vermeino	3	15,397	32%	28%	25%

Apesar da granulometria dos solos ensaidos por Tommaselli e Bacchi (2001) terem quantidades próximas de areia e finos da pesquisa aqui descrita, ainda não é possível dizer que elas se adequam melhor aos materiais estudados.

Conclui-se que uma calibração específica para o material estudado fornecerá resultados muito mais confiáveis, afirmação apoiada por Coelho et al. (2006), que obtiveram resultados variados para cada tipo de solo e sonda ediferente da maioria das pesquisas. Estes pesquisadores obtiveram bons resultados para solos de textura mais fina e modelos como de Topp et al. (1980) e Ledieu et al. (1986) não se mostraram adequados.

5.1.5 Gonçalves et al. (2011)

Apesar de Topp et al. (1980) afirmarem que K é quase independente da densidade, textura e salinidade do solo, pode-se verificar a variabilidade de resultados para os diferentes materiais utilizados. As calibrações consideradas como tendo os resultados mais exatos, embora não considerem a análise de incerteza, são aquelas que individualizam o procedimento de calibração para cada tipo de solo

sob teste (GUIMARÃES et al., 2010). Com essa análise em mente, foi feita a comparação dos resultados com a equação de Gonçalves *et al.* (2011), que incorpora o valor da densidade do solo à calibração.

TABELA 11 - APRESENTAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS PARA A UMIDADE VOLUMÉTRICA ATRAVÉS DO MÉTODO DA ESTUFA, TDR E EQUAÇÃO PROPOSTA POR GONÇALVES ET AL. (2011) (G), PARA OS DOIS TIPOS DE SOLO

	Medida	K	θ calculado com estufa	θTDR	θG
Solo	1	4,123	16%	6%	8%
5010	2	5,380	21%	10%	11%
amareio	3	11,640	27%	23%	21%
Sala	1	5,096	16%	9%	10%
SOIU	2	6,581	23%	13%	13%
vermeino	3	15,397	32%	28%	26%

Hashiguti et al. (2011) não obtiveram bons resultados utilizando a equação de Topp para um nitossolo vermelho brasileiro. Os pesquisadores avaliaram três equações fornecidas para solos com características semelhantes e os melhores resultados foram obtidos com a de Gonçalves et al. (2011).

Hashiguti *et al.* (2011) reforçam, ainda, que a calibração que incorpora o valor da densidade em seus coeficientes apresenta melhor desempenho, concluindo que o modelo de Topp *et al.* (1980) e a equação de Tommaselli e Bacchi (2001) se mostraram completamente inadequados, apontando para o risco do emprego de um método desenvolvido para outro tipo de solo, em outras condições.

5.1.6 Medeiros et al. 2007

A Equação 23, apresentada por Medeiros *et al.* 2007, foi a de melhor ajuste para os pontos obtidos nesta pesquisa com os solos ensaiados.

O Gráfico 9 apresenta os resultados para os ensaios com o TDR e solos ensaiados com a equação de Medeiros *et al.* 2007 para menores profundidades.



GRÁFICO 9 - RESULTADOS OBTIDOS PARA OS SOLOS ENSAIADOS EM COMPARAÇÃO COM A EQUAÇÃO DE MEDEIROS *ET AL.* (2007)

Já a Tabela 12 faz a comparação para os resultados obtidos com o TDR e a calibração padrão, θ referência e as duas equações de Medeiros *et al.* 2007. Podese notar como os pontos para a equação (1) de Medeiros *et al.* (2007) estão mais próximos das umidades de referência do que as medidas do TDR.

TABELA 12 - APRESENTA	ÇÃO DO	OS VALORES OBTIDO	DS PARA A U	JMIDADE	VOLUMÉTR	ICA
ATRAVÉS DO MÉTODO DA	A ESTUF	A, TDR E EQUAÇÕES	PROPOSTAS	S POR ME	EDEIROS ET	AL.
2007, PARA OS DOIS TIPO	S DE SO	LO				
Medida	K	A referência	ATDR	(1)	(2)	

Medida	K	θ referência	θTDR	(1)	(2)
1	4,123	16%	6%	14%	24%
2	5,380	21%	10%	17%	29%
3	11,640	27%	23%	29%	47%
1	5,096	16%	9%	16%	28%
2	6,581	23%	13%	19%	34%
3	15,397	32%	28%	35%	53%
	Medida 1 2 3 1 2 3 3	Medida K 1 4,123 2 5,380 3 11,640 1 5,096 2 6,581 3 15,397	MedidaKθ referência14,12316%25,38021%311,64027%15,09616%26,58123%315,39732%	MedidaKθ referênciaθTDR14,12316%6%25,38021%10%311,64027%23%15,09616%9%26,58123%13%315,39732%28%	MedidaKθ referênciaθTDR(1)14,12316%6%14%25,38021%10%17%311,64027%23%29%15,09616%9%16%26,58123%13%19%315,39732%28%35%

Todas as equações anteriormente avaliadas apresentaram um desempenho ruim na análise estatística realizada, mesmo quando a equação de Topp et al. (1980) foi analisada para os pontos medidos com as microesferas de vidro.

Somente a equação de Medeiros et al. (2007) (1) apresentou um desempenho aceitável, com d no valor de 0,99 e um GDS de 0,16.

6 CONCLUSÕES

6 CONCLUSÕES E SUGESTÔES PARA PESQUISAS FUTURAS

Com os resultados dos ensaios e análise dos dados, podem ser verificadas as limitações no uso do TDR com a calibração através da "equação universal" para estimativa de umidade volumétrica em solos.

Analisando os resultados para os ensaios com as microesferas de vidro, foi constatado que os valores das umidades volumétricas medidas com o TDR ficaram, com exceção de um ponto, dentro do intervalo de confiança de mais ou menos 5%.

Já para os ensaios realizados com os dois tipos de solos, pode-se notar que os valores obtidos com o TDR foram subestimados. Isso também foi observado por outros pesquisadores, que afirmam que a "equação universal" não abrange solos com alto grau de intemperismo, como os encontrados nas regiões de clima tropical, típico do Brasil (SANTOS *et al.*, 2012) e tampouco os solos de textura fina (JACOBSEN; SCHJONNING, 1993), como os utilizados para os ensaios. Trintinalha *et al.* (2004) concluiram que o TDR está sujeito, além da densidade do solo, às características do contato solo-sonda, o que pode ser percebido através da variação dos resultados exerimentais obtidos nesta dissertação. Apesar de ser denominada "universal", para solos com baixa densidade ou altas concentrações de material orgânico, uma 'calibração' para solo o específico é preferida à utilização da mesma (FERRÉ; TOPP, 2002). Friedman (2005) também recomenda uma calibração em laboratório, uma vez que ainda não se obteve um modelo físico que pode ser dito como universal.

Apesar dos resultados experimentais não se ajustarem à calibração proposta por Topp *et al.* (1980), observa-se um bom ajuste entre os resultados (θTDR) para os dois solos utilizados, de mesma origem geológica, ainda que os mesmos possuam diferentes resultados de ensaios de caracterização, ou seja, para esse caso, especificamente, os valores de K não apresentam grande variação para diferentes tipos de solos.

Os resultados experimentais obtidos nesta dissertação confirmam a necessidade de uma calibração específica para cada tipo de solo utilizado quando há a necessidade de determinações precisas. Somente a equação de Medeiros et al. (2007) (1)

apresentou boa relação e desempenho aceitável em relação aos pontos medidos nesta pesquisa.

Não foi possível, devido ao número restrito de amostras, quantificar a influência da densidade nos valores de K. É sugerida a continuação da pesquisa para uma maior variedade de amostras, levando em consideração, além da densidade do solo, uma faixa de umidade volumétrica pré-estabelecida. Dessa forma, poderá ser feito o acompanhamento do comportamento da constante dielétrica do solo, desde seco à sua saturação, mantendo a densidade seca aparente constante.

Eliminando-se tais variáveis, acredita-se que seja possível constatar a verdadeira influência das características de solo utilizado na calibração do mesmo.

Também é sugerido estudar a relação de θ com \sqrt{K} , para verificar se esta apresenta melhores ajustes dos que os apresentados por θ com K.

REFERÊNCIAS

ALBINO, J.; GIRARDI, G; NASCIMENTO, K. A. In: MUEHE D. **Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro**, Programa de Geologia e Geofísica Marinha, cap. Espírito Santo, 2006.

American Society for Testing and Materials. **ASTM. D6780**: Standard Test Method for Water Content and Density of Soil In situ by Time Domain Reflectometry (TDR), Pennsylvania, United States, 2012.

ANDRADE, C. L. T.; COSTA, E. L.; ALBUQUERQUE, P. E. P.. Desenvolvimento e Calibração de Guias de Onda para TDR. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 1, p. 173-176, 2003.

ANISKO, T.; NESMITH, D. S.; LINDSTROM, O. M.. 1994. Time-domain reflectometry for measuring water content of organic growing media in containers. **HortScience**, v. 29(12), p. 1511-1513, 1994.

ASSIS,C. D. Avaliação de uma sonda TDR helicoidal para a estimativa do teor de umidade dos solos em campo e laboratório. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:** Solo – Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização. Rio de Janeiro,1986-a, 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo - Determinação do Limite de Liquidez.. Rio de Janeiro, 1984-a, 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508: Solo - Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, 1984-a, 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo -Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1984-a, 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984-a, 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9813:** Solo -Determinação da Massa Específica Aparente In Situ, com Emprego de Cilindro de Cravação. Rio de Janeiro, 1987-a, 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12007: Solo – Ensaio de Adensamento Unidimensional. Rio de Janeiro, 1990-a, 13p.

BELL, J. P. **Neutron Probe Practice**. Institute of Hidrology. Report 19, Third Edition, September 1987.

BITTELLI, M; SALVATORELLI, F; PISA, P. R.. Correction of TDR-based soil water content measurements in conductive soils. Department of AgroEnvironmental Science and Technology, University of Bologna, Italy, 2007.

BUCKMAN, H. O.; BRADY, N. C.. **The Nature and Properties of Soils**. Macmillan, New York, N. Y., 653 pp., 1922.

CALDERÓN, V. J. V. Interpretação dos resultados de ensaios TDR para a determinação do teor de umidade dos solos. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, 2010.

CATALDO, A; TARRICONE, L.; VALLONE, M.; CANNAZZA, G.; CIPRESSA, M.. TDR Moisture Measurement in Granular Materials: from the Siliceous Sand test case to the Applications for Agro-food Industrial Monitoring. **Computer Standards and Interface**, v. 32, p. 86-95, 2010. CECÍLIO, A, R.; SANTOS, D. B.. Metodologia de calibração de equipamento de TDR para determinação da umidade do solo. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 6, n. 3, p. 524-533, 2009.

COELHO, E. F.; VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A.; LEDO, C. A. S.. Desempenho de modelos de calibração de guias de onda acopladas a TDR e a multiplexadores em três tipos de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solos**, v. 30, p. 23-30, 2006.

DE LOOR, G. P.. Dielectric properties of heterogeneous mixtures containing water. J. Microwave Power, v. 3, p. 67-73, 1968.

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 v. GE-23, p. 35-46, 1985.

ELAIUY, M. L. C.; SATO, L. M.; VARALLO, A. C. T; SOUZA, C. F. Desenvolvimento e Avaliação de Sonda de TDR para o Manejo Racional da Água em Substratos Utilizados na Produção de Mudas Florestais. **Revista Ambiente & Água**, v. 4, n. 1, p. 117-131, 2009

EVETT, S. R.. Soil Water Measurement by Time Domain Reflectometry, **Encyclopedia of Water Science**, NewYork, pp. 1078–1082, 2003

EVETT, S. R.; PARKIN, G. W. Advances in Soil Water Content Sensing: The Continuing Maturation of Technology and Theory. **Vadose Zone Journal,** n.4, p. 986–991, 2005.

FERRÉ, P.A.; TOPP, G.C. Time Domain Reflectometry. Methods of Soil Analysis,Section 3.2.3.4, Part 4 — Physical Methods. p. 434–446. 2002.

FRIEDMAN, S. P.. Soil Properties Influencing Apparent Electrical Conductivity: a Review. **Computers and Electronics in Agriculture**. V. 46, p. 45-70, 2005.

GONÇALVES, A. C. A.; TRINTINALHA, M. A.; TORMENA, C. A.; FOLEGATTI, M. V. Influência da Densidade do Solo na Estimativa da Umidade em Um Nitossolo Vermelho Distroférrico, por Meio da Técnica de TDR. **Revista Brasileira Ci. Solo**, n.35, p. 1551–1559, 2011.

GUIMARÃES, P. L. O.; SANTANA, M. A. A.; OLIVEIRA, I. R.; THOMAZ JR., J. C. Proposta de Procedimento para Calibração de Sensores e Medidores de Umidade do Solo (Soil Moisture). **Congresso da Qualidade em Metrologia**, SP, Brasil, 2010. HALLIKAINEN, M. T.; ULABY, F.T.; DOBSON, M. C.; EI-RAYES, M.A.;WU, L.. Microwave dielectric behavior of wet soil—part I: Empirical models and experimental observation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. GE-23, n.1, p. 25-34, 1985.

HASHIGUTI, H. T.; HARA, A. T.; SANTOS, A. E.; TAVORE, R. V.; GONÇALVES, A. C. A Importância do Modelo de Calibração Empregado na Estimativa da Umidade de um Solo, com a Técnica da TDR. Encontro Internacional de Produção Científica, anais eletrônico. Paraná, Brasil, 2011

HEMMATI, S.; CUI, Y.J.; MARTIN, M.; VINCENT, M.; VANOUDHEUSDEN, E. Calibration of a water content capacitive probe. **Symposium international Sécheresse et constructions**, França, p. 143-148, 2008.

HUGH, B. G. Comparison of techniques for measuring the water content of soil and otherporous media. Thesis of Master of Science in Agriculture. University of Sidney - New SouthWaley. Australia. 1999.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – IAEA.Field Estimation of Soil Water Content – A Pratical Guide to Methods, Instrumentation and Sensors Technology. **Training Course series nº 30**.Viena, 2008.

ISHIZUKA, M.; MIKAMI, M.. Measurement of soil water content in a hyper-arid environment using time-domain reflectometry sensors. **Hydrological. Processes**, v. 19, p. 3911-3920, 2005.

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**, v. 151, p. 147-157, 1993.

JEROME, N. T. **Development of a Low-cost TDR-based Material Moisture Sensor.** Diploma Thesis, Institute of Industrial Data Communications Technology, 2009.

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

KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; MINELLA, J. P. G. Dielectric Constant Obtained From Tdr and Volumetric Moisture of Soils in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência e Solo**, v. 34, p. 649-658, 2010.

KENG, J.C.; TOPP, G.C.Measuring water content of soil columns in the laboratory: a comparison of gamma ray attenuation and TDR techniques. **Can. J. Soil Sci**. v. 63, p. 3–43, 1983.

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

KNOLL, M. D., A Petrophysical Basis for Ground Penetrating Radar and Very Early Time Electromagnetics: Electrical Properties of Sand-clay Mixtures. Tese (Doutorado). University of British Columbia, 1996.

LEDIEU, J.; RIDDER, P.; CLERCK, P.; DAUTREBANDE, S.. A method of measuring soil moisture by time-domain reflectometry. **J. Hydrol**. V. 88, p. 319–328, 1986.

LIN, C; LIN, C; DRNEVICH, V. TDR Method for Compaction Quality Control: Multi Evaluation and Sources of Error. **Geotechnical Testing Journal**, v. 35, no. 5, 2012. MARINHO, F. A. M. **Os Solos Não Saturados: Aspectos Teóricos, Experimentais e Aplicados.** Texto apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para o Concurso de Livre-Docência na especialidade "Geomecânica" do Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, 2005.

MAROUFPOOR, I.; EMAMGHOLIZADEH, S; TORABI, H; BEHZADINASAB, M.. Impact of Soil Texture on the Calibration of TDR for Water Content Measurement. **Journal of Applied Sciences**, v. 9, no. 16, p. 2933-2949, 2009.

MEDEIROS, J. D. F.; CASTRO, N.; GOLDENFUM, J. A.; CLARKE, R. T.. Calibração de Sondas do TDR em um Latossolo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 2, p. 19-25, 2007.

MOJID, M. A.; CHO H.. Evaluation of the time-domain reflectometry (TDR)-measured composite dielectric constant of root-mixed soils for estimating soil-water content and root density. **Journal of Hydrology**, v. 295, p. 263-275, 2004.

MORAES, M. L.. Estacas de Compactação para Melhoramento de Solos Arenosos Fofos e Uso de Penetrômetro Dinâmico Pesado na Avaliação dos Resultados (Dissertação de Mestrado), 2008.

NADLER, A.; GAMLIEL, A.; PERETZ, I. Practical Aspects of Salinity Effect on TDR-Measured Water Content: A Field Study. **Soil Science Soc. Am. Journal**, v. 63, p. 1070-1076, 1999.

OKRASINSKI, T. A.; KOERNER, R. M.; LORD JR, A. E.. Dielectric Constant Determination Of Soils At L Band Microwave Frequencies, **Geotechnical Testing Journal**, v. 1, n 3, p. 134-140, 1978.

PEREIRA, S. **Tecnologia da reflectometria no domínio do tempo para a medição da umidade do solo**. Dissertação Mestrado, Viçosa: UFV,. 86p., 2001.

PEREIRA, S.; OLIVEIRA FILHO, D.; MANTOVANI, E. C.; RAMOS, M. M.; MARTINS,

J. H.. Reflectometria no domínio do tempo na determinação do conteúdo de água no solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, no.2, p.306–314, 2006.

PIRES, L. F. **Tomografia computadorizada, atenuação de raios gama e análise micromorfológica na avaliação de alterações na estrutura e retenção de água pelo solo.** Tese (Doutorado em Energia na Agricultura e no Ambiente), Universidade de São Paulo, Piracicaba, 229 p., 2006.

PIRES, L. F.; ROSA, J. A.; TIMM, L. C.. Comparação de métodos de medida da densidade do solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**. Maringá, v.33, n. 1. P 161-170, 2011.

PONIZOVSKY, A. A.; CHUDINOVA, S. M.; PACHEPSKY, Y. A.. Performance of TDR calibration models as affected by soil texture, **Journal of Hydrology**, v. 218, p. 35-43, 1999.

PUMPANEN, J.; ILVESNIEMI, H. Calibration of time domain reflectometry for forest soil humus layers. **Boreal Environ. Res**., v. 10, p. 589-595, 2005.

RANGEL, D. M. F. V.; AQUINO, L. H. M.; VARANDA, A. R. F. Serra 21 – Estudos Temáticos V. 7. Meio Ambiente e Humanização da Cidade. Serra – ES, 2000.

REGALADO, C. M. A physical interpretation of logarithmic TDR calibration equations of volcanic soils and their solid fraction permittivity based on Lichtenecker's mixing formulae. **Geoderma** 123, 41-50, 2004.

ROBINSON, D. A.; BELL, J. P.; BATCHELOR, C. H. Influence of iron and titanium on water content determination by TDR. Symposium: Time Domain Reflectometry Applications in Soil Science held at the Research Centre Foulum, Denmark. Proceedings. Danish Institute of Plant and Soil Science, p.63-70,1994.

ROBINSON, D.A.; JONES, S.B.; WRAITH, J.M.; OR, D., FRIEDMAN, S.P.. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry. **Vadose Zone** J. 2, p. 444–475, 2003.

ROTH, K.; SCHULIN, 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, p. 2267-2273,1990.

SAARENKETO, T.. Electrical Properties Of Water In Clay And Silty Soils. J. Of Applied Geophysics, v. 40, pp. 73-88, 1998.

SANTOS, M. R.; MARTINEZ, M. A.; MATOS, A. T.; OLIVEIRA, R. A.; ZONTA, J. H. Uso da Reflectometria no Domínio do Tempo Para Avaliar a Distribuição de Nitrato em Colunas de Solos Fertirrigados. **Revista Ambiente & Água**, v. 4, no. 3, p. 67-81, 2009.

SANTOS, D. B.; CECÍLIO, R. A.; COELHO, E. F.; BATISTA, R. O.; SILVA, A. J. P.. Calibração de TDR: desempenho de alguns métodos e equações de calibração. **Revista Agrarian,** v.5, n.16, p.131-139, 2012.

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.

SOUZA, C. F., MATSURA, E. E.; TESTEZLAF, R.. **Application of the TDR technique in tropical soil.** Second Int. Symposium and workshop on time domain reflectometry for innovative geotechnical applications, in CD, 2001. TODOROFF, P.; LANGELLIER, P. Comparison of empirical and partly deterministic methods of time domain reflectometry calibration, based on a study of two tropical soils. **Soil & Tillage Research**, v.45, p.325-340, 1998.

TOMMASELLI, J.T.G.; BACCHI, O.O.S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade dos solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.1145-1154, 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.; YANUKA, M.; ZEBCHUK, W. D.; ZEGELIN, S. Determination of Electrical Conductivity Using Time Domain Reflectometry' Soil and Water Experiments in Coaxial Lines. **Water Resource Research**, V.24, no 7, p. 945-952, 1988.

TRINTINALHA, M.A.; GONÇALVES, A.C.A.; TORMENA, C.A.; COSTA, A.C.S.; FOLEGATTI, M.V.; FREITAS, P.S.L. & REZENDE, R. Comparação dos sistemas TDR e ECHO para medida de umidade, em um solo argiloso e em areia. **Acta Scientiarum: Agronomy**, V. 26, no 3, p. 353-360, 2004.

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, no 10, p. 2417-2421, 1997.

ZAZUETA, F.S.; XIN, J. Soil moisture sensors. University of Florida, 1994.

APÊNDICE 1

APÊNDICE 1 - EQUAÇÕES DE CALIBRAÇÃO PARA OS MATERIAIS DESTE ESTUDO

Como as amostras ensaiadas não foram em quantidade suficiente para propor equações de calibração para os materiais estudados, as equações encontradas para os pontos medidos nesta pesquisa são apresentadas neste Apêndice.

Com o valor obtido pela medição com o TDR, foi encontrado o valor da constante dielétrica aparente (K) e construído um gráfico para gerar a equação de relação entre K e a umidade volumétrica dada pela metodologia utilizando a estufa.

Foi usada a técnica da regressão linear para ajustar os pontos a uma equação polinomial do terceiro grau, ainda que algumas das equações geradas apresentem o coeficiente nulo para o termo do terceiro grau, ou mesmo bem próximo de zero.

A Tabela 6 - 1 reúne os resultados da primeira etapa de ensaios: são os coeficientes da equação obtida para as microesferas de vidro, juntamente com os coeficientes da "equação universal" para referência. O coeficiente de correlação obtido para a equação apresentada foi ótimo, ou seja, R² igual a 1.

TABELA 6 - 1 COEFICIENTES ENCONTRADOS PARA A CALIBRAÇÃO PROPOSTA PARA A UMIDADE VOLUMÉTRICA VERSUS CONSTANTE DIELÉTRICA

MATERIAL	COEFICIENTES DA EQUAÇÃO					
	a1	a2	a3	a4		
Topp et al. (1980)	-0,053	0,0292	0,001	0,000043		
esferas de vidro	1,986	-1,399	0,307	-0,02		

As equações com os coeficientes apresentados na Tabela 6-1 em diante têm o formato:

```
\theta = a1 + a2K + a3K2 + a4K3 (6-1)
```

Com a segunda etapa de ensaios, pode-se comparar as equações obtidas para a calibração através da relação entre seus coeficientes com a "equação universal".

Para a etapa 2 foi encontrado um valor de 0,99 para R², considerado um ótimo coeficiente de correlação. Já os ajustes das equações sem os pontos de incerteza fornecem o valor unitário para o coeficiente de correlação.

	MICROESFERAS DE VIDRO							
ENSAIO		EQUAÇÃO						
	a1	a2	a3	a4				
Topp et al. (1980)	-0,053	0,0292	0,001	0,0000043				
Etapa 1	1,986	-1,399	0,307	-0,02				
Etapa 1 sem o								
terceiro ponto	-0,128	0,05	-0,002	0				
Etapa 2	0,0235	-0,033	0,01	0,001				
Etapa 2, somente 3								
últimos pontos	-0,105	0,039	-0,002	0				

TABELA 6 - 2 COEFICIENTES ENCONTRADOS PARA A CALIBRAÇÃO PROPOSTA PARA A UMIDADE VOLUMÉTRICA VERSUS CONSTANTE DIELÉTRICA PARA AS

Com os dados obtidos através dos ensaios em laboratório com os dois tipos de solo, pode-se, novamente através da regressão linear, gerar equações de calibração para os mesmos. Percebe-se que os valores dos coeficientes das equações apresentadas na Tabela 6-3, encontradas para os dois tipos de solo, estão mais próximos uns dos outros do que dos valores dados por Topp et al. (1980), mesmo com solos de características distintas.

Adicionando o resultado da primeira etapa de ensaios para os dois tipos de solo, obtém-se curvas diferenciadas para a calibração dos solos. Diferente dos outros resultados para as curvas de ajustes dos solos, nesse caso, o coeficiente de concordância R² não possui valor unitário para o solo amarelo: R² encontrado para a equação de ajuste com os dados das duas etapas de ensaios com o solo amarelo foi de 0,96.

MATERIAL	EQUAÇÃO					
	a1	a2	a3	a4		
Topp et al. (1980)	-0,053	0,0292	0,001	0,0000043		
solo amarelo (Etapa 2)	-0,087	0,077	-0,004	0		
solo vermelho (Etapa 2)	-0,200	0,09	-0,004	0		
solo amarelo (Etapas 1 e 2)	-0,181	0,107	-0,006	0		
solo vermelho (Etapas 1 e 2)	-0,350	0,151	-0,011	0,0003		

TABELA 6 - 3 - COEFICIENTES ENCONTRADOS PARA A CALIBRAÇÃO PROPOSTA PARA A UMIDADE VOLUMÉTRICA VERSUS CONSTANTE DIELÉTRICA

Os coeficientes para as duas calibrações empíricas obtidas, para os dois solos estudados, apresentam variações pouco significativas, apesar das diferenças observadas nas propriedades físicas dos solos ensaiados. Utilizando-se todos os dados obtidos nos ensaios com os dois tipos de solo e, posteriormente, para as microesferas de vidro, foram encontradas as Equações 6-2 e 6-3, de calibração dos solos e das microesferas, respectivamente.

$$\theta = 9.10-5 \text{ K}3 - 0.0021 \text{ K}2 + 0.025 \text{ K} + 0.0941$$
 (6-2)

 $\theta = 0,0002K3 - 0,0068K2 + 0,0742K - 0,1729 \tag{6-3}$

Como não foram retirados os pontos de incerteza, os coeficientes de correlação das equações apresentaram um valor mais distante do unitário, sendo 0,78 para os solos e 0,82 para as microesferas.

Essa dificuldade de se encontrar uma equação padrão já havia sido verificada por vários pesquisadores, devida, em grande parte, à composição atípica de alguns solos, como por exemplo, com alto teor de finos ou com minerais ferrosos (MOJID; CHO, 2004; PUMPANEN; ILVESNIEMI, 2005; PEREIRA et al., 2006; CECÍLIO; SANTOS, 2009; CATALDO et al., 2010).

Outro fator importante, já citado, é o fato de que, ao se desconsiderar a parte imaginária da constante dielétrica, pode-se gerar valores superestimados para solos com alta condutividade, por exemplo (ROTH et al.,1990; BITTELLI, 2007).

Os Gráficos 6-1 e 6-2 apresentam as curvas das Equações 6-2 e 6-3 respectivamente.

GRÁFICO 6 - 1 GRÁFICOS DE UMIDADE VOLUMÉTRICA VERSUS CONSTANTE DIELÉTRICA OBTIDO COM OS DADOS DAS ETAPAS 1 E 2 DOS ENSAIOS COM OS DOIS SOLOS ESTUDADOS.



Fonte: Autor





Fonte: Autor

Os coeficientes encontrados para as equações geradas, com os pontos encontrados nos ensaios, corroboram para a afirmação que, como citados por Yu *et al.* (1997), Tommaselli *et al.* (2001) e Trintinalha *et al.* (2004), não existe a necessidade da curva de calibração ser um polinômio do terceiro grau.