

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**Cauê Stocchi Somensi**

**Desenvolvimento de sistema de baixo custo para medida do  
teor de umidade em solos não saturados baseado na técnica  
de Reflectometria no Domínio do Tempo – TDR**

Vitória-ES

2017

**Cauê Stocchi Somensi**

**Desenvolvimento de sistema de baixo custo para medida do  
teor de umidade em solos não saturados baseado na técnica  
de Reflectometria no Domínio do Tempo – TDR**

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil da  
Universidade Federal do Espírito Santo,  
como parte dos requisitos para a obtenção  
do grau de Mestre em Engenharia Civil, na  
área de concentração em Geotecnia.

Orientadores:

Prof. Dra. Kátia Vanessa Bicalho

Prof. Dr. Edmundo Rogério Esquivel  
(EESC/USP)

Vitória-ES

2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Setorial Tecnológica,  
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)  
Sandra Mara Borges Campos – CRB-6 ES-000593/O

---

S693d Somensi, Cauê Stocchi, 1985-  
Desenvolvimento de sistema de baixo custo para medida do  
teor de umidade em solos não saturados baseado na técnica de  
Reflectometria no Domínio do Tempo – TDR / Cauê Stocchi  
Somensi. – 2017.  
150 f. : il.

Orientador: Kátia Vanessa Bicalho.  
Coorientador: Edmundo Rogério Esquivel.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade  
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Solos – Umidade. 2. Mecânica do solo. 3. Engenharia  
geotécnica. 4. Software – Desenvolvimento. 5. Solos não  
saturados (Engenharia Civil). 6. Técnica TDR (Reflectometria no  
Domínio do Tempo). I. Bicalho, Kátia Vanessa. II. Esquivel,  
Edmundo Rogério. III. Universidade Federal do Espírito Santo.  
Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 624

---

# UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

## DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA MEDIDA DO TEOR DE UMIDADE EM SOLOS NÃO SATURADOS BASEADO NA TÉCNICA DE REFLECTÔMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO – TDR

**Cauê Stocchi Somensi**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Estruturas.

Aprovada no dia **28 de julho de 2017** por:



Profa. Dra. Kátia Vanessa Bicalho  
Doutora em Engenharia Civil  
Orientadora - UFES



Prof. Dr. Edmundo Rogério Esquivel  
Doutor em Engenharia Civil  
Coorientador - USP  
Por meio de vídeo conferência



Prof. Dr. Elcio Cassimiro Alves  
Doutor em Engenharia e Tecnologia Espaciais  
Membro Interno - UFES



Prof. Dr. Heraldo Luiz Giacheti  
Doutor em Geotecnia  
Membro Externo - UNESP  
Por meio de vídeo conferência

**Vitória – ES, julho de 2017**



## DEDICATÓRIA

À meus pais, que sempre me mostraram a importância  
do amor, da educação e da disciplina.

À minha esposa, pelo amor e suporte, sem os quais  
este trabalho não seria possível.

## AGRADECIMENTOS

À Professora Kátia V. Bicalho pela orientação e amizade, fornecendo constante apoio e suporte ao longo de todas as etapas do desenvolvimento de trabalho.

Ao Professor Edmundo R. Esquivel pelo acolhimento, orientação e incentivo, alcançando todo recurso possível e promovendo contatos de grande valia para este trabalho.

Ao Professor Heraldo Giacheti, pela amizade e valiosos ensinamentos ao longo de nossas conversas e da disciplina de ensaios *in situ*.

Ao Professor Elcio C. Alves pelas contribuições e sincero incentivo.

Ao Dr. Giancarlo Tosin e família, pela orientação, conselhos e amizade, assim como pela paciência e compreensão, acolhendo-me em vosso lar durante todo período deste trabalho.

Ao Dr. Carlos Vaz, por sua atenção, apoio e ideias, compartilhando tantos anos de experiência com a técnica TDR.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC da Universidade Federal do Espírito Santo pela oportunidade, assim como a todos os demais professores e funcionários do Mestrado de Engenharia Civil.

À toda equipe do Departamento de Geotecnia da EESC/USP por seu acolhimento e ajuda. E em especial à Oscar dos Santos por compartilhar sua experiência com a técnica TDR, à José Luís Guerra e Herivelto M. dos Santos pela disposição constante em ajudar e fornecer recursos necessários.

Aos amigos e ex-colegas da Companhia Vale, pelo apoio e incentivo, em especial à Antônio L. Cochetto, Gerardo Rodriguez, Geremias Loyola e Maxwell Angeli.

Aos meus pais e ao meu irmão, cujo apoio, incentivo e carinho, confortaram nos momentos mais difíceis, motivando e inspirando para que eu vencesse mais esta etapa da vida.

À minha querida esposa, que de forma compreensiva e amorosa, apoiou e suportou em todos os momentos da minha trajetória de tensões.

## RESUMO

A determinação do teor de umidade é importante nas etapas de projeto e construção de obras geotécnicas. A técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR – *Time Domain Reflectometry*) destaca-se entre os diversos métodos para a estimativa do teor de umidade em solos não saturados. Ensaio TDR apresentam resultados semelhantes àqueles determinados através de ensaios gravimétricos em estufa, com a vantagem de propiciar medições instantâneas não destrutivas. Além do mais, possibilitam a portabilidade e embarcação dos sistemas. No entanto, devido às suas características de construção e metodologia de trabalho, considera uma grande quantidade de variáveis, tornando-se complexa e sujeita a resultados imprecisos. Atualmente, é comum a necessidade de investimentos elevados para aquisição de equipamentos e softwares comerciais. O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema TDR de baixo custo, incluindo um software de controle e análise de ensaios. Este software apresenta funções como a tomada de medidas por agendamento, estimativa automática da condutividade e do teor de umidade. Essas estimativas são feitas através de equações de calibração que podem ser fornecidas ao software. Também foram desenvolvidas sondas TDR para trabalharem integradas ao sistema proposto, fabricadas com a tecnologia de impressão 3D. Utilizando soluções com diferentes concentrações de ácido acético, foram realizados ensaios comparativos entre o sistema TDR de baixo custo e o sistema TDR formado pelo equipamento TDR100 e o software PC-TDR, desenvolvidos pela companhia Campbell Scientific. Com as devidas calibrações, o sistema proposto pode ser usado de forma eficiente e confiável na estimativa do teor de umidade, apresentando um erro padrão médio da estimativa da ordem 1%. O sistema TDR mostrou-se promissor e poderá estimular o uso da técnica TDR, aumentando as alternativas de equipamentos para ensaios geotécnicos em solos não saturados.

Palavras-chave: Reflectometria no domínio do tempo, equipamento de baixo custo, solos não saturados, teor de umidade.

## **ABSTRACT**

The determination of moisture content is important in the design and construction stages of geotechnical works. The TDR - Time Domain Reflectometry technique stands out among the several methods for estimating the moisture content in unsaturated soils. The TDR tests present similar results to those determined through of the standard gravimetric method, with the advantage of promoting instantaneous measurements with non-destructive characteristics. In addition, they enable the portability and systems embedding. However, due to the its construction characteristics and working methodology, it considers a large number of variables, becoming complex and subject to inaccurate results. Currently, it is common the need for high investments for the acquisition of hardware and commercial software. The aim of the present work is the development of a low cost TDR system, including a control and analysis software. Features such as measurements by scheduling, automatic estimation of conductivity and moisture content. These estimates are made through calibration equation that can be provided to the software. Customized TDR probes have also been developed to work integrated with the proposed system, being manufactured with the 3D printing technology. Using solution with different concentrations of acetic acid, comparative tests were performed between the low cost TDR system and the TDR system formed by the TDR100 device and PC-TDR software, developed by Campbell Scientific Inc. The results show that with proper calibrations, the proposed system can be used for soil water content estimation in an efficiently and reliably way, with a standard error of the estimate of around 1%. The low cost TDR system was promising and could stimulate the use of TDR technique, increasing the alternatives of geotechnical testing apparatus in unsaturated soils.

**Keywords:** Time Domain Reflectometry, low cost device, unsaturated soils, soil water content.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Diagramas de fases, (a) sistema rigoroso e (b) diagrama trifásico simplificado .....	31
Figura 2.2 - Tensões na água .....	32
Figura 2.3 - Equipamento <i>Speedy Test</i> , modelo atual (esquerda) e modelo antigo (direita).....	35
Figura 2.4 - Sensores capacitivos, (a) EasyAG, (b) EnviroSCAN, (c) SMEC 300 .....	37
Figura 2.5 - Sensores resistivos, (a) WaveShare, (b) Watermark 200 SS, (c) WET-2 .....	38
Figura 2.6 - Processo de obtenção de parâmetros para o cálculo da umidade gravimétrica.....	39
Figura 2.7 - Sonda de Nêutrons e elementos constituintes.....	41
Figura 2.8 - Equipamento de RMN desenvolvido para medição de porosidade e teor de umidade.....	43
Figura 2.9 - Um dos primeiros equipamentos TDR (HP 1415A), composto pela junção de um gerador de sinal e um osciloscópio (HP 140A).....	45
Figura 2.10 - Sinal TDR ou eco típico de um ensaio TDR.....	46
Figura 2.11 – Métodos para determinação de delta tempo, conhecido como distância aparente $L_a$ , (a) Método das tangentes, (b) Método dos picos, (c) Método das linhas divergentes e (d) Método das tangentes alternativo.....	49
Figura 2.12 - Diagrama dos componentes de um sistema TDR .....	51
Figura 2.13 - Diagrama funcional de um Sistema TDR .....	51

Figura 2.14 - Configurações globais da parte de análise do software WinTDR .....	55
Figura 2.15 - Janela principal e janela menor do software WinTDR.....	55
Figura 2.16 - Software TAQC, (esquerda) diagrama de funções e (direita) janelas do software .....	57
Figura 2.17 - Interface do software PMTDR-SM para uso <i>in situ</i> .....	59
Figura 2.18 - Interface do software PMTDR para uso laboratório .....	60
Figura 2.19 - A partir da esquerda, sondas com 2, 3, 4 e 7 hastes e sonda coaxial .....	61
Figura 2.20 - Sondas com perfil circular, (a) Helicoidal miniaturizada, (b) Mista de hastes acopladas e (c) Helicoidal CPT.....	61
Figura 2.21 – Equipamentos TDR comerciais, (a) TDR100; (b) Fieldscout TDR100; (c) Mobile TDR; (d) 1502C; (e) Trime-FM, IMKO; e (f) SM-USB, IMKO .....	64
Figura 3.1 - Osciloscópio testador de cabos 1502C, marca Tektronix.....	69
Figura 3.2 - Osciloscópio USB – modelo MSO-19, marca Link Instruments.....	70
Figura 3.3 - Osciloscópio testador de cabos TDR100, marca Campbell Scientific. ....	71
Figura 3.4 - Impressora 3D para prototipagem das sondas TDR.....	71
Figura 3.5 - Computador Intel, modelo <i>Computer Stick</i> - CS125.....	72
Figura 3.6 – Sistema de alimentação, (esquerda) conversor DC-DC e (direita) baterias de 8,4 Volts. ....	73
Figura 3.7 - Sondas TDR de 200 milímetros, (esquerda) 7 hastes e (direita) 3 hastes .	73
Figura 3.8 - Curva de compactação .....	76

Figura 3.9 - Interface do software WINTDR versão (6.1) .....	77
Figura 3.10 - Janela principal do software MSO-19.....	77
Figura 3.11 - Janela principal do software PC-TDR .....	78
Figura 3.12 - Janela principal do software VirtualBox .....	79
Figura 3.13 - Separação dos sacos de amostra com 15 Kg .....	83
Figura 3.14 - Umedecimento das amostras de solo .....	84
Figura 3.15 - Amostras de solo lacradas em processo de homogeneização .....	84
Figura 3.16 - Procedimento de compactação das amostras em volume conhecido.....	85
Figura 3.17 - Equipamentos e a amostra de solo a ser ensaiada .....	86
Figura 4.1 - Workflow de sistema TDR típico e seus subsistemas.....	89
Figura 4.2 - Método das tangentes aplicado na primeira e terceira inflexão .....	92
Figura 4.3 - Equações de correlação “a – b” (a) e “c – d” (b) .....	93
Figura 4.4 - Umidade gravimétrica com o equipamento MSO-19 (superior) e 1502C (inferior) .....	93
Figura 4.5 - Interface planilha de análise para validação MSO-19.....	94
Figura 4.6 - Casos de uso remoto (telemetria) e local .....	95
Figura 4.7 - Modulação da interface do software EASYTDR .....	96
Figura 4.8 - Visualização das opções do menu superior e inferior .....	96

Figura 4.9 - Janela principal com a lista de medidas realizadas aberta, aba “Main” e botão “Test list” .....	97
Figura 4.10 - Janela "Import Single Measure" .....	98
Figura 4.11 - Janela "Import Multiple Measures" .....	98
Figura 4.12 - Janela para realização e análise de medidas, aba “Main” e botão “Single Measure” .....	99
Figura 4.13 - Janela “New measure” após a realização de um ensaio, são apresentados o gráfico com sinal TDR, e as medidas automáticas realizadas.....	99
Figura 4.14 - Janela para realização de medidas sequenciais, aba “Main” e botão “Multiple Measures” .....	101
Figura 4.15 - Gerenciar de tarefas, lado esquerdo da janela principal, botão “Scheduled Tasks” .....	101
Figura 4.16 - Janela para realização de análise em medidas previamente realizadas, aba “Analysis Lab” .....	102
Figura 4.17 - Menu de funções atribuído a cada coluna da planilha.....	103
Figura 4.18 - Janela para determinação da temperatura no momento das medidas.	104
Figura 4.19 - Etapas de processo para aplicação de equações customizada .....	105
Figura 4.20 - Janela para determinação das características da sonda utilizada nos ensaios.....	105
Figura 4.21 - Aba "Analysis Lab" e seus quatro grupos de funções .....	106
Figura 4.22 - Função "Column Bar Graph" aplicada a coluna Area .....	106



Figura 4.23 - Função " <i>Trace Derivatives</i> " aplicado ao sinal TDR da medida.....	107
Figura 4.24 - Função " <i>Trace Control Graph</i> " aplicado ao sinal TDR da medida, com foco de zoom do sinal TDR conforme a função " <i>Measure Detail Trace</i> " .....	107
Figura 4.25 - Função " <i>Measure Delta Time Zoom</i> " aplicada a o sinal TDR da medida	108
Figura 4.26 - Função " <i>Measure Full Trace</i> " aplicada ao sinal TDR da medida .....	108
Figura 4.27 - Função de Pre-Calibração - Etapa 1 " <i>Intersection Box</i> " .....	109
Figura 4.28 - Função de Pre-Calibração - Etapa 2 " <i>Input parameters</i> " .....	109
Figura 4.29 - Função de Pre-Calibração - Etapa 3 " <i>Poynomial Regression</i> " .....	110
Figura 4.30 - Janela " <i>Build</i> ", criação de equações .....	111
Figura 4.31 - Janela " <i>Simulate</i> " possibilita a simulação de equações criadas na aba " <i>Build</i> " .....	112
Figura 4.32 - Detalhe do resultado do botão " <i>Validate</i> " .....	112
Figura 4.33 - Aba " <i>Describe</i> " possibilita a descrição das informações básicas da equação .....	113
Figura 4.34 - Aba " <i>Check / Save</i> " possibilita a visualização geral das informações para posterior inserção no banco de dados do sistema.....	113
Figura 4.35 - Janela referente ao botão " <i>Equation List</i> " onde são apresentadas as equações salvas .....	114
Figura 4.36 - Ilustração 3D do projeto da sonda " <i>A</i> " .....	116

Figura 4.37 - Processo de impressão 3D (FDM) da sonda “A”, (a) primeira camada impressa, (b) 50% das camadas impressas, (c) lado interno da peça e (d) lado externo da peça .....	117
Figura 4.38 - Sonda “A” finalizada com as hastes e cabo de 10 metros .....	117
Figura 4.39 - Ilustração 3D do projeto da sonda “B” .....	118
Figura 4.40 - Sonda “B” finalizada com as hastes e cabo de 10 metros .....	118
Figura 4.41 - Projeto esquemático do multiplexador experimental. Detalhe em amarelo (canto inferior esquerdo) circuito fechado realizando a transferência do pulso eletromagnético entre o ponto central e o primeiro relay inferior.....	119
Figura 4.42 - Multiplexador experimental com dois canais de medidas.....	120
Figura 4.43 - Arranjo do sistema TDR de baixo custo.....	121
Figura 4.44 – Medições com o sistema Campbell Scientific, constante dielétrica (esquerda) e condutividade elétrica (direita) do ácido acético em função da adição de água deionizada .....	122
Figura 4.45 - Sobreposição de medidas com equipamento TDR100 e o software PC-TDR em diferentes concentrações de ácido acético.....	123
Figura 4.46 - Sobreposição do sinal TDR para sondas "A" (superior) e sonda “B” (inferior) do Sistema TDR de baixo custo .....	124
Figura 4.47 - Linhas e região de interesse dos ensaios TDR.....	125
Figura 4.48 - Resultados entre os diferentes métodos para determinação de “Ka”, sonda “A” .....	127

Figura 4.49 - Comparação entre os métodos para determinação de “Ka”, sonda “B” .....	129
Figura 4.50 - Condutividade elétrica para as sondas "A" e "B" .....	130
Figura 4.51 - Sobreposição de sinais com a sonda “A” na solução de ácido acético. ....	130
Figura 4.52 - Sobreposição de sinais com a sonda “A” multiplexada na solução de ácido acético.....	131
Figura 4.53 - Sinal TDR com e sem o multiplexador para ambas a sondas de 400 mm construídas .....	131
Figura 4.54 - Sobreposição de sinais com a sonda “B” na solução de ácido acético, em vermelho: 0 (zero), 6.939, 13.877, 20.816 e 27.754 mols (g/L) de água .....	132
Figura 4.55 - Sobreposição de sinais com a sonda “B” multiplexada na solução de ácido acético.....	132
Figura 4.56 - Umidade volumétrica para a Sonda "A" .....	133
Figura 4.57 - Umidade volumétrica para a Sonda "B" .....	133

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Análise estatística dos métodos para determinação de $L_a$ .....	50
Tabela 2.2 – Resultados de caracterização .....	62
Tabela 2.3 - Classificação de sistemas TDR disponíveis no mercado .....	63
Tabela 4.1 - Alterações no parâmetros básicos em função do uso do multiplexador	120
Tabela 4.2 - Concentração da solução e valores medidos com o Sistema Campbell Scientific.....	122
Tabela 4.3 - Determinação da constante dielétrica aparente - $K_a$ – Sonda “A” .....	127
Tabela 4.4 - Determinação da constante dielétrica aparente - $K_a$ - Sonda “B” .....	128
Tabela 4.5 - Erro padrão médio para as medidas de umidade volumétrica .....	134

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Tipos de técnicas utilizadas para determinar a umidade em solos.....	44
Quadro 4.1 - Resultado resumido da análise DFMEA – TDR.....	90
Quadro 4.2 - Características das sondas customizadas .....	115

## LISTA DE ABREVIATURAS e SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARS	<i>Agricultural Reserch Service</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BNC	<i>Bayonet Neill and Concelman</i>
CPT	<i>Cone Penetration Test</i>
DC-DC	<i>Direct Current - Direct Current</i>
DFMEA	<i>Design Failure Mode and Effects Analysis</i>
D3	<i>Data Driven Documents</i>
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FMEA	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i>
IABT	<i>Intersection Area Box and Trace</i>
IDT	<i>Indiana Departament of Transportation</i>
JTRP	<i>Joint Transportation Research Program</i>
MSO	<i>Mixed Signal Oscilloscope</i>
NPR	Número de Prioridade de Risco
PCW	<i>Pre-calibration Wizard</i>
PET	Tereftalato de polietileno
PLA	Ácido Polilático
PVC	Policloreto de vinila

REPRAP	<i>Replication Rapid-Prototyper Project</i>
RMN	Ressonância Magnética Nuclear
SPT	<i>Standard Penetration Test</i>
SVG	<i>Scalable Vector Graphics</i>
TDR	<i>Time Domain Reflectometry</i>
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
USP	Universidade de São Paulo

## LISTA SÍMBOLOS

$K_a$	Constante dielétrica aparente
$\gamma$	Peso específico
$L$	Comprimento das hastes das sondas TDR
$K$	Constante dielétrica
$c$	Velocidade da luz no vácuo ( $3 \times 10^8$ m/s)
$\theta$	Teor de umidade volumétrico
$w$	Teor de umidade gravimétrico
$a, b, c, d, f, g$	Constantes de calibração do método “ <i>One Step Method</i> ”
$EC_b$	<i>Electrical Conductivity Bulk</i> (Condutividade elétrica)
dS	deciSiemens (unidade para condutividade elétrica)
$V_p$	Velocidade de propagação de uma onda eletromagnética
MHz	Megahertz
GHz	Gigahertz
$\mu s$	Microsegundos
ns	Nanoegundos
Mpa	Megapascal
Atm	Atmosfera padrão
Psi	Libra força por polegada
Hz	Hertz (vezes por segundo)
S	Grau de saturação



$V_a$	Volume de água
$V_v$	Volume de vazios
$L_p$	Comprimentos das hastes das sondas TDR
$V_0$	Voltagem inicial
$V_f$	Voltagem final
$L_a$	Distância aparente
$m_w$	Massa de água
$m$	Massa de solo natural
$m_d$	Massa de solo seca
$m_r$	Massa do recipiente
$\rho_d$	Peso específico do solo seco
$\rho_a$	Peso específico da água
$dt$	<i>Delta time</i>

# Sumário

<i>DEDICATÓRIA</i> .....	4
<i>AGRADECIMENTOS</i> .....	5
<i>RESUMO</i> .....	6
<i>ABSTRACT</i> .....	7
<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i> .....	8
<i>ÍNDICE DE TABELAS</i> .....	15
<i>ÍNDICE DE QUADROS</i> .....	16
<i>LISTA DE ABREVIATURAS e SIGLAS</i> .....	17
<i>LISTA SÍMBOLOS</i> .....	19
<b>1</b> <i>Introdução</i> .....	24
1.1 <i>Objetivos</i> .....	26
1.2 <i>Métodos do trabalho</i> .....	27
1.3 <i>Organização do trabalho</i> .....	28
<b>2</b> <i>O Teor de Umidade nos Solos Não Saturados e os Métodos para sua</i> <i>Determinação</i> .....	29
2.1 <i>O teor de umidade nos solos não-saturados</i> .....	31
2.2 <i>Métodos para determinação do teor de umidade</i> .....	34
2.2.1 <i>Método de Reação de Carbureto de Cálcio (Speedy test)</i> .....	35
2.2.2 <i>Método Capacitivo</i> .....	36

2.2.3	Método da Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR) .....	37
2.2.4	Método da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) .....	38
2.2.5	Método Resistivo .....	38
2.2.6	Método de Secagem em Estufa (Método Gravimétrico) .....	39
2.2.7	Método de Absorção de Nêutrons (Sonda de Nêutrons) .....	40
2.2.8	Método de Ressonância Magnética Nuclear (RMN) .....	42
2.2.9	Especificação de métodos para determinação da umidade .....	43
<b>2.3</b>	<b>Reflectometria no domínio do tempo – TDR .....</b>	<b>45</b>
2.3.1	Fundamentação teórica da técnica TDR .....	47
<b>2.4</b>	<b>Sistemas e subsistemas TDR .....</b>	<b>50</b>
2.4.1	Requisitos de um Software TDR .....	52
2.4.2	Software WinTDR .....	53
2.4.3	Software TACQ .....	56
2.4.4	Software PMTDR-SM .....	57
2.4.5	Sondas TDR .....	60
2.4.6	Equipamentos TDR comerciais .....	63
2.4.7	Principais métodos de calibração .....	64
<b>3</b>	<b><i>Materiais e métodos</i> .....</b>	<b>68</b>
<b>3.1</b>	<b>Recursos físicos .....</b>	<b>69</b>
3.1.1	Osciloscópio testador de cabos Tektronix 1502C .....	69
3.1.2	Osciloscópio miniaturizado USB - MSO-19 .....	69
3.1.3	Osciloscópio testador de cabos TDR100 .....	70
3.1.4	Impressora 3D .....	71
3.1.5	Computador Intel Computer Stick CS125 .....	72
3.1.6	Sondas utilizadas .....	73
3.1.7	Soluções líquidas .....	74
3.1.8	Equipamentos de laboratório .....	74
3.1.9	Solo ensaiado .....	75
<b>3.2</b>	<b>Recursos virtuais .....</b>	<b>76</b>
3.2.1	Programa WinTDR .....	76
3.2.2	Programa MSO-19 .....	77

3.2.3	Programa PC-TDR.....	78
3.2.4	Sistema Oracle – VirtualBox.....	78
3.2.5	Linguagens PHP e ECMAScript ( <i>Javascript</i> ) .....	79
3.2.6	Framework Bootstrap, JQuery, D3 e PHP Desktop .....	80
3.2.7	Framework MathJax, Latex e Katex .....	80
<b>3.3</b>	<b>Método para validação do sistema TDR proposto.....</b>	<b>81</b>
3.3.1	<i>Design Failure Mode and Effects Analysis</i> - DFMEA .....	81
3.3.2	Preparação das amostras de solo.....	83
3.3.3	Ensaio TDR convencional e de baixo custo.....	85
<b>4</b>	<b><i>Resultados e Discussão</i> .....</b>	<b>88</b>
<b>4.1</b>	<b>MSO-19 aplicado a solos: DFMEA e desempenho .....</b>	<b>89</b>
4.1.1	<i>Design failure mode and effects analysis</i> – DFMEA.....	89
4.1.2	Análise de desempenho MSO-19 Vs. 1502C .....	91
<b>4.2</b>	<b>Software EASYTDR .....</b>	<b>94</b>
4.2.1	Características gerais para instalação e operação.....	95
4.2.2	Principais janelas e funções .....	97
<b>4.3</b>	<b>Sondas TDR customizadas e Montagem de um Multiplexador .....</b>	<b>114</b>
4.3.1	Fabricação de Sondas TDR com impressão 3D.....	114
4.3.2	Projeto e Montagem de Multiplexador baseado em <i>Relays</i> .....	119
<b>4.4</b>	<b>Sistema TDR de baixo custo .....</b>	<b>121</b>
4.4.1	Análise de comportamento do sinal TDR .....	123
<b>5</b>	<b><i>Conclusões e trabalhos futuros</i>.....</b>	<b>135</b>
<b>6</b>	<b><i>Referências</i> .....</b>	<b>138</b>

# 1

## Introdução

Em solos não-saturados, o teor de umidade pode afetar diretamente parâmetros de resistência e deformabilidade dos solos, alterando o comportamento dos mesmos. Assim, a determinação do teor de umidade é um requisito importante durante as etapas de projeto e/ou construção na maior parte das obras de engenharia, tais como fundações, terraplenagens, barragens, muros de contenção e taludes. Estimar o teor de umidade do solo é geralmente uma atividade onerosa em tempo e custo, dado que a maior parte dos métodos necessitam considerável investimento em equipamentos, e ainda quando da adoção do método padrão (gravimétrico de estufa), uma parcela significativa de tempo para sua determinação.

Dentre as técnicas existentes para a estimativa do teor de umidade, a Reflectometria no Domínio do Tempo (*Time Domain Reflectometry* – TDR) destaca-se pela flexibilidade de uso, podendo ser realizada em laboratório ou *in situ*. Muito estudada nas últimas décadas devido à sua praticidade, rapidez e acurácia. A técnica TDR é um método indireto para determinação do teor de umidade do solo, que utiliza como princípio a medida do tempo que uma onda eletromagnética necessita para percorrer um

percurso com comprimento conhecido, onde a constante dielétrica do meio, pode ser então estimada e posteriormente correlacionada com o teor de umidade do meio. As principais vantagens da técnica estão associadas à sua natureza não destrutiva e a obtenção em tempo real do perfil de umidade do solo.

Embora a técnica TDR se destaque por sua acurácia, a mesma apresenta desvantagens devido à sua complexidade e ao elevado investimento necessário para sua implementação. Essas desvantagens existem devido a necessidade de uma integração eficaz entre todos os componentes presentes em um sistema TDR. Onde destacam-se, os hardware de geração de pulsos e de captura de reflexões (osciloscópio) e o software de controle, gestão de ensaios e interpretação de resultados.

De acordo com Drnevich (2003), a utilização de software durante os ensaios TDR é útil não apenas para simplificar o processo de aquisição e análise de dados, como também para reduzir as incertezas de erro associadas aos diferentes operadores que realizam os ensaios. Topp *et al.* (1980) descobriram que a principal fonte de incerteza na calibração de medições TDR era a análise realizada pelo operador na forma do sinal TDR, visto que a interpretação humana conduzia a erros significativos.

Conforme Evett (2000), sistemas comerciais têm sido lançados e disponibilizados no mercado desde os anos 1980, geralmente compostos por sondas, multiplexadores e instrumentos, baseados em tecnologia proprietária, com interfaces de software bastante rudimentares, geralmente incorporadas a unidades de aquisição de dados com elevado custo de aquisição.

## 1.1 Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo principal o desenvolvimento de um sistema TDR de baixo custo, através do uso de um osciloscópio miniaturizado que possui uma relação de preço 95% menor que os equipamentos comerciais geralmente utilizados em ensaios TDR, que possa ser utilizado de maneira portátil e/ou embarcada em sondas para ensaios *in situ*. Como objetivos específicos têm-se:

- A realização de análise de desempenho entre o sistema TDR de baixo custo e os tradicionais sistemas de ensaios TDR;
- O desenvolvimento de um software de controle para o sistema TDR proposto, que seja capaz de gerenciar os ensaios realizados e automaticamente iniciar medidas programadas, com controle de agendamento da hora e da data para realização das medições;
- A estimativa automática da condutividade elétrica do solo e da umidade volumétrica por equações de calibração personalizáveis pelos usuários, e ainda proporcionar ferramentas de interação, entre o usuário e o sinal TDR gerado, possibilitando o ajuste manual dos ensaios;
- O desenvolvimento de sondas TDR para funcionamento integrado com o sistema TDR de baixo custo.

Este trabalho busca proporcionar uma opção de baixo custo e flexível para linhas de pesquisas que poderiam utilizar a técnica TDR para a estimativa do teor de umidade dos solos não saturados, mas pela impossibilidade de investimentos em sistemas TDR comerciais, acabam optando por técnicas onerosas em tempo, segurança e acurácia. A partir do desenvolvimento do sistema TDR proposto, os usuários serão capazes de

realizar ensaios TDR com pouco investimento, possibilitando uma alternativa rápida e de boa aplicabilidade para a estimativa do teor de umidade em solos não saturados.

## 1.2 Métodos do trabalho

Para atingir os objetivos propostos, foram realizadas as seguintes atividades:

- Análise de desempenho do osciloscópio MSO-19, fabricado pela companhia Link Instruments em relação ao Testador de Cabos 1502C, fabricado pela companhia Tektronix, através de ensaios em um solo da região de São Carlos-SP;
- Análise de falhas dos ensaios TDR com a técnica denominada DFMEA (*Design Failure Mode and Effects Analysis*), objetivando elencar os principais elementos que conduzem a erros durante os ensaios TDR e que possam servir de requisito durante a fase de desenvolvimento do software de controle;
- Desenvolvimento de um protótipo de software de controle e gestão de ensaios para o osciloscópio MSO-19;
- Aprimoramento do protótipo de software de controle, para uma versão com as seguintes características:
  - Codificação através de Programação Orientada a Objetos – POO;
  - Integração do software *desktop* com sistema online;
  - Possibilidade de controle remoto dos ensaios (telemetria);
  - Função de armazenamento remoto de ensaios (armazenagem em nuvem);
  - Função de compartilhamento das equações de calibração geradas entre os usuários do software;
  - Possibilidade de análise de ensaios realizados com softwares tradicionais de mercado, como por exemplo WinTDR e PC-TDR;



- Função de exportação das análises realizadas, em formato compatível com o software Microsoft Excel, e gráficos gerados em formato JPEG.
- Realizar análise comparativa entre o sistema TDR de baixo custo e o sistema comercial da companhia Campbell Scientific em uma solução de ácido acético e água deionizada.

### ***1.3 Organização do trabalho***

Este trabalho é composto por seis capítulos.

O **capítulo 1**, apresenta a motivação para realização do trabalho, os objetivos, a metodologia e a descrição da estrutura do trabalho.

O **capítulo 2**, apresenta a revisão bibliográfica do trabalho, abordando o Teor de Umidade em Solos Não-Saturados e os Métodos para sua Determinação, com foco principal na técnica de Reflectometria no Domínio do Tempo.

O **capítulo 3**, apresenta os materiais e métodos utilizados para construção do sistema TDR de baixo custo, abordando os recursos físicos e virtuais, assim como a metodologia utilizada para a realização de cada etapa.

O **capítulo 4**, aborda os resultados da aplicação prática dos conceitos analisados neste trabalho, através da apresentação do sistema desenvolvido e de suas principais funções.

O **capítulo 5**, apresenta a avaliação da realização deste trabalho, suas limitações, bem como propostas para seu desenvolvimento futuro e pesquisas a serem realizadas com o uso do mesmo.

## 2

## O Teor de Umidade nos Solos Não Saturados e os Métodos para sua Determinação

O estudo da mecânica dos solos não saturados tem recebido maior foco dos pesquisadores desde a década de 1960, visto que muitas obras de engenharia envolvem a utilização de solos compactados não saturados, como aterros, barragens, e estabilização de taludes (BICALHO *et al.* 2000). Fredlund (2005), destaca que a partir da década de 1990, houve um aumento significativo de consideração da mecânica dos solos não saturados na prática da engenharia geotécnica. O mesmo autor ainda destaca, que uma série de conferências internacionais dedicadas ao intercâmbio de informações sobre o comportamento dos solos não saturados têm sido realizadas, tornando evidente a necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias que permitam a implementação e compreensão eficiente destes solos.

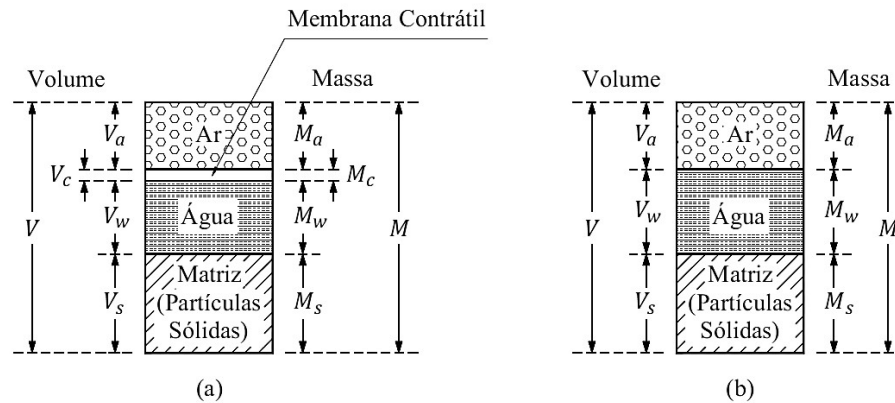
Os solos saturados e secos, são constituídos de um sistema bifásico, composto por partículas sólidas com vazios preenchidos por água ou por ar (FREDLUND, 1993). Nos solos não saturados, o sistema é composto por quatro fases: partículas sólidas, água,

ar e por uma fase chamada “membrana contráctil” (Fredlund e Rahardjo, 1993). Esta última foi somente considerada após as pesquisas de Fredlund e Morgenstern (1977), que passaram a considerar a interface ar-água como uma fase isolada. Davies e Rideal (1963) *apud* Fredlund e Morgenstern (1977), explicam que esta interface não pode ser considerada como um plano com uma extensão das propriedades de seus componentes, mas sim, um filme com características distintas dos materiais em que se encontram, no caso o ar e a água.

Conforme Terzaghi (1943), a espessura da membrana contráctil é relativa a poucas camadas moleculares, situando-se em torno de  $10^{-6}$  mm e possuindo uma propriedade chamada “tensão superficial”. Esta propriedade se refere as tensões de tração que atuam no sistema, causadas por forças intermoleculares que atuam dentro dessa membrana contráctil. Ela atua como uma membrana elástica, interagindo com as partículas granulares do solo e influenciando no comportamento mecânico do mesmo (SOARES, 2005).

Segundo Teixeira (2006), a membrana contráctil possui uma pequena contribuição na relação peso-volume quando comparada com as demais fases presentes no sistema, sendo que a maior parte dos autores, desconsideram esta fase, passando a incorporá-la como parte do peso da água e não considerando seu volume. Com isso, o sistema completo, conhecido como “sistema rigoroso” passa a ser considerado como um “sistema trifásico simplificado”, conforme representado pelos diagramas de fases da Figura 2.1.

Figura 2.1 - Diagramas de fases, (a) sistema rigoroso e (b) diagrama trifásico simplificado



Fonte: Adaptado de FREDLUND e RAHARDJO, 1993

Vários parâmetros geotécnicos, tais como, resistência ao cisalhamento, deformabilidade, compressibilidade e condutividade hidráulica, são alterados pela variação do teor de umidade do solo (TEIXEIRA, 2006). A variação desta ao longo da vida útil das obras de engenharia cria condições que aumentam as incertezas quanto ao desempenho destas obras e ainda, um aumento considerável dos custos de implantação e manutenções futuras.

## 2.1 O teor de umidade nos solos não-saturados

O teor de umidade pode ser expresso através da relação entre grandezas conhecidas e facilmente obtidas em laboratório, sendo tradicionalmente expressas da seguinte forma:

- Umidade volumétrica ( $\theta$ ) que é a relação do volume de água contido em um determinado volume de solo;
- Umidade gravimétrica ( $w$ ) que é a relação entre a massa de água e a massa de sólidos contidos numa determinada massa de solo;

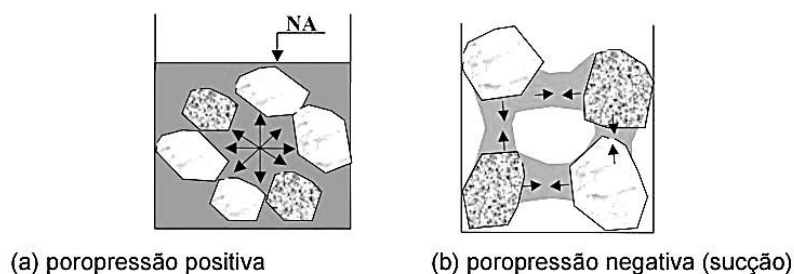
- Grau de saturação ( $S$ ) que é a relação entre o volume de água ( $V_a$ ) e o volume de vazios ( $V_v$ ) presentes em uma determinada quantidade de solo.

No estudo dos solos não saturados, o teor de umidade age como variável principal de influência, alterando a sucção matricial e total do sistema solo-ar-água e possuindo relação direta com a coesão aparente e com os valores de resistência (FREDLUND e MORGENSTERN, 1977). Por sua vez, o comportamento tensão-deformação-resistência dos solos saturados, depende do estado de tensões efetivas, que são determinadas através do conhecimento das tensões totais e poro-pressão, conforme Equação 1:

$$\sigma' = \sigma - u \quad (1)$$

Onde  $\sigma'$  = Tensão efetiva,  $\sigma$  = Tensão total e  $u$  = Poro-pressão ou pressão neutra. Neste caso, independentemente de haver ou não fluxo, as poro-pressões são positivas (Figura 2.2a). Em solos não saturados, a água preenche parcialmente os vazios e as tensões no fluido são negativas, denominadas sucção (Figura 2.2b). Nestas condições o solo apresenta uma coesão aparente que pode ser alterada em virtude de variações na umidade.

Figura 2.2 - Tensões na água



Fonte: UERJ, 2008

A medição do teor de umidade pode ser expressa na forma de umidade gravimétrica ( $w$ ), que é a relação entre a massa de água ( $m_a$ ) e a massa dos sólidos ( $m_s$ ), Equação 2, ou na forma de umidade volumétrica ( $\theta$ ), que é a relação entre o volume de água e o

volume total de uma certa quantidade de solo ou o produto da umidade gravimétrica ( $w$ ) com a relação do peso específico do solo seco ( $\rho_d$ ) e o peso específico da água ( $\rho_a$ ), Equação 3.

$$w = \frac{m_a}{m_s} \quad (2)$$

$$\theta = \frac{V_a}{V} \rightarrow \theta = w \times \left( \frac{\rho_d}{\rho_a} \right) \quad (3)$$

Segundo Sheng *et al.* (2008), as pesquisas realizadas nos cinquenta primeiros anos da história da mecânica dos solos foram focadas unicamente em solos saturados e secos, gerando uma deficiência considerável na área dos solos não saturados, e devido a isto gerando considerável risco a segurança de obras realizadas em solos não saturados. Devido à quantidade de variáveis envolvidas e a complexidade da relação entre as mesmas, os solos não saturados apresentam diversos tipos de comportamento, tornando a análise geotécnica complexa e por vezes, de difícil previsibilidade, dentre as quais citam-se: o empolamento devido à expansão de argilas secas, recalques devido ao colapso com o umedecimento em solos carregados, variações nos valores de poro-pressão negativos associados à chuvas intensas que podem causar rupturas de taludes, redução da capacidade de carga e do módulo de resiliência do solo, entre outros (PEREIRA, 2006).

Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), uma condição comum envolvendo solos não saturados é a poro-pressão negativa da água, agravada devido a uma grande parte das obras de infraestrutura estarem sujeitas a este efeito, das quais destacam-se: barragens, taludes, estabilidade de escavações, capacidade de carga de fundações, movimentação dos solos devido à presença de solos expansivos e colapsíveis, entre outros.

Conforme Sheng (2011), tópicos fundamentais durante as pesquisas do comportamento dos solos não saturados devem considerar aspectos quanto ao comportamento da variação de volume associada às variações de sucção e saturação,

o comportamento da resistência ao cisalhamento associado às variações de sucção e saturação e o comportamento hidráulico associado às variações de sucção e saturação. Isso se deve aos solos não saturados estarem sujeitos a significativas variações de volume com as mudanças de sucção ou grau de saturação, causando efeitos variados, tais como a expansão devida do umedecimento, o colapso e ainda, ambas as situações dependendo do nível de tensões.

As grandes variações volumétricas associadas à mudança de saturação podem resultar em severos danos às fundações e estruturas. A resistência ao cisalhamento dos solos pode mudar drasticamente com as variações do grau de saturação, causando escorregamentos de terra devido à intensa ocorrência de chuvas. Solos não saturados também apresentam um comportamento hidráulico próprio que traz implicações profundas durante as etapas de projeto de sistemas de proteção e contenção de resíduos industriais e aterros sanitários municipais (SHENG, 2011).

## ***2.2 Métodos para determinação do teor de umidade***

No contexto geotécnico mundial, é comum o esforço na busca do desenvolvimento de técnicas confiáveis para a estimativa do teor de umidade em *in situ* e em laboratório. Carneiro (1999), afirma que estimar a quantidade de água que o solo é capaz de reter é de fundamental importância para se determinar o volume necessário para saturar este solo. Costa (1999), também expressa que a umidade do solo é um parâmetro essencial em muitas análises geotécnicas, sendo sua quantificação de suma importância, uma vez que este parâmetro guarda uma relação direta com a sucção do solo.

A obtenção do teor de umidade através de pesagem e secagem de amostras em estufa é considerada como a técnica padrão. Contudo, essa técnica torna-se insatisfatória em situações nas quais se necessita rapidez na obtenção dos resultados e quando há um

grande volume de dados, como por exemplo, o monitoramento contínuo de um maciço, em profundidades e locais diversos.

Os métodos existentes para a determinação do teor de umidade podem ser diretos ou indiretos. Os métodos diretos realizam a medição de uma grandeza física do solo que pode ser diretamente relacionada à quantidade de água presente no mesmo. Já os métodos indiretos, geralmente realizam a medição de propriedades elétricas, químicas e físicas para através destas realizar, geralmente por curvas de calibração, a estimativa do teor de umidade. Com o objetivo de compreender o cenário das técnicas disponíveis para a medição do teor de umidade, apresenta-se a seguir os principais métodos utilizados.

#### 2.2.1 Método de Reação de Carbureto de Cálcio (*Speedy test*)

O método de reação com carbureto de cálcio em água é um método indireto que correlaciona a medida de pressão de uma câmara com a quantidade de água presente na amostra ensaiada. Comercialmente o método é conhecido como *Speedy Test* (Figura 2.3). Ele é um dos métodos mais antigos realizados para determinação do teor de umidade *in situ* e é normatizado conforme as normas ASTM D4944 de 2011 e AASHTO T 217 de 2014. Conforme abordou Paes De Camargo *et al.* (1960), métodos para a determinação da umidade de solos baseadas na reação de carbureto de cálcio têm sido estudadas por diversos autores desde 1936, sendo utilizado para a determinação do teor de umidade de materiais variados, como sementes, fibras e carvão, possibilitando a obtenção da umidade em torno de cinco minutos de ensaio.

Figura 2.3 - Equipamento *Speedy Test*, modelo atual (esquerda) e modelo antigo (direita)





Fonte: Adaptado de HOSKIN (esquerda) e de CATALOGUE-HOST (direita)

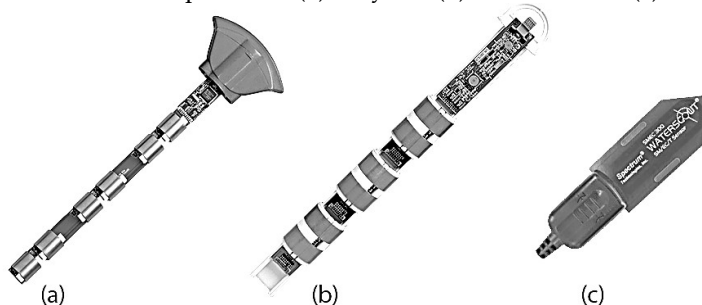
O método é realizado através da pesagem de uma amostra de solo e da pesagem de uma porção de carbureto de cálcio ajustada conforme o peso da amostra de solo. Ambos são inseridos em uma câmara de reação, sendo posteriormente adequadamente misturados através da movimentação da câmara. Após alguns segundos a reação entre o carbureto de cálcio e a umidade da amostra é apontada no manômetro, através do aumento da pressão interna pelo gás acetileno gerado na reação. Para cada grama de água presente no solo, é produzido 622 mililitros de gás acetileno, considerando-se uma pressão atmosférica normal (PAES DE CAMARGO *et al.*, 1960). As principais vantagens do método de Reação de Carbureto de Cálcio são: baixo custo de manutenção, aplicação em todos os tipos de solo, portabilidade e simplicidade de realização dos ensaios. As principais desvantagens são: impossibilidade de automatização do ensaio, destruição das amostras, elevado erro médio na estimativa do teor de umidade, limitação do método em uma umidade gravimétrica entre zero e 20%, processo dependente da habilidade e disciplina do operador em seguir o procedimento.

### 2.2.2 Método Capacitivo

O método capacitivo é um método de medição do teor de umidade indireto realizado através da medição da capacitância gerada entre dois ou mais eletrodos inseridos em um meio dielétrico que propicie a criação do efeito capacitivo de forma análoga a um capacitor aplicado em dispositivos eletrônicos (ELLER e DENOTH, 1996). A

propriedade do capacitor formado de carregar-se e descarregar-se é inerente a propriedade dielétrica que o solo assume devido à variação do teor de umidade do mesmo (Figura 2.4).

Figura 2.4 - Sensores capacitivos, (a) EasyAG, (b) EnviroSCAN, (c) SMEC 300



Fonte: Adaptado de SENTEK (a) e (b) e SPECMETERS (c), 2016

As vantagens do método capacitivo são referentes à sua versatilidade de aplicação, podendo ser automatizado e permitindo a construção de sondas especiais em formatos variados. Dessa forma, possibilita-se a construção de sondas para a medição da umidade em profundidades variadas, e se adequadamente calibradas, permitindo uma estimativa precisa do teor de umidade em solos com concentração iônica constante. Já as desvantagens do método são relativas à necessidade de calibração para cada tipo de solo, a influência dos sais nas medidas e o custo elevado para aquisição dos equipamentos.

### 2.2.3 Método da Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR)

O método FDR (*Frequency Domain Reflectometry*) é um método indireto, com características similares ao Método Capacitivo, constituído basicamente por um par de eletrodos associados a um capacitor. O método é baseado no monitoramento da frequência que o sistema apresenta ao longo de uma faixa definida de tempo, uma vez que as cargas e recargas do capacitor ficam associadas à variação da capacitância na

matriz do solo, acarretando numa frequência menor de contagens durante um mesmo intervalo de tempo quando o teor de umidade é maior (NAVARRO *et al.*, 2006).

#### 2.2.4 Método da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR)

O método TDR (*Time Domain Reflectometry*) é um método indireto, que depende da constante dielétrica apresentada pelos solos, similar ao Método Capacitivo, sendo constituído basicamente pelo conjunto de um gerador de sinal, um guia de onda e um osciloscópio. Essa técnica será abordada em detalhes no item 2.3.

#### 2.2.5 Método Resistivo

O método resistivo é um método indireto baseado na propriedade que os materiais apresentam de oposição ao fluxo de uma corrente elétrica. O método de ensaio é realizado através da medição da resistividade elétrica apresentada pelos solos quando da ocorrência de um fluxo de elétrons sob o mesmo. Este método pode ser realizado de maneira direta, com eletrodos inseridos diretamente no solo, ou de maneira indireta com materiais porosos entre e ao redor dos eletrodos, proporcionando uma condição melhor controlada, dados a uniformidade e o conhecimento da porosidade do meio. O método é comumente encontrado em dispositivos comerciais, visto a facilidade e o custo para produção de tais equipamentos (Figura 2.5).

Figura 2.5 - Sensores resistivos, (a) WaveShare, (b) Watermark 200 SS, (c) WET-2



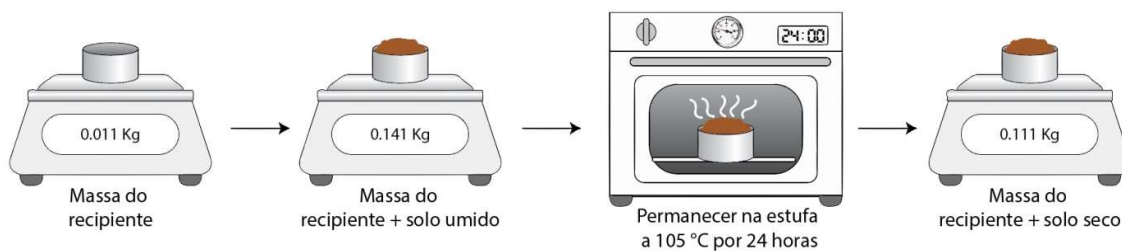
Fonte: Adaptado de (a) WAVESHARE, (b) FARMSOLUTIONS e (c) HOSKIN

O método resistivo tem sido aplicado com sucesso em equipamentos de prospecção do subsolo, como os Piezocones de Resistividade - RCPTu, visto que fornecem informações adicionais aos ensaios de campo, realizados objetivando obter informações das propriedades do solo. As principais vantagens do método resistivo são associadas à não destruição da amostra de solo, possibilidade de automação das medições, medição em várias profundidades, baixo investimento de aquisição e manutenção, rapidez das leituras e portabilidade dos equipamentos. As principais desvantagens são relacionadas aos resultados, que por sua vez dependem da concentração de íons no solo, necessidade de calibração para cada tipo de solo e o erro de estimativa geralmente superior a 10%.

#### 2.2.6 Método de Secagem em Estufa (Método Gravimétrico)

O método de secagem em estufa, conhecido também como método gravimétrico, é o mais preciso e utilizado quando existe a necessidade de obtenção do teor de umidade real contido em uma amostra de solos. O método consiste na retirada de amostras do solo *in situ*, no armazenamento das mesmas de forma hermética, a pesagem inicial, secagem em estufa durante 24 horas a uma temperatura de 105 °C, uma nova pesagem e a realização da diferença da massa inicial para a massa final, visando obter a massa de água que estava presente nas amostras (Figura 2.6).

Figura 2.6 - Processo de obtenção de parâmetros para o cálculo da umidade gravimétrica



O teor de umidade gravimétrico ( $w$ ) é a relação entre a massa de água ( $m_w$ ) e a massa de solo seco ( $m_d$ ) utilizada no ensaio (Equação 4), sendo que a massa de água ( $m_w$ )

obtida através da subtração da massa de solo natural ( $m$ ) menos a massa de solo seca ( $m_d$ ), considerando a subtração da massa do recipiente ( $m_r$ ) (Equação 5).

$$w = \frac{m_w}{m_d} \quad (4)$$

$$m_w = (m - m_r) - (m_d - m_r) \quad (5)$$

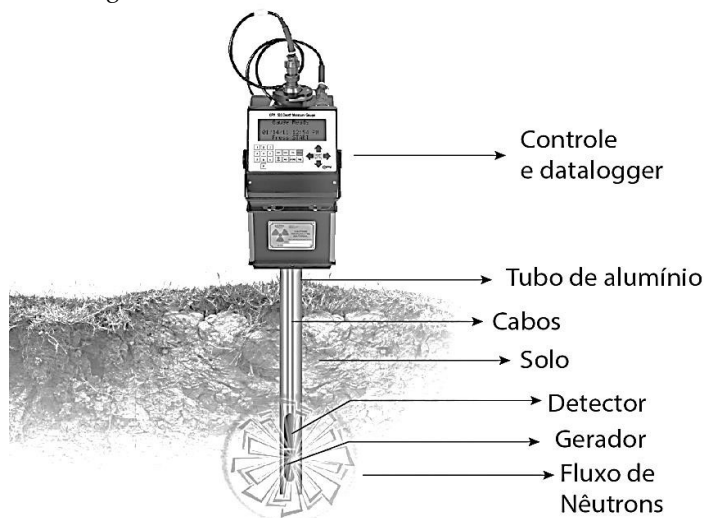
Conforme Vielmo (2008), o método de secagem em estufa, possui elevada acurácia e pode ser utilizado como referência para calibração de outros métodos, apresentando baixo custo de realização, não necessitando de equipamentos sofisticados e ou adição de produtos químicos. Porém, como desvantagens, o caráter destrutivo do ensaio, não permitindo a repetibilidade da medida em um mesmo ponto, além do tempo elevado de espera torna o método lento e realizado somente em situações onde não existe uma alternativa mais rápida ou durante as etapas de calibração de outros métodos. Ainda como desvantagens, cita-se a necessidade de cuidados ao manipular o solo natural, pois a perda de umidade na manipulação das amostras pode ocorrer com facilidade, levando-se ainda em consideração que a aplicação da mesma não é apropriada para turfas e solos orgânicos, pois pode ocorrer perda de massa destes materiais, comprometendo os ensaios.

#### 2.2.7 Método de Absorção de Nêutrons (Sonda de Nêutrons)

É um método indireto de medição do teor de umidade que realiza a contagem de nêutrons lentos e realizada desde a década de 1960 (CHANASKY e NAETH, 1996). Devido à sua complexidade e aos perigos de contaminação envolvidos em sua operação, torna-se um método com aplicações restritas e com necessidade de operadores altamente qualificados (NOFZIGER, 1978). A sonda de nêutrons (Figura 2.7) consiste essencialmente de uma fonte de nêutrons rápidos e um detector de nêutrons lentos, além de um contador de pulsos, um cabo conector e blindagem (BELL

*et al.*, 1987). Embora utilizado a muito anos, o método não define critérios adequados para a sua calibração (TURATTI, 1990).

Figura 2.7 - Sonda de Nêutrons e elementos constituintes



O equipamento chamado de Sonda de Nêutrons é constituído por um cilindro metálico selado contendo uma fonte radioativa (que emite nêutrons rápidos), um detector de nêutrons lentos e um pré-amplificador. A geometria da sonda, frequência de sua fonte de nêutrons, tipo de detector e pré-amplificador variam de acordo com cada fabricante. Segundo Teixeira *et al.* (2003), o seu princípio de funcionamento é baseado na detecção de nêutrons lentos, contados através do sistema de detecção, após a interação dos nêutrons rápidos com os núcleos atômicos de hidrogênio presentes na água que compõe a umidade do solo.

As principais vantagens do método são relativas à natureza não destrutiva das amostras, a repetibilidade de ensaios no mesmo local, o pequeno tempo de realização dos ensaios e a possibilidade de automatização. Como desvantagens o fato de utilizar uma fonte radioativa, que gera muitos riscos de contaminação aos operadores, o alto custo de aquisição e de manutenção e a necessidade de seguir rigorosas normas e controles de segurança (TEIXEIRA *et al.*, 2005).

### 2.2.8 Método de Ressonância Magnética Nuclear (RMN)

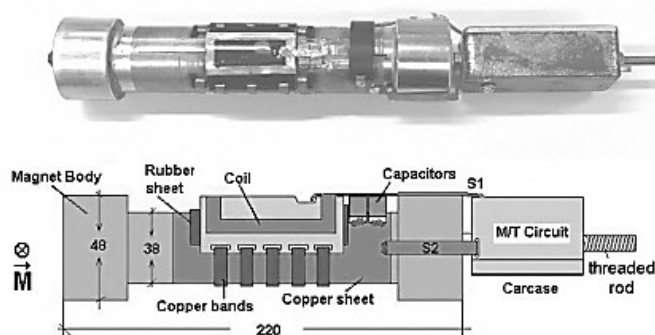
O método de Ressonância Magnética Nuclear é um método não radioativo, embora o nome da técnica possa sugerir. Esta é baseada no princípio de excitação dos dipolos magnéticos da água, através da aplicação de ondas de rádio, em frequências específicas que permitam o acúmulo de energia da onda de rádio nos núcleos atômicos das moléculas. Após um determinado instante de excitação é realizada a leitura da quantidade de energia acumulada pelas moléculas de água presentes no solo, e através de manipulações matemáticas, obtida a concentração da umidade ao longo do perfil de solo estudado (OLIVEIRA-SILVA, 2014).

Conforme Stingaciu (2010), a RMN pode ser aplicada aos solos através de quatro diferentes maneiras: por imagem, permitindo a detecção espacial do teor de umidade e o monitoramento do fluxo hidráulico no solo; por difusão, através da medição dos efeitos de difusão e movimento molecular em líquidos e sólidos, sendo também utilizada em estudos de mobilidade molecular e na caracterização de misturas; por relaxometria, utilizada para a determinação das propriedades magnéticas da água, tais como tempos de relaxação longitudinal e transversal em meios porosos naturais; e por espectroscopia, sendo a análise e a quantificação de matérias orgânicas no solo.

Muitas pesquisas têm sido realizadas visando à adaptação do método RMN utilizado em laboratório em sondas que possam ser utilizadas *in situ*, seja com foco na extração de petróleo ou na exploração de águas subterrâneas. Os primeiros sistemas de caracterização de solos por RMN foram realizados a partir da década de 1960 na área de exploração petrolífera (BROWN e GAMSON, 1960). Objetivando o desenvolvimento de um equipamento portátil para a realização de RMN em solos, Sucre (2011), idealizou uma sonda para medições do teor de umidade em solos não saturados (Figura 2.8), cujo principal objetivo da pesquisa era desenvolver um aparelho de baixo custo e fácil operação, que pudesse competir com técnicas já

estabelecidas em estudos hidrológicos como Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) e a Absorção de Nêutrons (Sonda de Nêutrons). O dispositivo proposto deveria ser semelhante, ou ter melhor acurácia que as técnicas atuais e também obter informações sobre a estrutura porosa do solo. Conforme Sucre (2011), a realização de medições em solos não saturados é de elevada dificuldade, visto que a interpretação dos dados gerados nestas circunstancias eleva a quantidade de ruídos de sinal deste tipo de método.

Figura 2.8 - Equipamento de RMN desenvolvido para medição de porosidade e teor de umidade



Fonte: SUCRE, 2011

As principais vantagens do método RMN são: possibilidade de automação das medições, aplicação em solos salinizados e a rapidez das leituras. No entanto, as principais desvantagens são o elevado investimento de aquisição e manutenção, os resultados dependentes da concentração de óxidos de ferro, a necessidade de calibração para cada tipo de solo, e a indisponibilidade de equipamentos comerciais portáteis e de pequenas dimensões, variação dos resultados em função da densidade do solo, complexidade de realização e interpretação dos resultados (SUCRE, 2011).

### 2.2.9 Especificação de métodos para determinação da umidade

O processo de especificação de métodos para a estimativa do teor de umidade em solos deve considerar as limitações de acurácia para cada método. Este cuidado é necessário, visto ser um procedimento comum de marketing por parte dos fabricantes de



equipamentos, salientar estimativas otimistas de precisão e acurácia destes equipamentos. Acarretando assim, em leituras indevidas e no desdobramento de valores tendenciosos, quando em estudos que dependem dos valores do teor de umidade encontrados através de tais equipamentos. Métodos não destrutivos, são geralmente aplicados em ensaios que necessitam a preservação das amostras. Estes ensaios são geralmente realizados em situações de monitoramento ao longo do tempo, com objetivo de visualizar a variação de umidade ao longo de várias estações do ano.

É provável o avanço tecnológico em métodos que permitem a automação das leituras, visto que boa parte dos solos que necessitam a leitura do teor de umidade, sejam solos não saturados que tem suas propriedades alteradas, devido às mudanças do microclima onde estão localizados. Através do trabalho de Zazueta e Xin (1994), é possível sintetizar através do Quadro 2.1 a grande quantidade de métodos disponíveis para a obtenção do teor de umidade em solos.

Quadro 2.1 - Tipos de técnicas utilizadas para determinar a umidade em solos

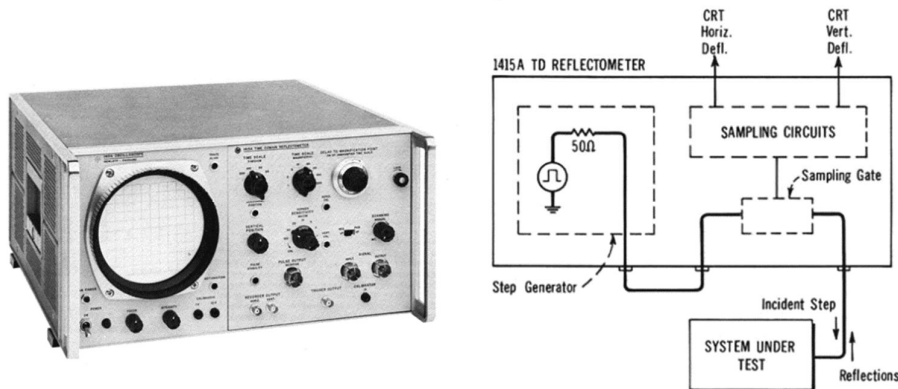
Método de medição	Frequência de uso	Destruição da amostra	Possibilidade de automatização	Duração do ensaio	Erro na estimativa	Nível de Investimento
Reação de Carbureto de Cálcio	Elevada	Sim	Não	5 min.	15%	Moderado
Gravimétrico	Elevada	Sim	Não	24 horas	0% Referência	Baixo
Atenuação de Raios Gama	Raro	Não	Sim	1 min.	10%	Elevado
Dispersão de Nêutrons	Moderada	Não	Sim	3 min.	10%	Elevado
Ressonância Magnética Nuclear	Raro	Sim	Sim	30 seg.	5%	Elevado
Resistivo	Elevada	Não	Sim	1 seg.	15%	Baixo
Capacitivo	Moderada	Não	Sim	1 seg.	10%	Moderado
Radar de Penetração no Solo	Raro	Não	Sim	1 seg.	Qualitativo	Elevado
Reflectometria no Domínio do Tempo	Raro	Não	Sim	1 seg.	5%	Elevado
Reflectometria no Domínio da Frequência	Raro	Não	Sim	1 seg.	5%	Elevado

### 2.3 Reflectometria no domínio do tempo – TDR

Dos diversos métodos existentes para determinar o teor de umidade, a Reflectometria no Domínio do Tempo (*Time Domain Reflectometry* – TDR) destaca-se, uma vez que apresenta diversas vantagens perante os demais métodos, pois engloba de maneira única: resultados instantâneos, possibilidade de automação, manutenção reduzida, nenhum risco radioativo, e ainda, em função da aplicação adequada de calibrações, atingir considerável acurácia nas estimativas do teor de umidade do solo (ESQUIVEL, 2004).

O método TDR é um método não destrutivo que realiza a medida de uma propriedade elétrica do solo correlacionada com o teor de umidade do mesmo. A técnica TDR foi desenvolvida na área de telecomunicações por volta de 1950, e uma década depois foi popularizada através da comercialização de equipamentos para realização de testes em cabos e circuitos eletrônicos (Figura 2.9).

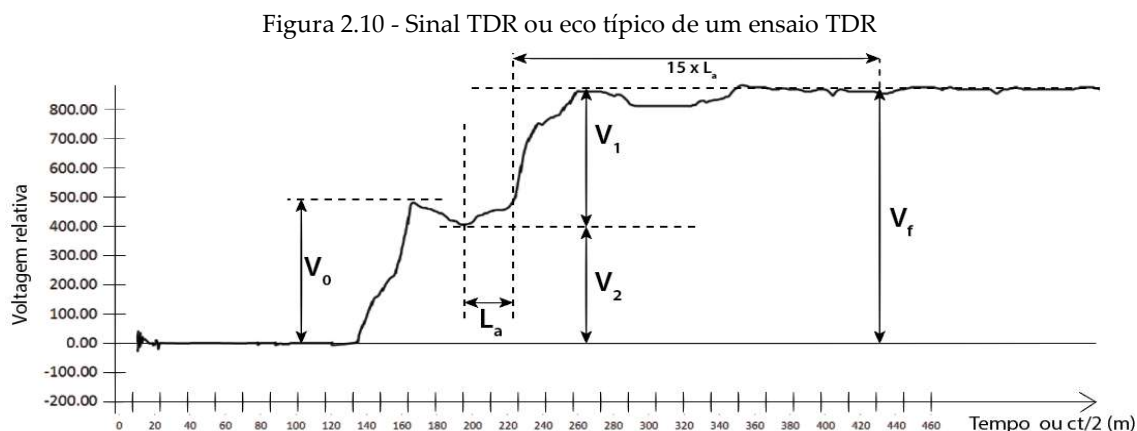
Figura 2.9 - Um dos primeiros equipamentos TDR (HP 1415A), composto pela junção de um gerador de sinal e um osciloscópio (HP 140A)



Fonte: HEWLETT PACKARD, 1962

A técnica basicamente pode ser descrita como a injeção de um pulso elétrico ao longo de um guia de onda “cabo” e a medição do tempo necessário para este pulso ir até o final do cabo ou até a falha do mesmo e retornar para o equipamento de medição. Através deste tempo de resposta “eco” podem ser atribuídas muitas considerações

relativas ao meio onde o pulso eletromagnético se propagou (Figura 2.10).



Conforme Calderón (2010), na década de 70, foram iniciadas as primeiras pesquisas com o objetivo de adaptar a técnica TDR nas geociências, a qual foi pioneiramente introduzida por Davis e Chudobiak (1975) *apud* Batista (2008) e posteriormente implementado e validado por Topp *et al.* (1980) para a determinação do teor de umidade. A partir de 1980, a técnica TDR tem sido bastante divulgada, sendo aplicada principalmente na área de agronomia. Sua utilização na área geotécnica foi pioneiramente empregada por Kujala e Ravaska (1994), que realizaram comparações do teor de umidade obtido com a técnica TDR e a técnica de Absorção de Nêutrons ao longo de um perfil de solo. Dowding e Huang (1994), aplicaram a técnica TDR para monitorar as deformações de maciços rochosos e medir do nível do lençol freático. Benson *et al.* (1994) empregaram a técnica TDR para controlar a umidade de tapetes impermeabilizantes em aterros sanitários.

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

(2004), afirmou a mais de uma década, que o estágio atual da técnica TDR apresenta as seguintes vantagens:

- São geralmente precisos, rápidos e não destrutivos, sendo realizados por meio de equipamentos portáteis;
- Possibilita a realização de medições de forma automatizada;
- Não oferece riscos radioativos em comparação ao popular método da sonda de nêutrons utilizado para estimativa da umidade;
- Determina uma média ponderada espacial do teor de umidade, cobrindo todo o comprimento da sonda;
- Quando utilizado corretamente, produz resultados mais precisos que os outros métodos, mesmo havendo grandes variações de temperatura.

A técnica TDR aplicada à área de solos pode ser considerada uma das técnicas mais promissoras para a determinação do teor de umidade do solo, cujo uso pode proporcionar uma informação adicional para a investigação dos solos não saturados quando se tem a curva de retenção de água no solo. Deste modo é possível fazer uma boa estimativa da sucção ao longo do perfil do subsolo (DÓRIA, 2015).

### 2.3.1 Fundamentação teórica da técnica TDR

Na teoria do eletromagnetismo são definidas as leis e equações que regem o comportamento de propagação de ondas eletromagnéticas em meios físicos, e ainda a base teórica utilizada no estudo de Linhas de Transmissão. Conforme estabelece Annan (1992), os fatores mais importantes que governam o comportamento de ondas eletromagnéticas são a velocidade e o nível de atenuação. E para materiais geológicos

de baixa perda eletromagnética como os solos, a equação de velocidade de propagação das ondas é dada conforme a Equação 6:

$$v = \frac{2L}{t} \rightarrow v = \frac{c}{\sqrt{K}} \rightarrow K = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \quad (6)$$

Onde,  $c$  = velocidade da luz no vácuo ( $2,998 \times 10^8$  m/s  $\cong$  0,3 m/ns);  $K$  = constante dielétrica ou permissividade dielétrica;  $L$  = comprimentos das hastes – tamanho da linha de transmissão;  $t$  = tempo de deslocamento, geralmente expresso em nanossegundos.

O valor  $K$  é referente à constante dielétrica em um meio homogêneo e é um número complexo, pois contém uma parte real e uma parte imaginária. Conforme Klemunes Jr., (1998) para frequências no intervalo de 1 MHz a 1 GHz, a parte real da constante dielétrica não exerce uma influência significativa e geralmente para solos a perda elétrica é pequena e não altera significativamente a medida da velocidade de propagação. Desse modo, a partir dos estudos de Topp *et al.* (1980), este valor  $K$  passou a ser tratado como constante dielétrica aparente, denotado por  $K_a$ , pois refere-se a um valor que representa a constante dielétrica dos materiais constituintes da mistura solo-ar-água (Equação 7).

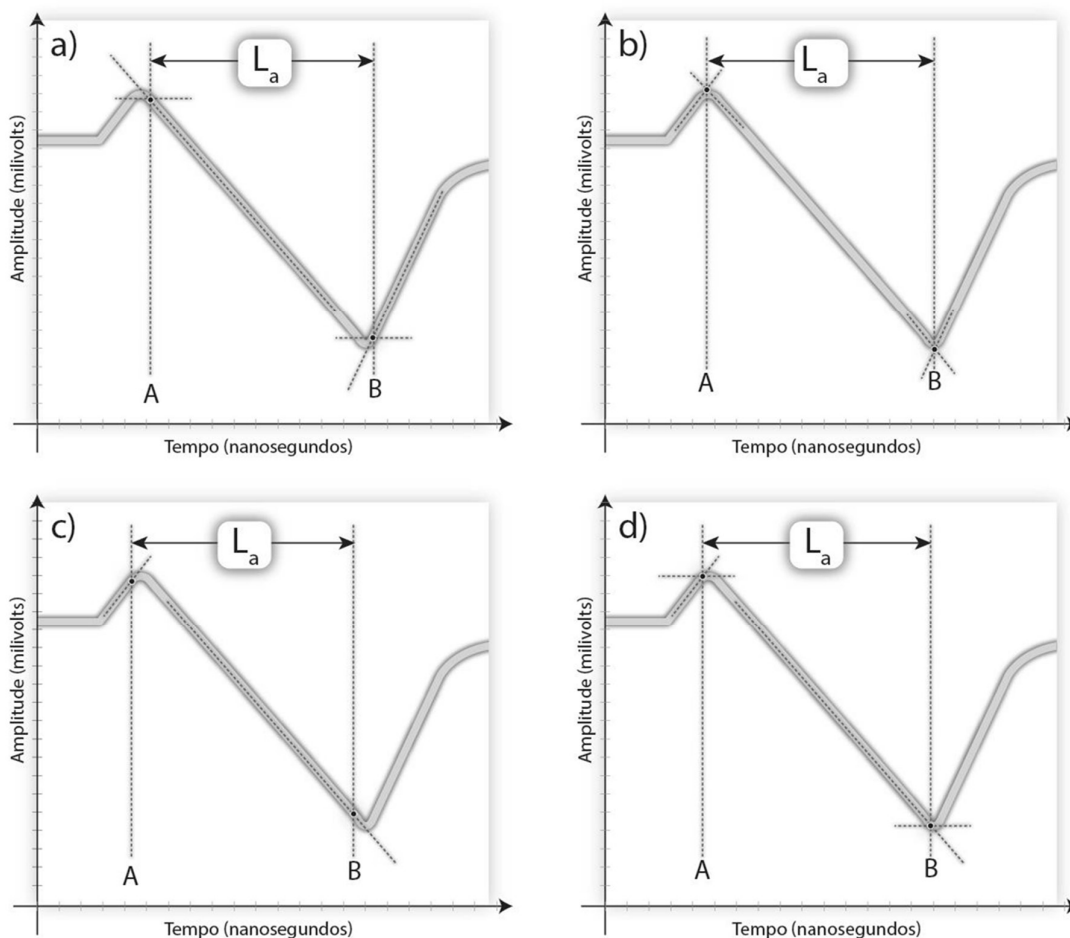
$$K_a = \left[\frac{ct}{2L}\right]^2 = \left[\frac{L_a}{L \times V_p}\right]^2 = \left[\frac{(B-A)}{L \times V_p}\right]^2 \quad (7)$$

Onde,  $K_a$  = Constante Dielétrica Aparente;  $c$  = Velocidade da luz no vácuo ( $2,998 \times 10^8$  m/s  $\cong$  0,3 m/ns);  $L$  = Comprimento das hastes da sonda;  $V_p$  = Velocidade de propagação;  $L_a$  = Comprimento aparente da sonda.

No estudo de Klemunes (1998), frisa-se que devido à constante dielétrica aparente  $K_a$  ser função do quadrado de  $L_a$ , erros ou diferenças no processo de medida do valor de  $L_a$  irão influenciar de maneira significativa nos valores computados de  $K_a$ . Conforme elencado na época da pesquisa de Klemunes, as técnicas para determinação de  $L_a$  não

tiveram consideráveis mudanças, sendo seguro afirmar que se restringem aos seguintes métodos: Método das tangentes, Método dos picos, Método das linhas divergentes, Método das tangentes alternativo, Método científico de Campbell (Figura 2.11).

Figura 2.11 – Métodos para determinação de delta tempo, conhecido como distância aparente  $L_a$ , (a) Método das tangentes, (b) Método dos picos, (c) Método das linhas divergentes e (d) Método das tangentes alternativo



Fonte: Adaptado de KLEMUNES Jr., 1998

A diferença dos métodos para medição do comprimento aparente  $L_a$  se deve pela forma de localizar e medir as inflexões que o sinal TDR proporciona após a realização do ensaio. Klemunes (1998), concluiu que existem diferenças significativas de resultado quando da aplicação dos diferentes métodos usados para determinação do

comprimento aparente  $L_a$  e ainda que o “Método das Tangentes” foi o método que obteve maior acurácia em comparação com os demais métodos (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Análise estatística dos métodos para determinação de  $L_a$

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

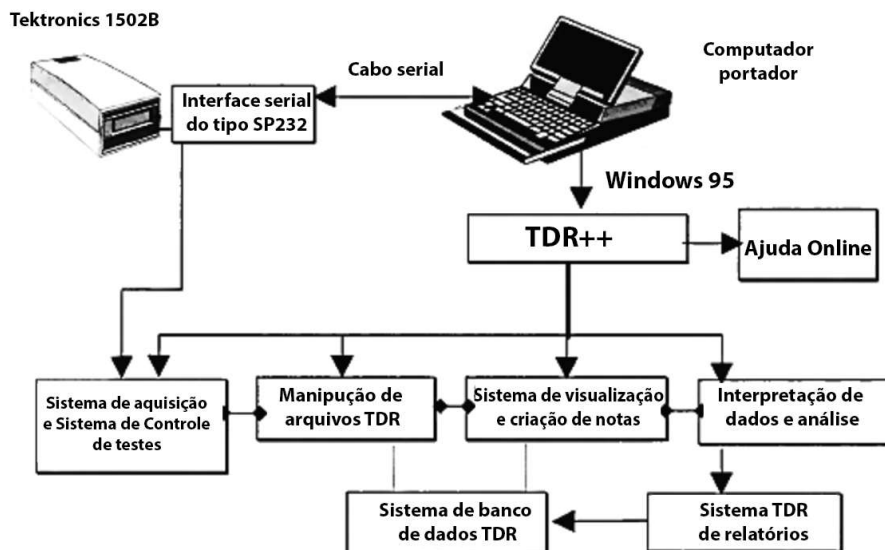
Fonte: Klemunes, 1998

## 2.4 Sistemas e subsistemas TDR

Um sistema TDR pode ser compreendido através da definição de Sistema de Informação que, conforme Laudon (2004), é definido como um conjunto de componentes inter-relacionados que coleta (ou recupera), processa, armazena e distribui informações destinadas a apoiar a tomada de decisões, a coordenação e o controle de uma organização. Além de dar suporte à tomada de decisões, à coordenação e ao controle, esses sistemas também auxiliam os operadores a analisar problemas, visualizar assuntos complexos e criar novos produtos. Desta maneira um sistema TDR pode ser visto como o conjunto de soluções que trabalhando em conjunto

possibilitam a solução de leitura da umidade através da aplicação da técnica de reflectometria no domínio do tempo (Figura 2.12).

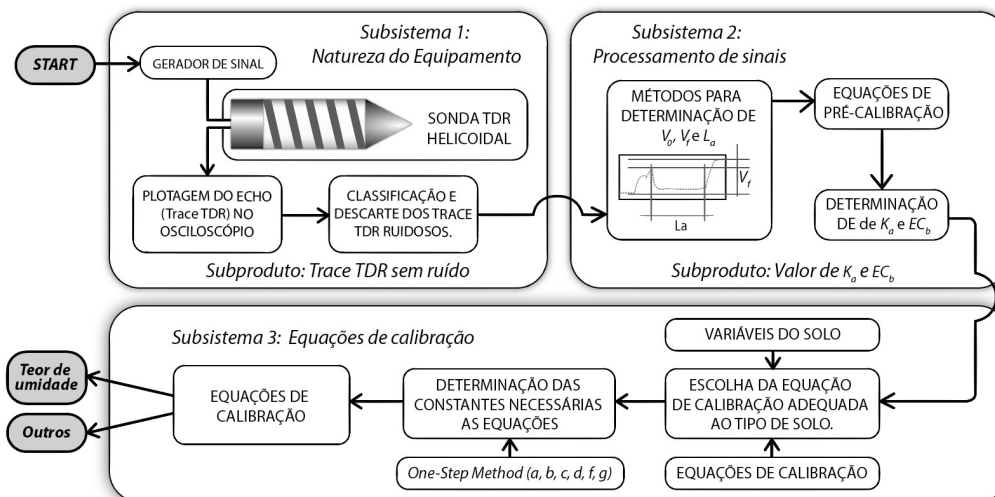
Figura 2.12 - Diagrama dos componentes de um sistema TDR



Fonte: Traduzido de FENG *et al*, 1998

Sistemas TDR são geralmente compostos por três subsistemas em série, os quais podem ser descritos como: um relativo à natureza do equipamento, outro relativo às técnicas de processamento de sinais, e um terceiro relativo às equações de calibração que moldarão de forma final o produto do sistema TDR (Figura 2.13).

Figura 2.13 - Diagrama funcional de um Sistema TDR





#### 2.4.1 Requisitos de um Software TDR

O desenvolvimento de aplicativos TDR para computadores tem sido realizado desde o início da década de 90, quando trabalhos pioneiros foram desenvolvidos nessa época, sendo os mais relevantes de Baker e Allmaras (1990), Heimovaara e Bouten (1990), Herkelrath *et al.* (1991), e Evett (1993 e 1994). Em função da grande quantidade de variáveis envolvidas na aplicação da técnica TDR, a criação de software específico torna a aplicação da técnica menos onerosa em tempo e custo, proporcionando um melhor controle das variáveis, como por exemplo, uma melhor confiabilidade dos resultados e obtenção de uma gama de soluções que beneficiam as áreas agrícola e geotécnica.

Conforme Drnevich (2003), a utilização de software durante os ensaios TDR é útil não apenas para simplificar o processo de aquisição e análise de dados, como também para reduzir as incertezas de erro associadas aos diferentes operadores que controlam o mesmo. Por exemplo, Topp *et al.* (1980) descobriram que a principal fonte de incerteza na calibração de medições TDR era a análise que o operador realizava na forma da onda TDR, que possibilitava obter o tempo de viagem da onda eletromagnética ao longo das sondas, uma vez que o julgamento/interpretação humana do sinal TDR gerado no ensaio conduzia a erros significativos.

Conforme Evett (2000), sistemas comerciais têm sido lançados e disponibilizados no mercado desde os anos 80, geralmente compostos por sondas, multiplexadores e instrumentos, baseados em tecnologia proprietária, com interfaces de software bastante rudimentares, geralmente incorporadas em unidades de aquisição de dados.

Ainda de acordo com Evett (2000), as funções comuns que um software TDR deve apresentar são as seguintes:

- Realizar a aquisição de onda da sonda TDR;
- Interpretar a onda obtida de forma correta;
- Apresentar a onda obtida de forma gráfica;
- Possibilidade de configurações do:
  - Tamanho do cabo;
  - Tamanho das hastes das sondas;
  - Espaçamento entre hastes;
  - Diferentes tipos de solo.

Várias aplicações têm sido criadas ao longo dos anos, atendendo ao padrão de funções observado por Evett (2000). Essas aplicações são desenvolvidas por equipes de pesquisadores independentes, das diversas áreas focadas no estudo do comportamento dos solos em função do teor de umidade, geralmente com o propósito de automatizar e reduzir os custos de utilização da técnica TDR, sendo os principais software TDR encontrados na literatura: WinTDR, TACQ, PMTDR-SM e PC-TDR.

#### 2.4.2 Software WinTDR

O software WinTDR foi desenvolvido pelo Laboratório de Física de Solos da Universidade do Estado de Utah (*Soil Physics Group at Utah State University*) nos Estados Unidos em 1993. O software é disponibilizado gratuitamente pelo site da universidade, tendo seu código fonte fechado. O mesmo teve diversas melhorias realizadas ao longo de 10 anos de pesquisas e aprimoramentos realizados pelos alunos da universidade. A última atualização que consta no repositório é a do ano de 2004, na versão 6.1. O aplicativo WinTDR foi idealizado para trabalhar em conjunto com o

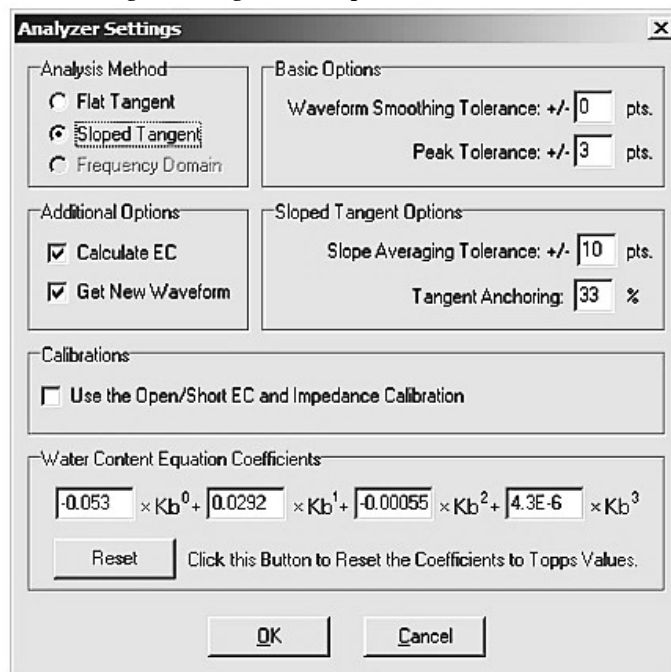
equipamento Tektronix 1502/3 B/C através de uma conexão serial SP232 realizada para conectar o dispositivo TDR ao computador.

O software WinTDR apresenta em sua última atualização, versão 6.1 as seguintes características:

- Possibilidade de salvar arquivos contendo as informações da onda obtida e as informações relativas a análise realizada pelo software;
- Possibilidade ajustar a constante dielétrica em função da temperatura durante a fase de aquisição da onda;
- Possibilidade de uso de multiplexadores que realizam a “troca automática de sondas”, permitindo que uma unidade de aquisição obtenha a leitura de vários pontos de medida do solo;
- Automatização das leituras realizadas pelo equipamento Tektronix, com captura automática da onda obtida e realização automática de análises;
- Possibilidade de customização de um polinômio de terceiro grau;
- Interface gráfica amigável com possibilidade de abertura de vários ensaios simultaneamente;
- Fácil visualização e alteração de variáveis e configurações;

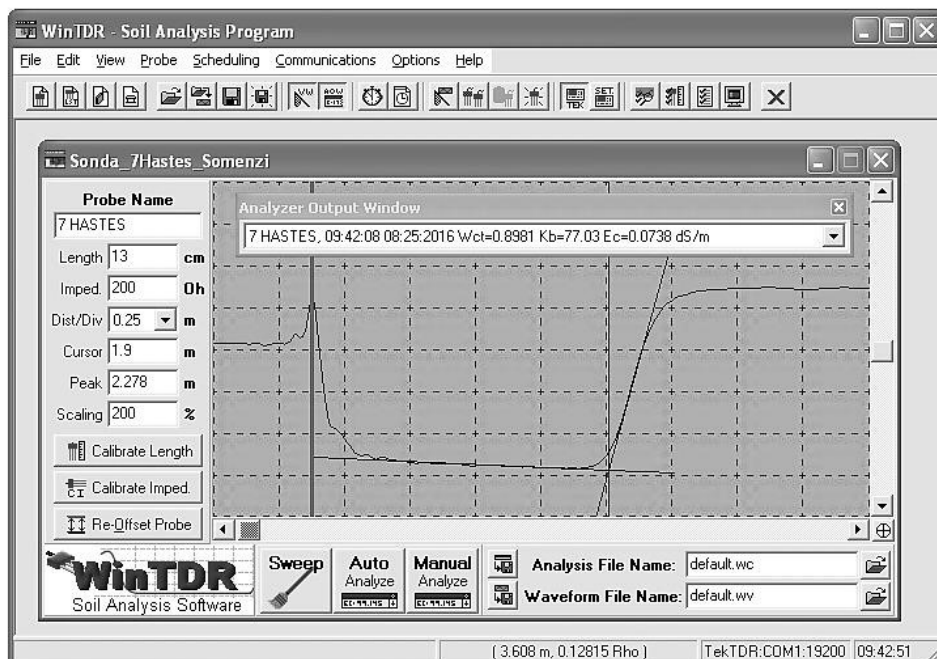
A interface do software WinTDR é composta de uma janela principal, onde são realizadas configurações globais do ambiente de variáveis e onde existem janelas de configurações específicas, como a janela de configurações de análise (Figura 2.14).

Figura 2.14 - Configurações globais da parte de análise do software WinTDR



Na janela interna é apresentado um painel de variáveis a esquerda, onde são configuradas as variáveis do ensaio atual, assim como a visualização da onda obtida com o aparelho Tektronix 1502C (Figura 2.15).

Figura 2.15 - Janela principal e janela menor do software WinTDR



### 2.4.3 Software TACQ

O software TACQ foi desenvolvido pelo pesquisador Steven R. Evett, que pertence à Agência de Pesquisas Agrícolas (*Agricultural Reserch Service – ARS*) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (*United States Department of Agriculture – USDA*) desde o início da década de 90. TACQ é o acrônimo de *Time Acquisition*, referente à *Time Domain Reflectometry Data Acquisition*. O software era disponibilizado gratuitamente pelo site da agência, porém devido às mudanças ao longo do tempo, seu link encontra-se interrompido, não havendo atualmente repositório que ofereça o software para download.

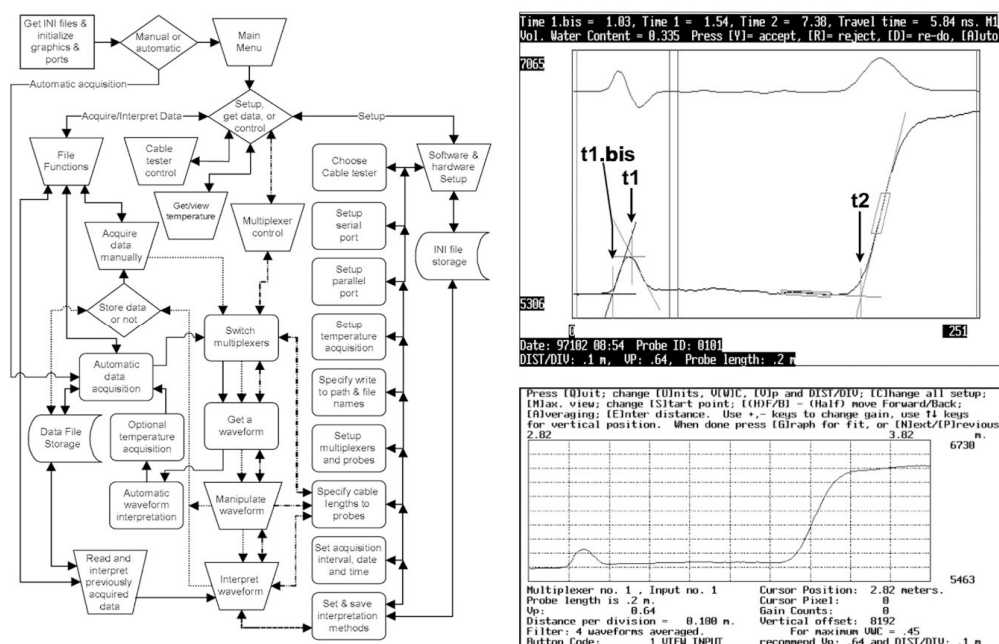
O software TACQ foi programado para trabalhar em conjunto com o equipamento Tektronix 1502C através de uma conexão serial RS-232 realizada para conectar o dispositivo TDR ao computador, da mesma maneira que o software WinTDR e ainda para utilizar multiplexadores das companhias Campbell Scientific e Dynamax (EVETT, 1998). O mesmo autor publicou no ano 2000, um relatório técnico apresentando as características do software e potencialidades de aplicação, conforme segue:

- Capacidade de controlar equipamentos TDR como o testador de cabos da companhia Tektronix;
- Possibilidade de utilização de multiplexadores, habilitando o software a adquirir informação de até 256 sondas;
- Possibilidade de trabalhar com sistemas de aquisição multiplexados para aquisição de temperatura;
- Habilitar a possibilidade de controle de ondas para cada sonda utilizada;
- Possibilidade de aquisição dados relativos a amplitude de voltagem, necessária para utilização no cálculo de condutividade elétrica dos solos;

- Medir automaticamente ou de forma programada através de comandos salvos no software;
- Ser adequado para o uso em sistemas embarcados, em dispositivos com limitação de memória e de hardware;
- Interpretar as formas de onda obtidas, mesmo que sejam de diferentes solos.

Em função dos requisitos acima, o software foi inicialmente desenvolvido para ambiente DOS e posteriormente portabilizado para Windows (Figura 2.16).

Figura 2.16 - Software TAQC, (esquerda) diagrama de funções e (direita) janelas do software



Fonte: EVETT, 1998

#### 2.4.4 Software PMTDR-SM

O software PMTDR-SM foi desenvolvido pela empresa americana Campbell Scientific, Inc., especialmente para a metodologia TDR criada na Universidade de Purdue, conhecida como *Purdue TDR Method*. A data de criação do software não é precisa, visto que a mesma ocorreu ao longo de um programa de colaboração conjunta, chamado (*Joint Transportation Research Program - JTRP*), formando entre o Departamento de

Transportes do Estado de Indiana (*Indiana Department of Transportation – IDT*), a Administração Federal de Estradas (*Federal Highway Administration – FHWA*) e a Universidade de Purdue (*Purdue University*). Os responsáveis pelo projeto foram pesquisadores Vincent Drnevich, Xiong Yu e Janet Lovell, criadores do *Purdue TDR Method*.

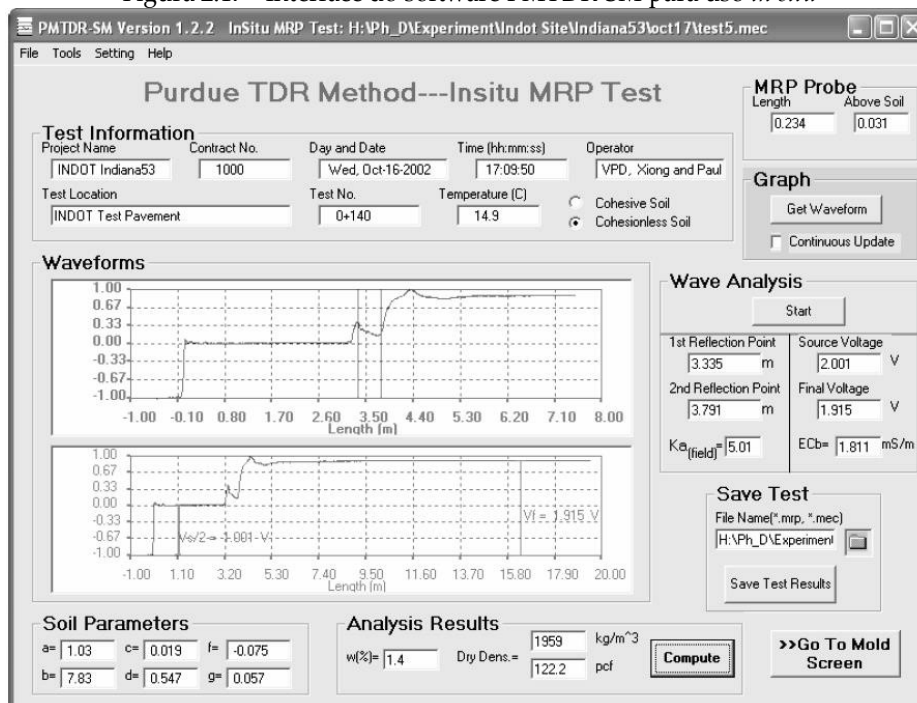
PMTDR é o acrônimo de *Purdue Method Time Domain Reflectometry* e SM é o acrônimo de *Simplified Method*. Conforme Drnevich *et al*, (2003), o software PMTDR teve ao longo de seu desenvolvimento dois grandes aprimoramentos que agregaram ao nome do software as letras PMTDR inicialmente e por último as letras SM. Sendo que no início do projeto de pesquisa o software chamava-se TDR++, e era concebido para trabalhar com equipamentos 1502B da companhia Tektronix. Porém, ao longo do projeto o mesmo foi renomeado, sendo seu nome final definido como PTMTDR-SM, o qual foi desenvolvido para trabalhar somente com o hardware TDR100 da companhia Campbell Scientific. O software PMTDR-SM apresentava como requisitos funcionais as seguintes características:

- Configurações relativas aos parâmetros das amostras;
- O controle e a aquisição de ondas TDR;
- A visualização de ondas TDR (Sinal);
- Configurações gerais do equipamento TDR100;
- Análise da onda TDR;
- Possibilidade de correções de temperatura;
- Calibrações para sondas com isolamentos;
- Cálculo da densidade seca e do teor de umidade;
- Ajuda on-line para usuários.

O software foi idealizado para rodar na plataforma Windows, tendo sua interface organizada de maneira a apresentar a maior parte das variáveis de controle, assim

como o sinal TDR obtido. O software possuía dois tipos de interface, uma específica para uso *in situ* (Figura 2.17).

Figura 2.17 - Interface do software PMTDR-SM para uso *in situ*

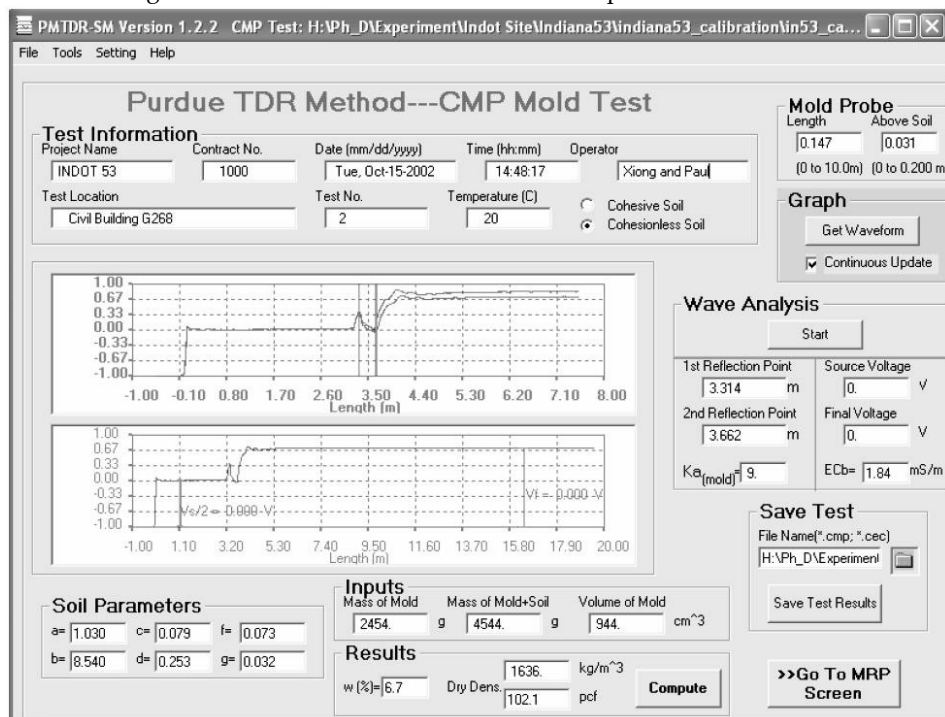


Fonte: DRNEVICH *et al*, 2003

E outra interface para uso em laboratório com condições controladas do corpo de prova (Figura 2.18).



Figura 2.18 - Interface do software PMTDR para uso laboratório

Fonte: DRNEVICH *et al*, 2003

## 2.4.5 Sondas TDR

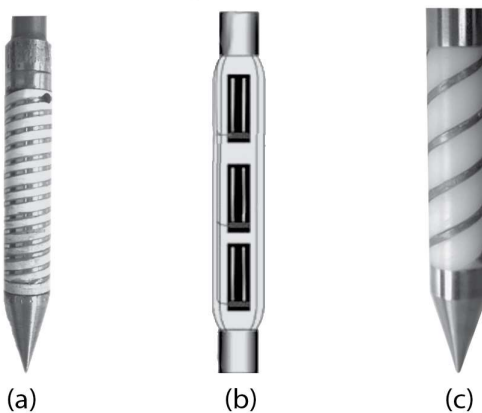
Devido aos ensaios TDR serem geralmente realizados nas ciências agrônômicas, as sondas TDR mais comuns são projetadas para serem inseridas nos primeiros metros de profundidade. Na área geotécnica a utilização de sondas com hastes tornou-se uma limitação, pois geralmente os solos de interesse se encontram em profundidades maiores. Devido a isso muitos trabalhos têm sido realizados com a intenção da utilização da técnica TDR em sondas cilíndricas, que possam ser inseridas no solo através de equipamentos de prospecção geotécnica, como o Ensaio de Simples Reconhecimento (*Standard Penetration Test* - SPT) e o Ensaio de Penetração do Cone (*Cone Penetration Test* - CPT). Destacam-se os trabalhos de Nissen *et al.*, (1998), Vaz e Hopmans (2001), Truss e West (2006), Esquivel e Giacheti (2007), Calderón (2010) e Dória (2015) (Figura 2.19).

Figura 2.19 - A partir da esquerda, sondas com 2, 3, 4 e 7 hastes e sonda coaxial



Sondas helicoidais ou cilíndricas permitem ser utilizadas em conjunto com equipamentos de prospecção do tipo SPT e CPT, tornando capaz a determinação do teor de umidade e da densidade seca do solo em diferentes profundidades (Figura 2.20). Geralmente os fios de transmissão são enrolados em um núcleo de nylon que é fixado a um núcleo de aço que serve como peça estrutural da sonda. No projeto de Esquivel e Giacheti (2007), os condutores de transmissão tinham um comprimento de 280 mm, uma espessura de três milímetros e uma secção transversal retangular com área de dez milímetros quadrados. Ambas as linhas de transmissão (neutro e fase) tinham um espaçamento de 30 mm e sua fixação realizada com resina epóxi. Um cabo coaxial de 50 Ohms, conectando a sonda com ao testador de cabos Tektronix 1502C.

Figura 2.20 - Sondas com perfil circular, (a) Helicoidal miniaturizada, (b) Mista de hastes acopladas e (c) Helicoidal CPT



Fonte: (a) Vaz e Hopmans, 2001, (b) Truss e West, 2006 e (c) Dória, 2015

Conforme Dória (2015), vários pesquisadores realizam ensaios com a sonda helicoidal desenvolvida por Esquivel e Giacheti (2007), sendo que Assis (2008) determinou o teor

de umidade do solo com o equipamento TDR, realizando ensaios de campo em três locais diferentes e coletando amostras de solo para a determinação da umidade gravimétrica em laboratório. Os ensaios foram realizados em um perfil de areia argilosa, no Campus I e II da USP e no campus da UFSCar, todos na cidade de São Carlos (SP). Os resultados da caracterização e os intervalos de erro padrão encontrados nos ensaios de campo realizados são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Resultados de caracterização

	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Límites de Consistencia			Classificação Unificada	Intervalo de Erro (%)
		$w_L$ (%)	$w_p$ (%)	$IP$ (%)		
Solo 7	2.70	25	16	9	SC	1.28-1.53
Solo 8	2.66	35	21	14	SC	3.56-5.19
Solo 9	2.93	36	22	14	SC	3.30-6.19
Solo 10	2.69	28	20	8	SC	1.20-4.56

Fonte: ASSIS, 2008

Ainda segundo Assis, (2008) o teor de umidade estimado com a sonda helicoidal e os valores determinados em laboratório pelo método da estufa elétrica, em quatro campanhas de até 4,5 m de profundidade, ficaram dentro do intervalo de 11,8% e 30,5%. Após comparação com os valores de umidades determinados em laboratório, se obteve erros-padrão variando entre 1,20% e 6,19%. Já no trabalho de Lima (2009) o autor realizou determinações de teores de umidade empregando a técnica TDR na lagoa de contenção número nove da Mineração Jundu Ltda., no município de Descalvado (SP), e comparou seus resultados com os teores de umidades determinados em laboratório pelo método da estufa elétrica. O erro padrão médio da estimativa encontrado foi de 4.98%, para valores de teores de umidade gravimétrica de referência que variaram entre 58.1% e 133.8%. O material estudado foi classificado como uma argila siltosa.

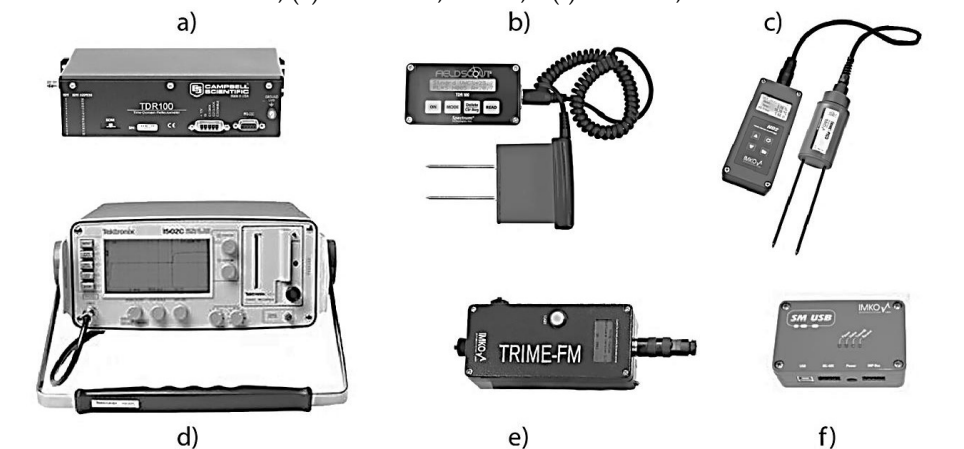
### 2.4.6 Equipamentos TDR comerciais

Atualmente os equipamentos TDR mais comuns utilizados na área de solos podem ser classificados em função de sua aplicação definida em projeto, através do nível de portabilidade e da possibilidade de customização, como edição das equações de calibração, modulação do tipo de pulso e tipo de sonda (Tabela 2.3 e Figura 2.21).

Tabela 2.3 - Classificação de sistemas TDR disponíveis no mercado

Modelo	Fabricante	Aplicação de projeto	Nível de Portabilidade	Nível de Customização	Uso embarcado	Custo
1502C	Tektronix	Testador de cabos	Reduzida, embora possibilite utilização de baterias.	Médio, permite conexão com computadores através do software WINTDR e modificação das equações de calibração.	Não	Elevado
TRD100	Campbell Scientific	Umidade Volumétrica	Elevada, embora necessite <i>data loggers</i> para registro dos valores medidos.	Elevado, permite a utilização de diferentes sondas.	Sim	Médio
6050X1	TRASE System	Umidade Volumétrica	Elevada, embora necessite <i>data loggers</i> para registro dos valores medidos.	Médio, permite conexão com computadores através do software WINTDR e modificação das equações de calibração.	Não	Elevado
Trime TDR	Imko	Umidade Volumétrica	Elevada, embora necessite <i>data loggers</i> para registro dos valores medidos.	Médio, permite acesso as curvas obtidas, mas não permite customização das sondas.	Sim	Médio
MSO-19	Link Instruments	Osciloscópio e gerador de sinal com função de testador de cabos	Elevada, embora necessite um computador para realização das leituras.	Elevado, permite além da conexão com computadores, acesso a bibliotecas (DLLs) para desenvolvimento de software dedicado.	Sim	Baixo

Figura 2.21 – Equipamentos TDR comerciais, (a) TDR100; (b) Fieldscout TDR100; (c) Mobile TDR; (d) 1502C; (e) Trime-FM, IMKO; e (f) SM-USB, IMKO



Fonte: (a) Campbell Scientific; (b) Specmeters; (c) IMKO; (d) Tektronics; (e) e (f) IMKO

#### 2.4.7 Principais métodos de calibração

Devido à variabilidade das características físicas do solo, os equipamentos utilizados para a estimativa indireta do teor de água do solo requerem calibrações locais, em condições de campo ou de laboratório, com a finalidade de incrementar a sua acurácia nas medidas do parâmetro mencionado (CRUZ *et al.*, 2010).

A partir de uma estimativa confiável de  $K_a$  é possível prosseguir com o andamento do ensaio e realizar as considerações matemáticas necessárias para obtenção do teor de umidade da amostra ensaiada. Muitos são os métodos desenvolvidos para a calibração do sistema TDR, sendo que os mesmos podem ser classificados em função da respectiva faixa de umidade volumétrica que se aplicam, ou em função de outras variáveis como, tipo de solo, índice de vazios e a quantidade de matéria orgânica (GRAMELICH, 2015).

Conforme abordado por Siddiqui e Drnevich (1995), os métodos de relacionamento entre a constante dielétrica aparente e a umidade volumétrica ( $K_a \leftrightarrow \theta$ ) são divididos de maneira geral entre os métodos empíricos e os métodos teóricos (também conhecidos como semi-empíricos). Eles complementam, que os métodos de calibração

empíricos são menos complexos, porém demandam maior conhecimento do tipo de solo e das condições específicas de calibração para estes. Já para os métodos teóricos, que embora a sua complexidade, apresentam maior acurácia, pois necessitam informações detalhadas das amostras de solo.

Essas calibrações são bastante representativas da relação entre a resposta dos equipamentos e o teor de água no solo. Para métodos dielétricos, de acordo com Dorneles e Ruivaró (2012), o procedimento de estimativa de uma curva de calibração de sensores de umidade do solo consiste na representação da relação entre o conteúdo volumétrico de água e a constante dielétrica aparente do solo determinado por um instrumento. Neste processo, adota-se tradicionalmente um modelo empírico referente a um tipo de solo específico. No entanto, o termo “curva de calibração” é considerado de forma indevida, pois não há uma caracterização no sentido metrológico, mas sim a obtenção de uma equação ajustada por modelo de regressão linear ou não linear (DORNELES e RUIVARO, 2012).

#### 2.4.7.1 Método de Topp *et al.*, (1980)

Uma das equações de calibração mais conhecidas e aplicadas nas geociências é a equação de calibração empírica de Topp *et al.* (1980) (Equação 8). Devido à sua simplicidade e aos resultados satisfatórios obtidos na aplicação desta, a mesma ficou conhecida como “equação universal”.

$$\theta = 4.3 \times 10^{-6} K_a^3 - 5.5 \times 10^{-4} K_a^2 + 2.92 \times 10^{-2} K_a - 5.3 \times 10^{-2} \quad (8)$$

Embora seja amplamente utilizada, muitos estudos demonstraram sua limitação e falta de abrangência teórica para ser considerada uma equação única e universal (ROTH *et al.*, 1990, SANTOS *et al.*, 2012, JACOBSEN e SCHJONNING, 1993, FERRÉ; TOPP, 2002).

### 2.4.7.2 Método One Step-Method

Um dos métodos de calibração mais aceitos e com um nível de acurácia relativamente alto, é o método apresentado Yu e Drnevich (2004), chamado de *One-step Method*, adotado como método padrão da ASTM D6780. No escopo da norma é delimitado o intervalo de aplicação do método, não sendo aplicável em casos de solos com elevado grau de matéria orgânica ou com elevada plasticidade. Porém ainda pode ser aplicável à solos que possuem no máximo 30% de partículas retidas na peneira (ASTM  $\frac{3}{4}$  - 19 mm). O método proposto envolve somente um ensaio *in situ* e utiliza além da variável principal  $L_a$ , outras duas variáveis  $V_0$  e  $V_f$ , que são referentes ao nível de voltagem em dois pontos distintos do sinal TDR. Estes dois valores referentes aos picos de voltagem servem para o cálculo do valor de Condutividade Elétrica Bruta (*Bulk Electrical Conductivity* -  $EC_b$ ) que é inversamente proporcional à resistividade do solo. Conforme Ramo *et al.* (1994), a condutividade elétrica de um solo, causa a atenuação na forma de onda obtida através da técnica TDR. Através da análise de atenuação da onda obtida, Dalton *et al.* (1984), expressou a condutividade elétrica do solo através dos níveis de voltagem verificados no eco do pulso injetado no solo (Equação 9).

$$EC_b = \frac{K_a^{0.5}}{120 \times \pi \times L_p} \times \ln\left(\frac{V_0}{V_f}\right) \quad (9)$$

Onde  $EC_b$  = Condutividade elétrica em dS/m (deciSiemens por metro);  $V_0$  = Primeiro nível de tensão medido no sinal TDR,  $V_f$  = Segundo nível de tensão medido no sinal TDR, geralmente entre 15 e 20 vezes a dimensão de  $L_a$  ao longo do tempo;  $L_p$  = comprimento das hastes utilizadas na sonda. Siddiqui e Drnevich (1995), sugeriram a utilização de uma equação de calibração que faz uso da umidade gravimétrica ( $w$ ), da densidade seca do solo ( $\rho_d$ ), da densidade da água ( $\rho_w$ ) além das constantes de calibração específicas para o solo em estudo (Equação 10).

$$\sqrt{K_a} \times \left( \frac{\rho_w}{\rho_d} \right) = a + b \times w \quad (10)$$

Já no estudo de Yu e Drnevich (2004), os mesmos sugeriram uma equação de calibração que possibilita a determinação do teor de umidade gravimétrico ( $w$ ) e da densidade seca do solo ( $\rho_d$ ), o qual é obtido através da utilização de uma equação de calibração que necessita do valor da constante dielétrica aparente  $K_a$  e da condutividade elétrica volumétrica  $EC_b$  da amostra de solo. Conforme abordou Sihvola (1999), a condutividade elétrica volumétrica dos solos é geralmente comandada pela condutividade elétrica volumétrica do líquido existente nos poros do solo, que é análogo ao efeito para gerar o valor da constante dielétrica aparente. Logo, por esta analogia Yu e Drnevich (2004), determinaram a seguinte equação (Equação 11).

$$\sqrt{EC_b} \times \left( \frac{\rho_w}{\rho_d} \right) = c + d \times w \quad (11)$$

Onde  $c$  e  $d$  = Constantes de calibração específicas para o solo, obtidas através de ensaios em laboratório. Através da resolução das (Equação 10 e 11) é possível obter os valores de umidade gravimétrica (Equação 12) e densidade seca (Equação 13).

$$w = \frac{c \times \sqrt{K_a} - a \times \sqrt{EC_b}}{b \times \sqrt{EC_b} - d \times \sqrt{K_a}} \quad (12)$$

$$\rho_d = \left( \frac{d \times \sqrt{K_a} - b \times \sqrt{EC_b}}{a \times d - c \times b} \right) \times \rho_w \quad (13)$$



## 3

## Materiais e métodos

Este capítulo abordará detalhadamente os materiais e métodos utilizados na elaboração desta dissertação. Os materiais utilizados são descritos através de duas abordagens, a primeira detalhando os recursos físicos utilizados, como: equipamentos, produtos químicos e aparatos laboratoriais e em um segundo tópico são descritos os recursos virtuais necessários para o desenvolvimento do sistema TDR, onde são apresentadas as linguagens de programação, módulos e bibliotecas utilizadas.

Os métodos e procedimentos utilizados apresentam a validação do sistema TDR formado pelo o osciloscópio de baixo custo MSO-19 e os procedimentos realizados na etapa de levantamento de requisitos, com o uso da metodologia *Design Failure Mode and Effects Analysis* – DFMEA para modelagem do sistema proposto. São descritas também as etapas realizadas para o desenvolvimento do software de controle.

### 3.1 Recursos físicos

#### 3.1.1 Osciloscópio testador de cabos Tektronix 1502C

Na realização dos ensaios, foi utilizado o osciloscópio testador de cabos 1502C da marca Tektronix (Figura 3.1). O equipamento é constituído de um osciloscópio tradicional que trabalha de forma sincronizada com um sistema gerador de sinal. Sua interface gráfica e seus comandos são preparados para serem utilizados com a finalidade de testar a qualidade de cabos, linhas de transmissão e circuitos eletrônicos. A utilização destes equipamentos na área de solos é adequada, visto que possui excelente resolução e possibilita uma medida confiável da constante dielétrica do solo em estudo. O modelo 1502C é encontrado a um preço médio de \$ 4.500 dólares nos Estados Unidos.

Figura 3.1 - Osciloscópio testador de cabos 1502C, marca Tektronix



#### 3.1.2 Osciloscópio miniaturizado USB - MSO-19

O osciloscópio miniaturizado modelo MSO-19, da marca Link Instruments (Figura 3.2), é equipamento que funciona conectado a um computador, através de uma conexão USB (*Universal Serial Bus*) e controlado através de software instalado no computador. Conforme contato com o fabricante, esse dispositivo foi criado com a intenção de fornecer aos usuários uma abordagem flexível de uso, sendo seu maior

destaque a união de portabilidade e desempenho com baixo custo, com um preço médio de \$ 250 dólares nos Estados Unidos.

Figura 3.2 - Osciloscópio USB – modelo MSO-19, marca Link Instruments



Este osciloscópio tem um acessório importante para esta pesquisa, que é um gerador de sinais integrado, sendo uma das funções deste gerador de sinal, possibilitar que o equipamento funcione como um testador de cabos, aplicando o princípio da técnica TDR.

### 3.1.3 Osciloscópio testador de cabos TDR100

O equipamento TDR modelo TDR100 (Figura 3.3), da empresa Campbell Scientific, é fabricado com foco na realização de medidas de umidade, sendo este o TDR comercial mais indicado para construção de robustos sistemas de medida, uma vez que possui uma elevada resolução (6.15 GHz). Uma desvantagem é não possuir display para visualização do sinal TDR gerado, sendo necessário a utilização de computador para posterior análise ou para programação/controle dos ensaios. Seu preço médio é \$ 4.500 dólares nos Estados Unidos.

Figura 3.3 - Osciloscópio testador de cabos TDR100, marca Campbell Scientific.

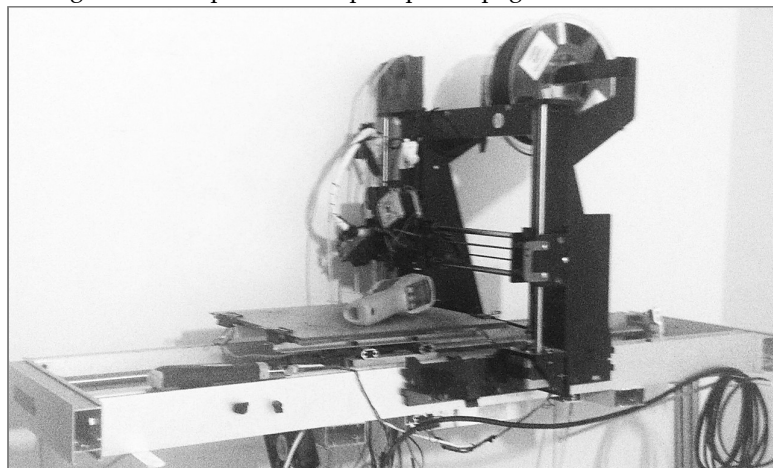


Fonte: Campbell Scientific, 2017

### 3.1.4 Impressora 3D

A impressora 3D utilizada (Figura 3.4), é um equipamento construído pelo autor deste trabalho através de um kit de projeto *Open Source* chamado REPRAP. A impressora 3D foi utilizada para impressão das sondas TDR de grande formato, que necessitaram um projeto personalizado para acondicionamento das hastes de 400 milímetros. A impressora possui uma área útil de impressão de (200 por 290) milímetros e uma altura de impressão de até 200 milímetros, com resolução vertical configurada para 200 micron. O filamento plástico utilizado nas sondas foi do tipo Ácido Polilático - PLA, com propriedades semelhantes ao Tereftalato de Polietileno - PET.

Figura 3.4 - Impressora 3D para prototipagem das sondas TDR



### 3.1.5 Computador Intel Computer Stick CS125

O computador da marca Intel, modelo *Computer Stick* CS125 (Figura 3.5), foi utilizado como servidor do sistema, devido a ter dimensões reduzidas, um consumo de energia baixo e ter em sua arquitetura interna um sistema X86, necessário para rodar o sistema operacional Windows 10, que é o requisito do software de controle do osciloscópio MSO-19, que por sua vez foi conectado à porta USB do CS125. Na outra porta USB do osciloscópio foi conectado um micro controlador da marca Atmel modelo 328P-PU, servindo para realizar o acionamento de periféricos necessários às funções do software de controle desenvolvido.

Figura 3.5 - Computador Intel, modelo *Computer Stick* - CS125



#### 3.1.5.1 Sistema de alimentação portátil do CS125

A alimentação do computador CS125 é normalmente feita através da fonte de alimentação fornecida pelo fabricante, com entrada para 127 ou 220 Volts. Porém para o uso do CS125 de forma portátil, foi necessária a adaptação de um regulador de tensão DC-DC (Figura 3.6), um dispositivo regulável para alimentação de equipamentos, sendo aplicado em situações que necessitem de 0 a 30 volts com um máximo de cinco amperes de corrente. O regulador de tensão é alimentado por um pequeno banco de

baterias de 8,4 Volts. O CS125 demanda uma alimentação de cinco volts e uma corrente máxima de dois amperes.

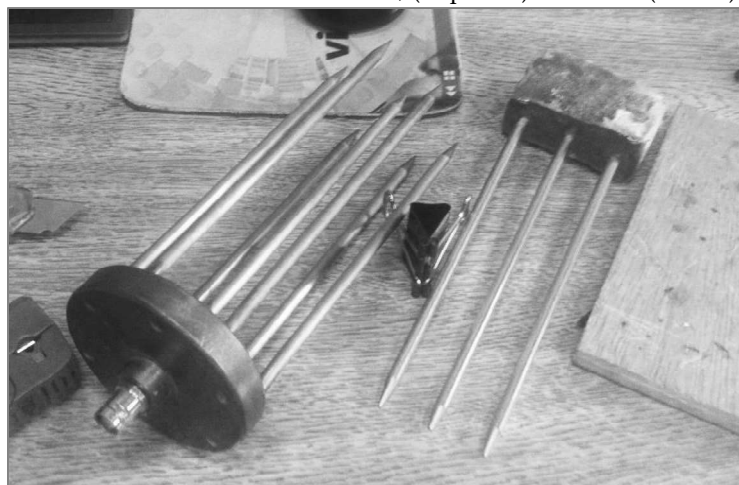
Figura 3.6 – Sistema de alimentação, (esquerda) conversor DC-DC e (direita) baterias de 8,4 Volts.



### 3.1.6 Sondas utilizadas

Foram utilizados vários tipos de sondas TDR ao longo dos ensaios realizados neste trabalho (Figura 3.7). As sondas TDR são geralmente construídas com hastes que atuam como linhas de transmissão, conduzindo os pulsos gerados pelo equipamento para o meio de interesse onde o ensaio está sendo realizado.

Figura 3.7 - Sondas TDR de 200 milímetros, (esquerda) 7 hastes e (direita) 3 hastes



A geometria e os materiais utilizados na construção das sondas TDR, influenciam o comportamento do sinal que será recebido pelo osciloscópio, tendo seu tempo ampliado ou reduzido em nanossegundos, conforme o comprimento dos eletrodos da sonda sejam ampliados ou encurtados fisicamente. Sua qualidade também é ampliada,

quando se faz uso de materiais e conexões que permitam a redução dos ruídos e interferências gerados ao longo do percurso das ondas eletromagnéticas.

### 3.1.7 Soluções líquidas

Para realização das calibrações do sistema TDR proposto, foram utilizadas soluções líquidas de ácido acético puro com adições de água deionizada. O propósito destas soluções líquidas foi o rígido controle de dosagens que pode ser obtido através das misturas, simulando através da variação de concentração a condição de um solo não saturado em vários teores de umidade.

### 3.1.8 Equipamentos de laboratório

Foram utilizados equipamentos comuns de um laboratório de solos, conforme apresentado abaixo:

- Balança de precisão: Marca Gehaka, modelo BG-4000, com erro  $\pm 0,1$  grama, carregamento mínimo: 0.50 gramas e máximo: 4040 gramas;
- Balança normal: Marca C&F, modelo não definido, com erro  $\pm 10$  gramas, carregamento mínimo: 250 gramas e máximo: 30 quilogramas;
- Bandeja metálica;
- Cápsulas de alumínio;
- Compactador;
- Ferramentas para coleta e mistura de amostras de solo;

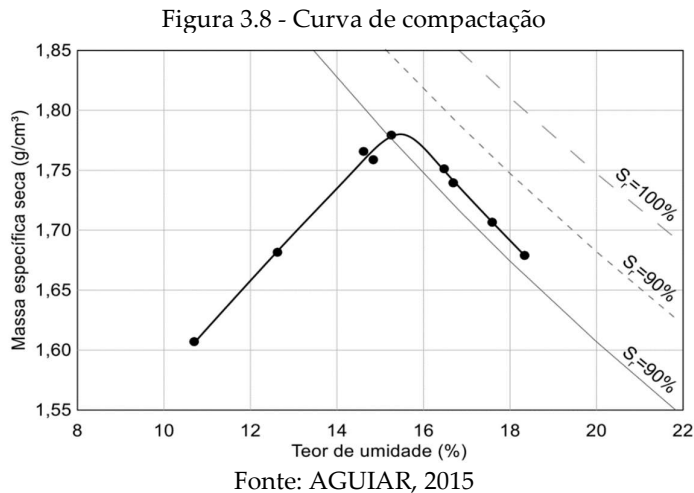
- Pipetas e provetas;
- Martelo de borracha;
- Estufa;
- Recipientes com marcações de altura interna.

### 3.1.9 Solo ensaiado

O solo utilizado neste trabalho foi coletado no Campus II da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, que fica localizado na cidade de São Carlos, (SP). Este solo foi escolhido por se tratar de um solo comum na região e ainda pela vasta disponibilidade de informações de suas propriedades físicas. Conforme Aguiar (2015), este solo está localizado sobre rochas do Grupo São Bento, no qual fazem parte arenitos da Formação Botucatu e rochas básicas da Formação Serra Geral. Trata-se de um solo com granulometria com 59% de areia, 9% de silte e 32% de argila.

Além dos ensaios de caracterização, também foi realizado o ensaio de compactação na energia Proctor Normal de acordo com as especificações da ABNT NBR 7182 (1986). A curva de compactação foi obtida a partir de nove corpos de prova, que forneceram como resultado uma massa específica seca máxima de  $1,780 \text{ g/cm}^3$  e teor de umidade ótimo de 15,5% (Figura 3.8). Segundo Aguiar (2015), estes resultados foram próximos aos obtidos em trabalhos anteriores com o solo coletado na mesma região (SILVA, 1996; ARAÚJO, 1996; AQUINO FILHO, 1995; GEORGETTI, 2010 e 2014).



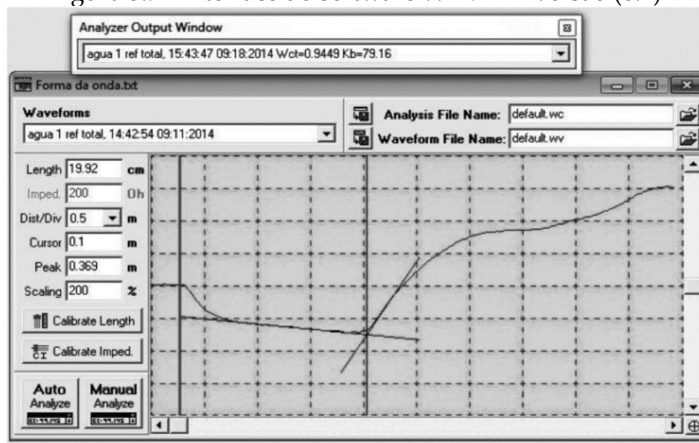


## 3.2 Recursos virtuais

### 3.2.1 Programa WinTDR

O programa WinTDR foi utilizado nos ensaios comparativos entre o sistema tradicional (WinTDR + Tektronix 1502C + Sonda de 7 hastes e o método *One Step Method*) e o sistema proposto (Software EASYTDR + MSO-19 + Sonda de 7 hastes e o Método *One Step Method*). O software WinTDR permite o controle e a visualização do sinal TDR gerado após a emissão do pulso na sonda utilizada, realizando o controle do equipamento 1502C, através de um adaptador USB conectado à porta serial (RS232). O software também permite localizar de forma automática os níveis de tensão  $V_0$  e  $V_f$ , além do valor de  $L_a$  para cálculo automático dos valores de  $K_a$  e  $EC_b$ . Neste trabalho, foi utilizada a versão 6.1 do software, lançada em meados de 2004 (Figura 3.9).

Figura 3.9 - Interface do software WINTDR versão (6.1)

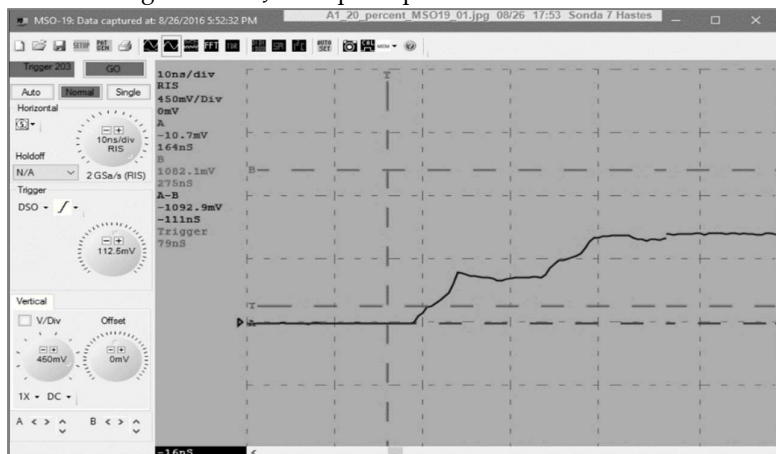


Desde a versão 6.1, o software WinTDR não recebeu atualizações. Dessa forma, para seu funcionamento e total compatibilidade, é necessário o uso de máquinas virtuais para a instalação de sistemas operacionais antigos, como o Microsoft Windows XP.

### 3.2.2 Programa MSO-19

O programa MSO-19 é o software de controle que acompanha o osciloscópio USB da empresa Link Instruments, modelo MSO-19. O mesmo funciona como sistema de controle e display das medidas realizadas pelo equipamento conectado na porta USB do computador em que está instalado, sendo utilizada a versão 1.5f.

Figura 3.10 - Janela principal do software MSO-19

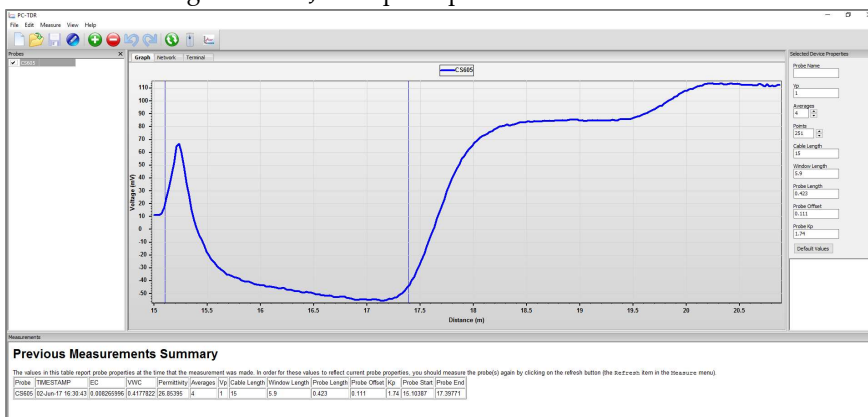


O software permite ainda realizar a configuração de padrões para o gerador de sinais (um dos acessórios deste modelo de osciloscópio) e ainda realizar medidas conforme configurações definidas pelo usuário, com a possibilidade de salvar em um arquivo de texto os dados referentes às leituras do osciloscópio, sendo esta a principal fonte de entrada no software EASYTDR desenvolvido neste trabalho.

### 3.2.3 Programa PC-TDR

O programa PC-TDR é o software de controle do osciloscópio testador de cabos TDR100 da empresa Campbell Scientific (Figura 3.11). Seu funcionamento se dá através de um adaptador USB conectado à porta serial (RS232) do equipamento TDR100. No software podem ser realizadas configurações gerais, como tipo de sondas e equações de calibração.

Figura 3.11 - Janela principal do software PC-TDR

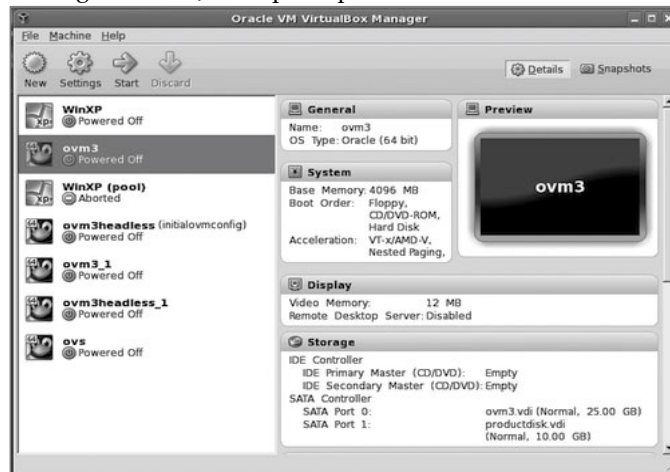


### 3.2.4 Sistema Oracle – VirtualBox

O sistema Oracle VirtualBox é um software que permite a instalação de “sistemas operacionais virtuais” dentro de um “sistema operacional portador” (Figura 3.12). O software possibilita a criação hardware virtuais para posteriormente instalação de sistemas operacionais completos e permitir a utilização destes como se estivessem sido

instalados em hardwares dedicados. Isto permite, por exemplo, a instalação de um sistema operacional Linux rodar dentro do sistema operacional Windows.

Figura 3.12 - Janela principal do software VirtualBox



O VirtualBox é um software *Open Source*, gratuito e de simples instalação e utilização. Para este trabalho, ele permitiu a criação de uma máquina virtual rodando o sistema operacional Microsoft Windows XP, dentro de um sistema operacional portador rodando a versão 10 do Windows. Assim, foi possível a instalação do software WinTDR e seu uso para controle e realização dos ensaios desta pesquisa.

### 3.2.5 Linguagens PHP e ECMAScript (*Javascript*)

Para desenvolvimento do software de controle do sistema TDR, foi utilizada a linguagem PHP, tendo em vista o domínio da mesma por parte do autor deste trabalho e ainda por atender aos requisitos de funcionamento estabelecidos para o programa de controle desenvolvido, intitulado como EASYTDR. A linguagem PHP está presente em mais de 82% dos websites da internet e é considerada uma das linguagens de programação mais estáveis atualmente (W3TECHS, 2017).

### 3.2.6 Framework Bootstrap, JQuery, D3 e PHP Desktop

Para a construção da parte gráfica do software de controle, foi utilizado o framework Bootstrap, assim como a biblioteca Javascript JQuery (necessária para a realização de transições entre janelas e inserção de interatividade para o usuário do software). Foi também utilizada a biblioteca Javascript D3 para a construção de gráficos interativos formados a partir dos dados gerados pelo osciloscópio MSO-19, após o tratamento dos mesmos com algoritmos construídos com a linguagem PHP.

Foi utilizado o Framework PHP Desktop, para a criação de software instalável e compatível com as plataformas Windows, Linux e Mac OS. O mesmo permite que um sistema criado como um website, funcione como um software para desktop, juntando os benefícios de um software desktop com os de um sistema web. Esta característica, facilita o desenvolvimento de banco de dados sincronizados com a nuvem e o funcionamento como um servidor local, sendo este um dos principais benefícios para o sistema TDR proposto, que por sua vez permite ao software EASYTDR ser controlado através de redes locais ou à distância através da internet.

### 3.2.7 Framework MathJax, Latex e Katex

Para desenvolvimento do sistema de equações do software EASYTDR foi utilizado o Framework MathJax que é um mecanismo para exibição de notações matemáticas em sistemas web e dispositivos móveis, como smartphones e tablets. Para representação gráfica das equações, o software utiliza a biblioteca Katex, que é baseada no sistema Latex, mundialmente aceito como padrão para criação de equações matemáticas em ambiente computacional.

### 3.3 Método para validação do sistema TDR proposto

A validação do sistema TDR de baixo custo foi realizada através de ensaios empregando o sistema TDR proposto e o sistema TDR “tradicional”, utilizando o equipamento Tektronix 1502C, nos laboratórios de Mecânica dos Solos do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos/USP. Inicialmente foram realizados diversos ensaios preparatórios e a aplicação da técnica DFMEA para levantamento inicial dos possíveis modos de falha e a identificação dos riscos gerais de obtenção de medidas de  $K_a$  de forma incorreta.

#### 3.3.1 Design Failure Mode and Effects Analysis - DFMEA

A avaliação do sistema TDR foi realizada através do método *Design Failure Mode and Effects Analysis* - DFMEA, que é a mesma do método FMEA, definido como: *um método qualitativo de análise de confiabilidade que envolve o estudo dos modos de falhas que podem existir para cada item, e a determinação dos efeitos de cada modo de falha sobre os outros itens e sobre a função específica do conjunto* (ABNT NBR 5462, 1994). O método, quando aplicado na etapa de desenvolvimento de um produto ou serviço, permite a classificação dos itens que tem maior probabilidade de comprometer a confiabilidade geral do sistema, agregando confiabilidade e desempenho ao longo da vida útil de serviço. Através da aplicação do método, é obtido um índice conhecido como “Número de Prioridade de Risco - NPR”, que é o produto obtido através da multiplicação dos índices relativos à: Ocorrência, Severidade e Detecção. Através de um formulário padrão, sistematicamente planejado para ser preenchido com os itens do sistema, é possível o conhecimento dos modos de falha. Os quais permitem a tomada de providências já na fase de projeto, evitando a manifestação dos modos de

falha críticos e auxiliando nos aspectos de manutenibilidade e confiabilidade dos equipamentos avaliados.

Conforme sintetizado por ISIXSIGMA, (2016), para a aplicação do método são necessárias as seguintes etapas:

1. Análise de relação entre componentes do sistema, podendo estes ser projetos, protótipos ou demais documentos que possibilitem uma análise geral de relação entre as partes constituintes do equipamento/serviço;
2. Realização de Brainstormings com foco em potenciais de falha e situações de uso que proporcionem risco ou falha provável;
3. Listagem dos potenciais modos de falha;
4. Listagem dos efeitos decorrentes da existência de um modo de falha;
5. Determinação de uma nota de severidade (entre 1 e 10), baseada nas consequências que os efeitos de um modo de falha pode causar (considerando riscos com a vida humana, acidentes ou segurança, como severidade igual a 10);
6. Determinação de uma nota (entre 1 e 10), para a probabilidade de frequência de ocorrências do modo de falha;
7. Determinação de uma nota (entre 1 e 10), para a probabilidade de não detecção do modo falha durante uma rotina normal de trabalho (sendo 1 para falhas de fácil detecção e 10 para falhas de difícil detecção);
8. Cálculo do valor de NPR, através do produto das notas geradas através dos passos anteriores, que são determinadas em função da ocorrência, severidade e detecção;
9. Desenvolvimento de um plano de ação para reduzir as maiores notas de NPR obtidas nas etapas anteriores;
10. Implementação de um plano de ação do item 9 em cada modo de falha identificado com elevado;

11. Realização das etapas 1 a 10 novamente, com o objetivo de aprimorar a análise e identificar novos e/ou antigos modos de falha que ainda estejam com NPR elevado.

### 3.3.2 Preparação das amostras de solo

O solo foi preparado através de procedimento da ASTM D698, com amostras do solo compactadas em diferentes teores de umidade (10%, 15% e 20%), realizado de forma a atingir uma massa específica seca de  $1.45 \text{ g/cm}^3$ . O procedimento de preparação ocorreu conforme as seguintes etapas:

1. A amostra de solo foi acondicionada durante um período de 24 horas até atingir a umidade higroscópica.
2. Posteriormente um conjunto de cápsulas com o solo, foi pesado e seco em estufa, à uma temperatura de  $100^\circ\text{C}$  por 24 horas a fim de determinar a umidade gravimétrica da amostra de solo acondicionada no primeiro item.

A amostra então foi destorroadada e passada pela peneira N° 4, sendo posteriormente separada em seis sacos plásticos com 15 kg para a preparação das amostras na umidade gravimétrica desejada (Figura 3.13).

Figura 3.13 - Separação dos sacos de amostra com 15 Kg





3. Posteriormente, foi adicionada a quantidade de água (água de torneira) suficiente para alcançar uma umidade gravimétrica igual a 10%, 15% e 20%. Após as amostras serem molhadas, foram homogeneizadas manualmente e peneiradas duas vezes. Para cada teor de umidade, foi preparado um par amostras (Figura 3.14).

Figura 3.14 - Umedecimento das amostras de solo



4. Após umedecimento as embalagens com as amostras foram lacradas e colocadas em repouso para homogeneizar por um período de 24 horas (Figura 3.15).

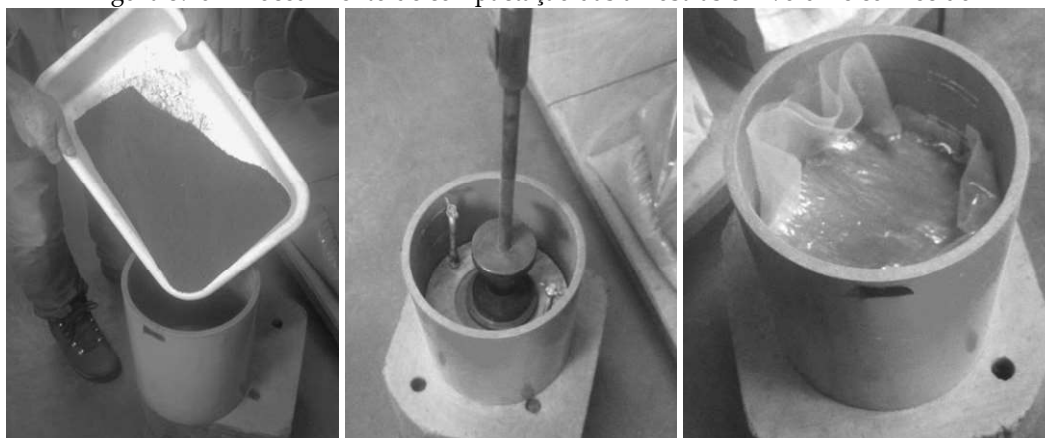
Figura 3.15 - Amostras de solo lacradas em processo de homogeneização



Após as amostras estarem com uma umidade interna uniforme, foi realizada a preparação das amostras em um cilindro de PVC com volume e peso previamente conhecidos ( $\varnothing = 203 \text{ mm}$ ,  $h = 240 \text{ mm}$ ). O cilindro possui uma

marcação interna para que as camadas tenham exatamente 60 milímetros de espessura. Com isto, foi realizado o cálculo da massa total de material necessário para preencher cada camada do cilindro, considerando uma massa específica seca de  $1.45 \text{ g/cm}^3$  ( $\rho_d = 1.45 \text{ g/cm}^3$ ) com os respectivos valores de teor de umidade da amostra a ser preparada. Cada camada foi compactada com uma base metálica que abrange quase toda a área do cilindro deixando uma folga de apenas 4 mm. Utilizou-se um soquete de 5 kg de massa, aplicando-se um número de golpes necessários para se atingir a altura da camada previamente definida (Figura 3.16).

Figura 3.16 - Procedimento de compactação das amostras em volume conhecido



### 3.3.3 Ensaio TDR convencional e de baixo custo

O ensaio TDR se procedeu através da leitura da constante dielétrica aparente  $K_a$  e da condutividade elétrica aparente  $EC_b$  do solo com o equipamento 1502C. Posteriormente com a mesma sonda, foi realizada a troca do equipamento de medição e realizada nova aquisição com o equipamento MSO-19, possibilitando a obtenção do sinal TDR por ambos os equipamentos em um mesmo solo utilizando uma mesma sonda (Figura 3.17).

Figura 3.17 - Equipamentos e a amostra de solo a ser ensaiada



Inicialmente o ensaio foi realizado com o equipamento Tektronix 1502C juntamente com o software WinTDR, sendo que para este as etapas foram as seguintes:

1. Realização da conexão do testador de cabos 1502C ao computador através do adaptador RS232 USB/Serial, com instalação prévia do driver do adaptador. No Windows XP, acessar gerenciador de dispositivos (em inglês *device manager*) e identificar a o número da porta COM, “COM port” (também denominada portal serial), onde o adaptador foi conectado.
2. No programa WinTDR, ir na janela “communications”, “Tektronix Setting” e selecionar a porta COM identificada no item anterior, através da opção “Port”;
3. Realizar uma medição experimental para checar a conexão entre o computador/WinTDR e o testador de cabos 1502C;

Posteriormente através de medições realizadas no software Excel, foram determinados os valores de  $V_0$ ,  $V_f$ , e  $L_a$  para cálculo do valor de  $K_a$  e  $EC_b$ . Após a obtenção das

informações foi computado o valor do teor de umidade gravimétrico ( $w$ ) através do Método “B” (*One-step Method*) da norma ASTM D6780 de 2012. Foram realizados em torno de 250 ensaios TDR, contabilizando uma média de 50 leituras para cada uma das cinco condições de umidade 0%, 10%, 15%, 20% e 100%. Ainda foram realizados outros ensaios para determinação de teores de umidade intermediários, que são necessários para a obtenção das constantes  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $f$  e  $g$ , utilizadas no método *One-Step Method*. O software Excel foi utilizado como plataforma de plotagem e cálculo das equações apresentadas neste trabalho.

## 4

## Resultados e Discussão

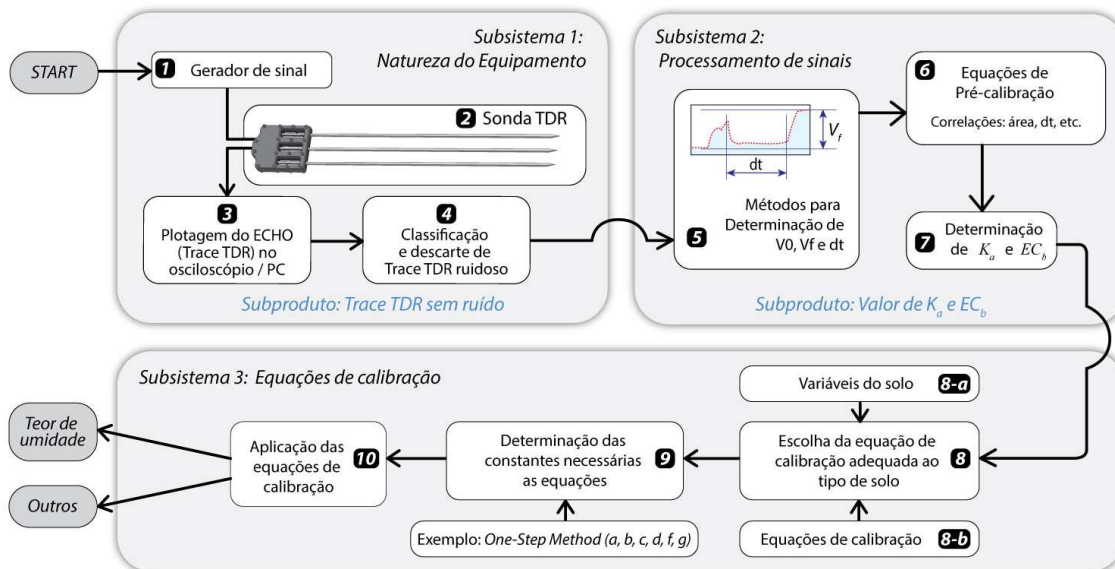
São apresentados neste capítulo os resultados e discussões relativos ao desenvolvimento do sistema TDR proposto, composto pelo software de controle e por sondas customizadas para o osciloscópio de baixo custo MSO-19. Os resultados apresentados nesta seção estão organizados de maneira cronológica, seguindo os passos realizados durante a elaboração deste trabalho, os quais destacam-se: a análise de requisitos do sistema TDR proposto e de desempenho dos equipamentos utilizados, o software criado para análise e realização dos ensaios TDR e as sondas TDR criadas de forma customizada para uso com o osciloscópio MSO-19. São ainda apresentados resultados referentes a casos de uso, sendo expressos através de tabelas e gráficos comparativos, tendo como base o equipamento TDR100 e o software PC-TDR desenvolvidos pela companhia Campbell Scientific.

## 4.1 MSO-19 aplicado a solos: DFMEA e desempenho

### 4.1.1 Design failure mode and effects analysis – DFMEA

Conforme avaliado na bibliografia e durante o desenvolvimento dos ensaios, foram sintetizadas as variáveis comuns da tradicional abordagem de construção de um sistema TDR aplicado na área de solos, sendo possível dividir o sistema TDR em subsistemas que trabalham de forma integrada para permitir o conhecimento do teor de umidade do solo. A aplicação da metodologia DFMEA à técnica TDR permitiu a construção de um diagrama que agrupa a visão geral do sistema e suas subdivisões (Figura 4.1). Através deste, foi possível observar que um sistema TDR é composto por basicamente três subsistemas em série, os quais podem ser descritos como: um relativo à natureza do equipamento, outro relativo às técnicas de processamento de sinais, e um terceiro relativo às equações de calibração que moldarão de forma final o produto do sistema TDR.

Figura 4.1 - Workflow de sistema TDR típico e seus subsistemas



Na avaliação DFMEA realizada, puderam ser identificados 23 modos de falha, com notas NPR variando entre 4 e 810. Do montante, sete ficaram com nota inferior a 200 e

12 com notas entre 200 e 750. Os modos de falha acima de 750 são apresentados de forma resumida no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Resultado resumido da análise DFMEA – TDR

Elemento ou Subsistema	Função do processo	Potencial modo de falha	SEVERIDADE	Potenciais causas – Mecânica da falha	OCORRÊNCIA	Algum controle?	DETECÇÃO	NPR
Subsistema (1) Natureza do equipamento	Originar o sinal TDR	Elevado grau de ruído no sinal TDR.	10	Falhas de projeto eletrônico ou carência de filtros adequados para medições de 2GSa/s	8	Não	10	<b>800</b>
Subsistema (2) Processamento de sinais	Determinação de $V_0$ , $V_f$ , e $L_a$	Locação indevida dos pontos de inflexão que determinam $L_a$ .	10	Algoritmo de detecção com limitações ou sinal TDR obtido de maneira diferente da prevista em projeto.	9	Não	9	<b>810</b>
Subsistema (3) Equações de calibração	Determinação do teor de umidade	Utilização de uma equação de calibração inadequada para o solo em estudo.	10	Informações insuficientes com relação a área de abrangência de cada equação.	8	Não	10	<b>800</b>
		Valores reais de $K_a$ diferentes dos valores de $K_a$ imputados nas equações de calibração.	10	Inexistência de um processo de calibração específico para sonda/solo.	8	Não	10	<b>800</b>

O subsistema 1, relativo à natureza do equipamento apresenta somente um modo de falha, possuindo um NPR igual a 800, devido ao nível de ruído do sinal TDR durante a realização dos ensaios. No subsistema 2, relativo ao processamento de sinais, o modo de falha com maior relevância, teve nota NPR igual a 810 e faz referência ao procedimento de localização dos valores de  $V_0$ ,  $V_f$ , e  $L_a$ . Já no subsistema 3, relativo às

equações de calibração, apresentou dois modos de falha com NPR igual a 800, um relacionado à existência de uma grande quantidade de equações de calibração, que podem ser aplicadas de maneira inadequada, e outro relativo a valores de  $K_a$  não adequados para utilização nas equações atualmente disponíveis.

#### 4.1.2 Análise de desempenho MSO-19 Vs. 1502C

No decorrer dos ensaios realizados com o equipamento MSO-19, 70% deles apresentaram elevado ruído, impossibilitando a utilização dos sinais TDR gerados para determinação dos parâmetros " $V_0$ ", " $V_f$ ", e " $dt$ ". Esses ensaios ruidosos pode ter sido gerados por diversos motivos, como pela falta de um sistema de filtragem no interior do equipamento de medição, da ocorrência de ondas eletromagnéticas próximas ao ensaio, ou ainda devido à deficiências de amostragem no software responsável pela apresentação dos sinais obtidos através do equipamento. Sendo este último a provável causa, visto que para uma amostragem superior a 200 MSa/s (o equipamento vai até 2GSa/s) o equipamento utiliza uma função de mixagem de *trigger*, criando assim uma resolução ampliada, que proporciona um ganho de resolução de até 10 vezes em realização a resolução normal do equipamento.

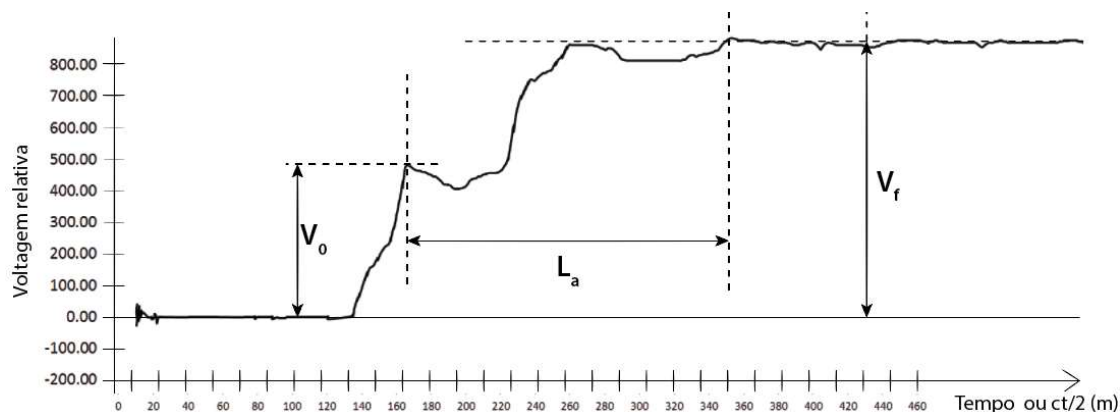
A técnica de mixagem de *trigger* é uma solução comum e consolidada em de aquisição como osciloscópios, realizando a repetição de um ensaio de 200 Msa/s, com a variação do tempo de início da tomada de leituras. Após a varredura de um espaço amostral, os valores são processados e sobrepostos, formando um sinal TDR único com uma resolução dez vezes maior. Embora esta solução seja viável, em média 36% geraram elevado ruído e 34% deles ruído intermediário, totalizando em torno de 70% de descarte dos sinais TDR gerados com o equipamento MSO-19 na resolução de 2GSa/s.

Os ensaios que não apresentaram ruído foram utilizados para o procedimento do subsistema 2. Foi constatado que devido ao equipamento MSO-19 ter uma resolução



inferior à do equipamento 1502C, o mesmo apresentou uma plotagem do sinal TDR menos detalhada, impossibilitando a coleta do comprimento de  $L_a$  com o método tradicional das tangentes, geralmente aplicado na segunda reflexão do sinal TDR. Devido a isso, a medida  $L_a$  foi realizada através do mesmo método das tangentes, porém com seu início na primeira reflexão e o segundo ponto através da terceira reflexão (Figura 4.2). Após a adoção deste procedimento para a obtenção do valor de  $L_a$  foi realizada uma correlação de calibração entre o tempo (em nanosegundos) e o valor previsto de  $K_a$  para o mesmo solo, obtendo uma equação de calibração intermediária, (Equação 14).

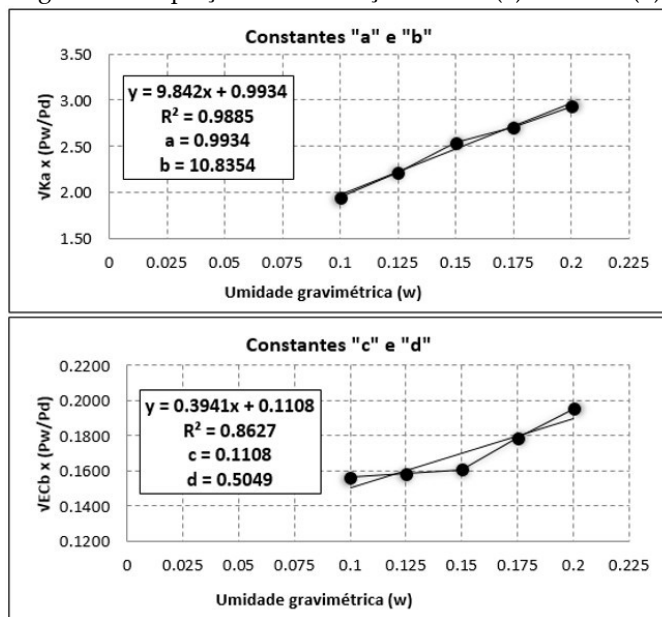
Figura 4.2 - Método das tangentes aplicado na primeira e terceira inflexão



$$K_a = 0.0564 \times L_a^3 - 4.7329 \times L_a^2 + 133.21 \times L_a - 1245.9 \quad (14)$$

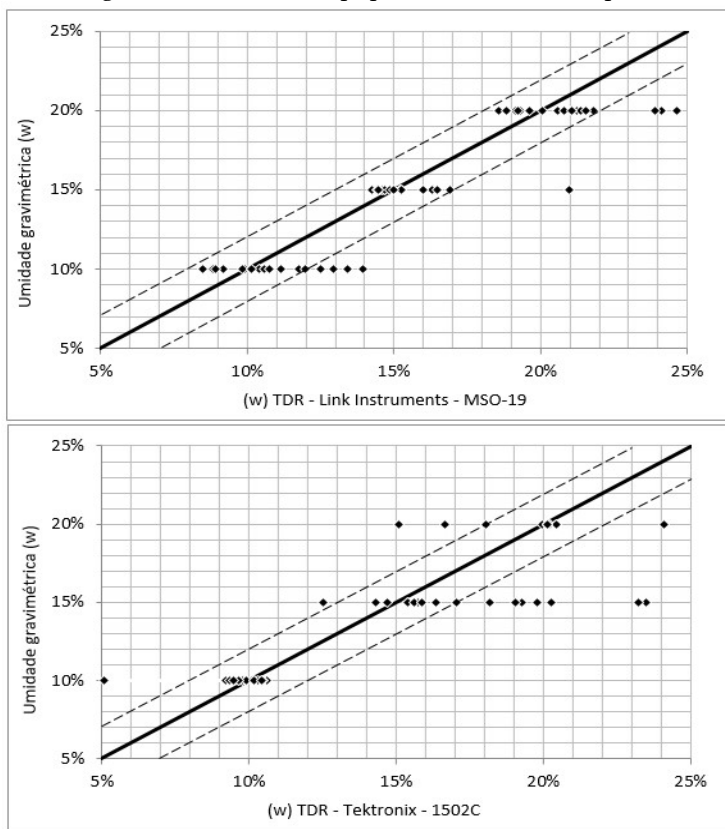
Após o cálculo estimativo do valor de  $K_a$ , foram realizados os cálculos para determinação das constantes de calibração para aplicação no método *One-step Method* (Figura 4.3).

Figura 4.3 - Equações de correlação "a - b" (a) e "c - d" (b)



Posteriormente, através da aplicação da equação (Equação 12), computada a umidade gravimétrica (Figura 4.4).

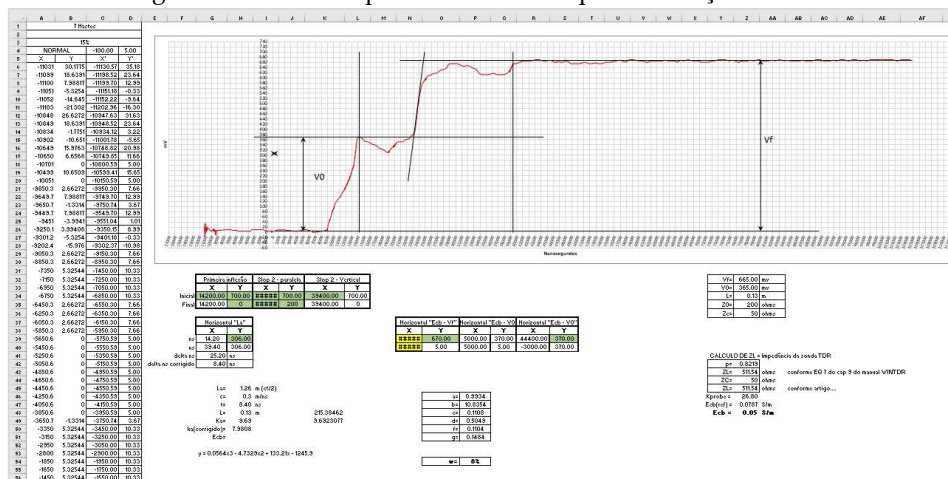
Figura 4.4 - Umidade gravimétrica com o equipamento MSO-19 (superior) e 1502C (inferior)



Os valores determinados para o teor de umidade com o uso do osciloscópio MSO-19 foram satisfatórios, possuindo um desvio padrão médio de 2% e apresentado comportamento semelhante aos valores obtidos com o sistema Tektronix 1502C, que também possuem um desvio padrão médio de 2%.

As maiores dificuldades encontradas ao longo da realização dos ensaios comparativos se deram em função do equipamento MSO-19 ser voltado para uso geral, e também pelo software de controle não permitir uma análise específica para a área de solos. Dado estes problemas, o sinal TDR gerado foi levado para o software Excel, onde foram obtidos os valores de interesse através de processamento manual, para definição de linhas e células com as devidas equações (Figura 4.5).

Figura 4.5 - Interface planilha de análise para validação MSO-19



## 4.2 Software EASYTDR

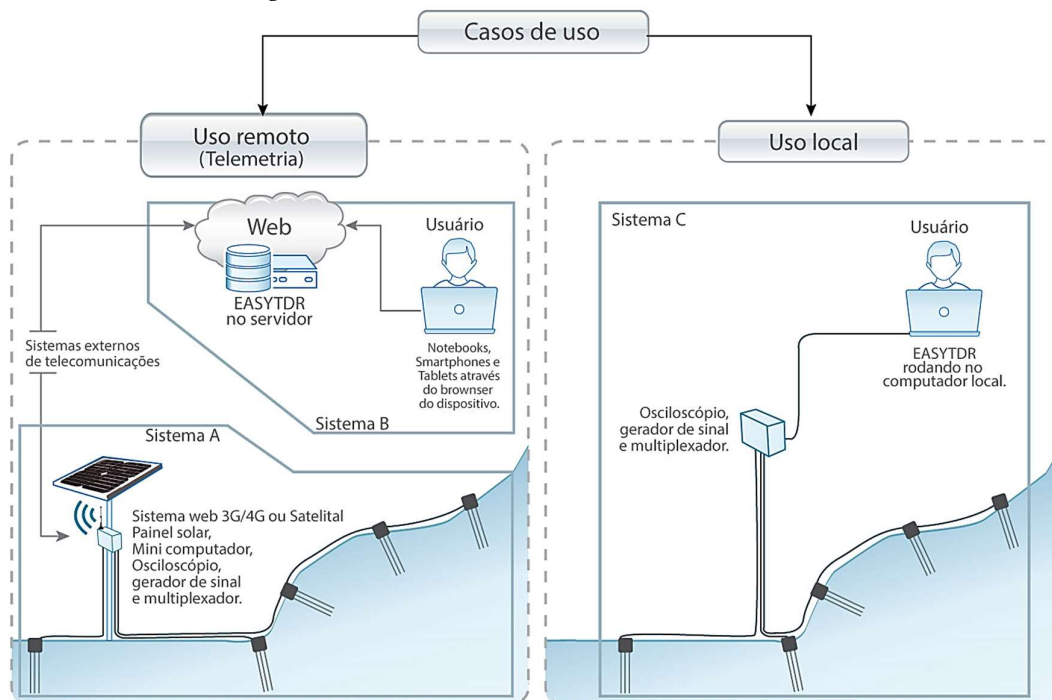
O software desenvolvido foi intitulado de maneira provisória como EASYTDR, devido a maneira simples com que permite a realização de análises e comparações dos resultados de ensaios TDR. Até o momento, os sistemas suportados pelo software EASYTDR são os construídos através da combinação de softwares e hardwares comerciais, como: Software WinTDR em conjunto com o Hardware Tektronix 1502C,

Software PC-TDR em conjunto com Hardware TDR100 ou TDR200 da companhia Campbell Scientific e o Sistema TDR de baixo custo através do software EASYTDR, sondas customizadas de 400 mm e o equipamento MSO-19.

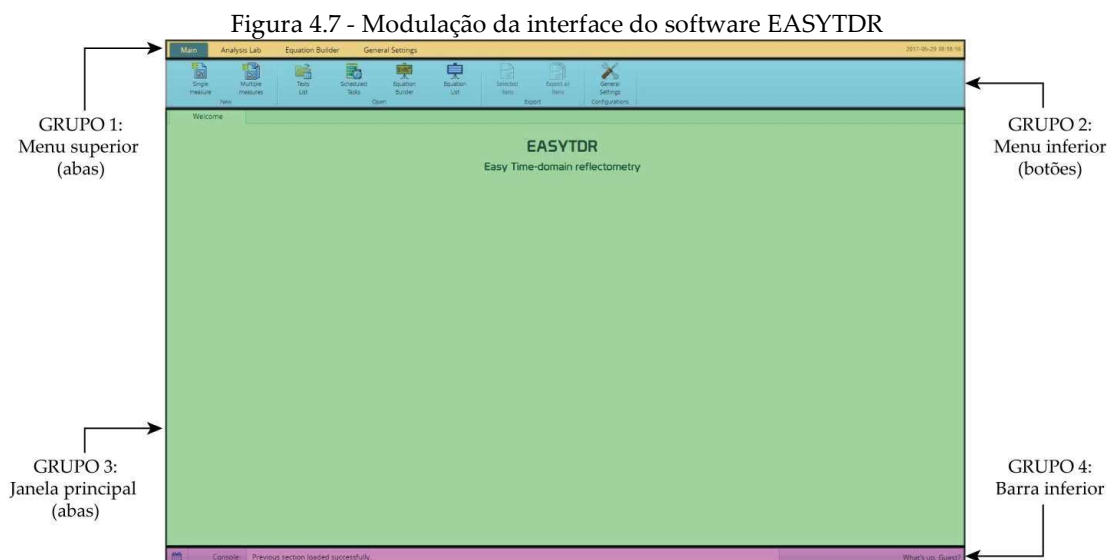
#### 4.2.1 Características gerais para instalação e operação

O software EASYTDR pode ser instalado em computadores com sistemas operacionais Windows, Linux ou Mac. Devido à linguagem de programação e à arquitetura de software utilizada, também pode ser utilizado de forma similar aos sistemas web tradicionais, como por exemplo os serviços de e-mail ou de armazenamento em nuvem. Esta característica permite funcionar em um computador local, através de instalação ou de maneira remota em servidores, importante para o uso em ensaios de longa duração e em locais remotos, possibilitando uma aplicação completa de telemetria TDR (Figura 4.6).

Figura 4.6 - Casos de uso remoto (telemetria) e local



A interface do software EASYTDR está organizada através de uma disposição modular, separada por quatro grupos que permitem a navegação pelas funções do software, sendo estas apresentadas na Figura 4.7.



O grupo um, Menu superior, aciona a abertura de visualização das funções do grupo dois, Menu inferior, conforme Figura 4.8.

Figura 4.8 - Visualização das opções do menu superior e inferior

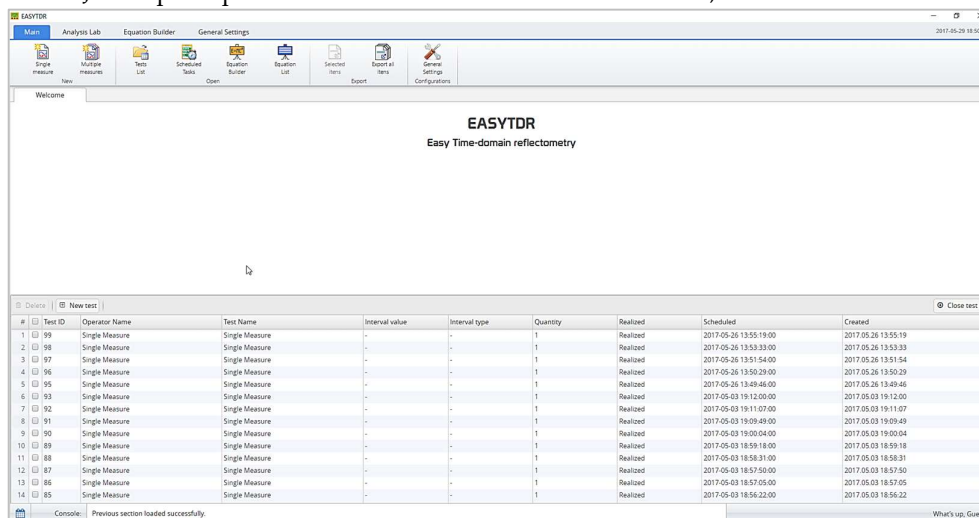


## 4.2.2 Principais janelas e funções

### 4.2.2.1 Janela inicial - Welcome

No momento da abertura, a janela principal apresenta de maneira sintetizada as ações que usuário pode realizar, a qual é intitulada “Welcome” (Figura 4.9).

Figura 4.9 - Janela principal com a lista de medidas realizadas aberta, aba “Main” e botão “Test list”



A aba “Main” do Menu superior, apresenta um resumo das funções do software, onde através do Menu inferior, podem ser acessadas funções específicas, divididas em grupos de ações, como: “New”, “Open”, “Import”, “Export” e “Configurations”. No grupo “New”, foram inseridos dois botões, o primeiro chamado “Single measure” usado para criação de ensaios com uma tomada de medida, e o segundo “Multiple measures” usado para agendar ensaios com medidas múltiplas, programados em uma de data de início específica, espaçadas por um intervalo de tempo definido pelo usuário.

No grupo “Open” foram inseridos quatro botões, sendo o primeiro “Test List”, responsável pela abertura da lista de medidas realizadas, o segundo “Scheduled Tasks”, pela abertura da lista de medições programadas, o terceiro “Equation Builder”, pela

abertura da janela para criação de novas equações e o quarto *"Equation List"*, pela abertura da lista de equações salvas no sistema.

No grupo *"Import"* foram inseridos dois botões, um para a importação de uma medida realizada de forma isolada, botão *"Import Single Measure"* (Figura 4.10) e o outro referente a importação de medidas múltiplas *"Import Multiple Measures"* (Figura 4.11). O usuário poderá importar arquivos do formato *"MSD"*, referente ao software MSO-19 da companhia Link Instruments, formato *"TDR"*, referente ao software TDR100 da companhia Campbell Scientific e formato *"wc"* e *"wv"*, do software WinTDR.

Figura 4.10 - Janela *"Import Single Measure"*

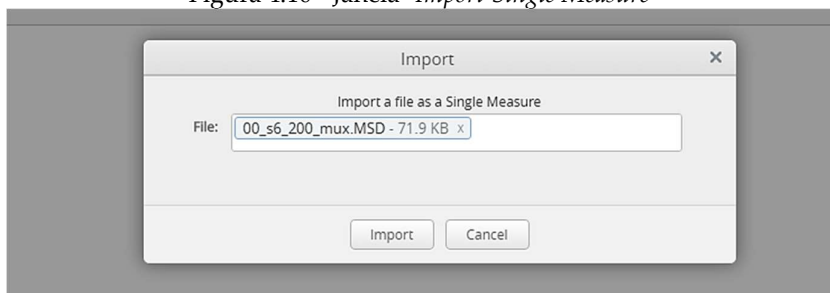
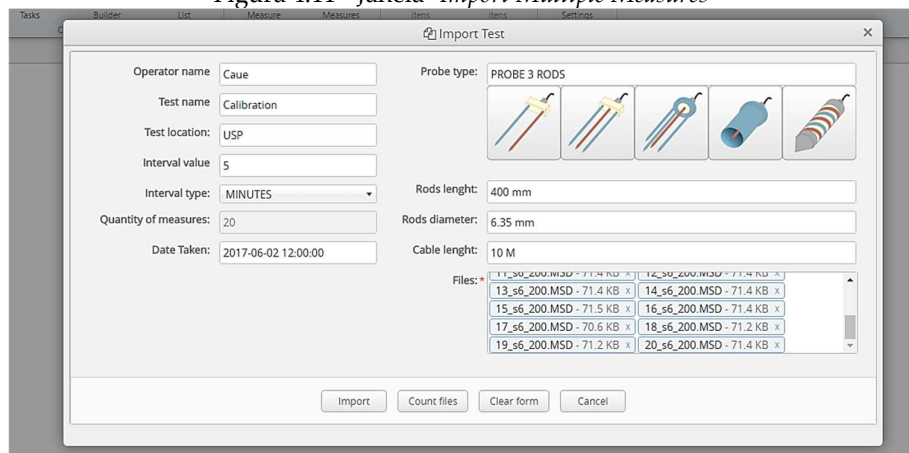


Figura 4.11 - Janela *"Import Multiple Measures"*

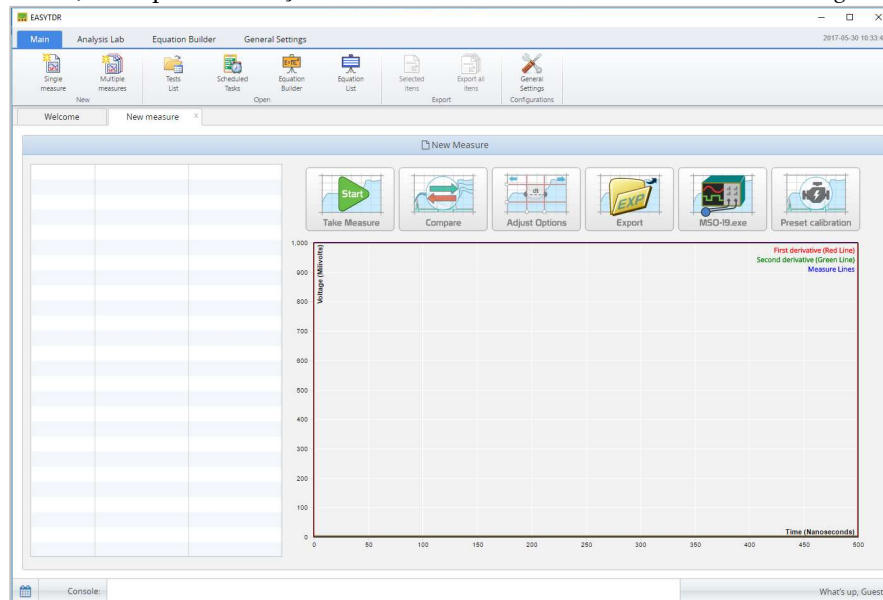


#### 4.2.2.2 Função de Medida Única – *Single Measure*

A função *"Single measure"* aciona a abertura de uma nova aba no grupo três, Janela principal, criando a aba intitulada *"New measure"* onde são apresentadas as seguintes

funções (Figura 4.12) ao usuário: *“Take Measure”*, *“Compare”*, *“Adjust Options”*, *“Export”*, *“MSO-19.exe”* e *“Preset calibration”*.

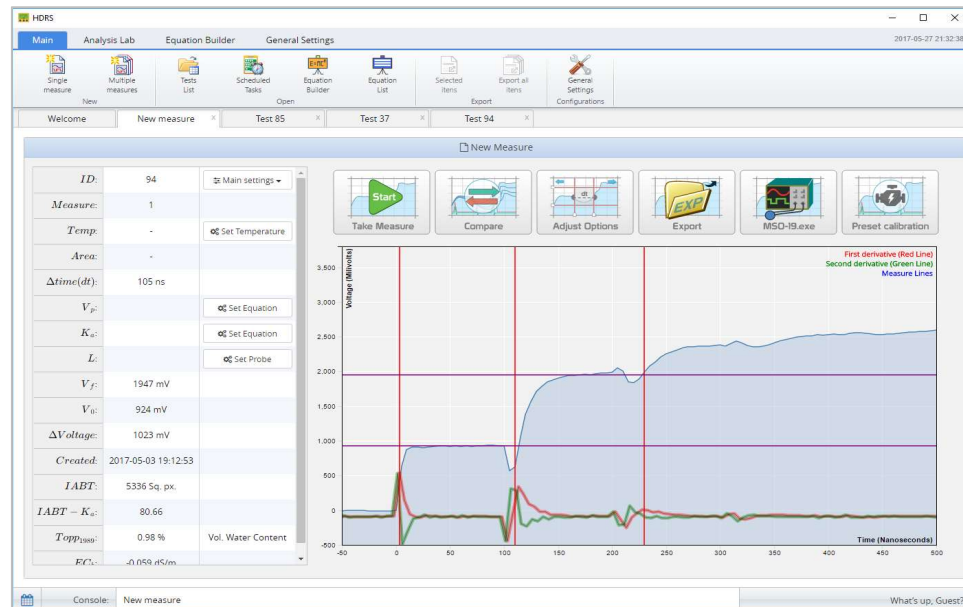
Figura 4.12 - Janela para realização e análise de medidas, aba *“Main”* e botão *“Single Measure”*



Através do botão *“Take measure”* o usuário pode iniciar um ensaio TDR a partir dos equipamentos cadastrados previamente configurados para tomada de medida automática. Através desse botão, o usuário pode abrir medidas realizadas e iniciar o processo de análise diretamente na janela *“Single Measure”* (Figura 4.13).

Figura 4.13 - Janela *“New measure”* após a realização de um ensaio, são apresentados o gráfico com sinal TDR, e as medidas automáticas realizadas

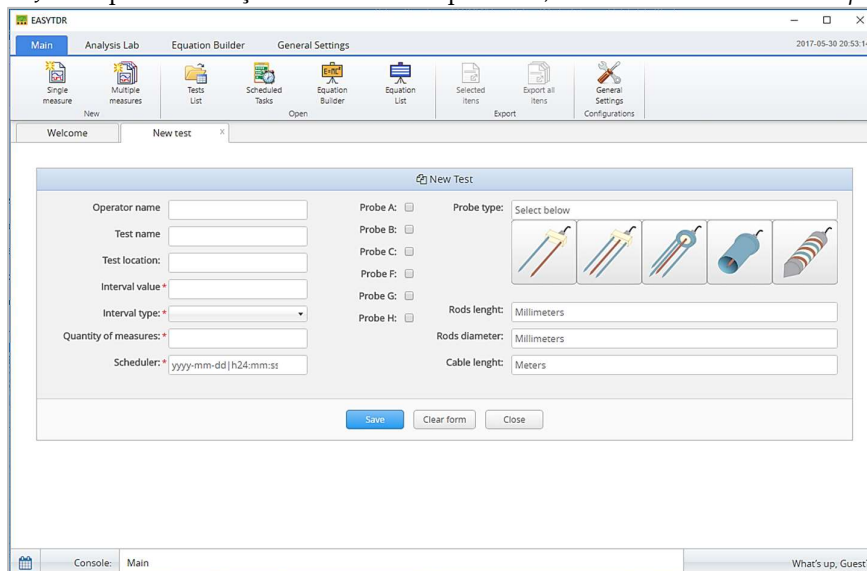




#### 4.2.2.3 Função de Múltiplas Medidas - Multiple measures

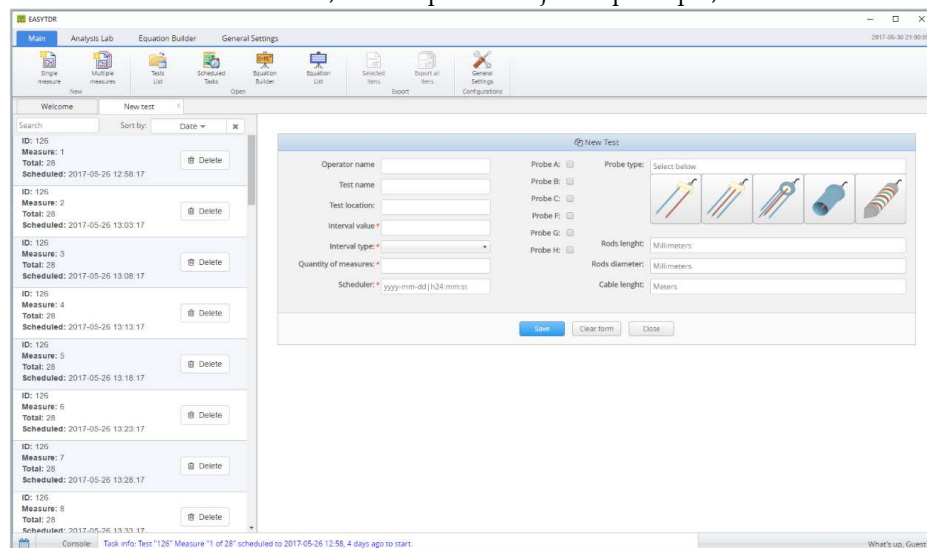
A função “Multiple measures”, aciona a abertura de uma nova aba no grupo 3, Janela principal, criando a aba “New test” onde é apresentado um formulário de programação de ensaio, no qual devem ser preenchidas opções de identificação do ensaio, sondas a serem acionadas pelo multiplexador, e o tipo de sonda utilizada nos ensaios. Também deve ser definida a data do início das medidas, as quais ocorrerão de maneira programada conforme intervalo de tempo e quantidade de medidas definidas pelo usuário (Figura 4.14).

Figura 4.14 - Janela para realização de medidas sequenciais, aba “Main” e botão “Multiple Measures”



Após o cadastro da programação do ensaio, o mesmo é processado e subdivide-se em tarefas a serem realizadas ao longo do tempo. As tarefas criadas podem ser visualizadas e controladas através do botão “Scheduled Tasks”, que abrirá uma nova janela dentro do no grupo três, Janela principal, na qual o usuário pode filtrar as medidas a serem realizadas e deletá-las no caso de cancelamento (Figura 4.15).

Figura 4.15 - Gerenciar de tarefas, lado esquerdo da janela principal, botão “Scheduled Tasks”



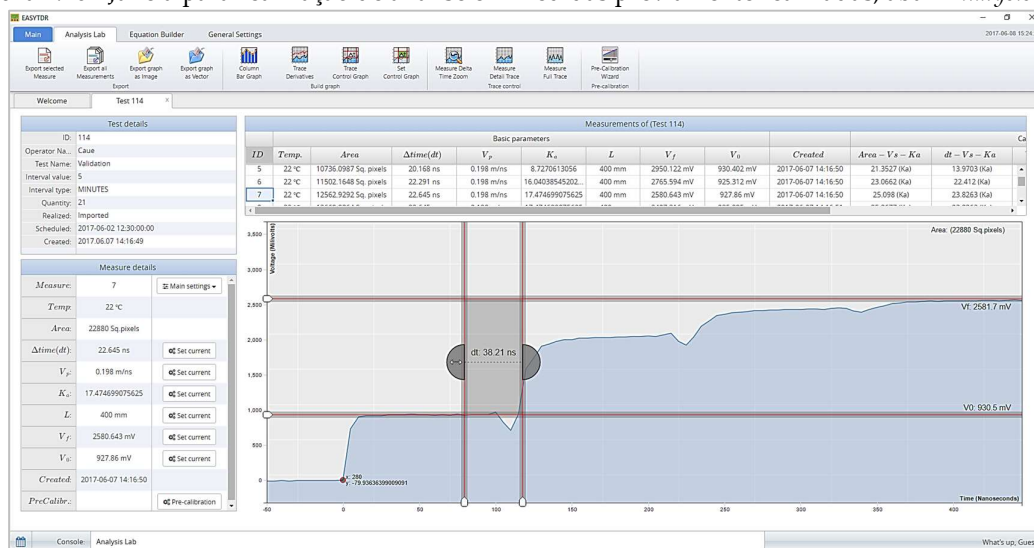
Esta função é essencial em ensaios que necessitam realizar medidas por longos períodos de tempo, como no caso de ensaios para o monitoramento da perda/aumento

gradual do teor de umidade em campo ou em laboratório. Com esta função podem ser criadas aplicações de monitoramento do teor de umidade, como por exemplo, situações que busquem identificar o comportamento do teor de umidade em épocas de chuvas de períodos secos, as quais geralmente acontecem em períodos maiores que três meses. Também é possível sua aplicação em ensaios remotos, fazendo uso de telemetria, os quais podem ser usados para o monitoramento constante do teor de umidade do interior de encostas, podendo dessa forma, ser usado como um sistema preditivo de segurança geotécnica.

#### 4.2.2.4 Janela de Análise de Medidas – Analysis Lab

Para abertura da janela “Analysis Lab”, é necessário que o usuário abra a lista de medidas que está na aba “Main”, e clique no botão “Test List” (Figura 4.16), realizando após um duplo clique sobre uma das medidas da lista.

Figura 4.16 - Janela para realização de análise em medidas previamente realizadas, aba “Analysis Lab”



Nesta janela, o usuário pode efetuar análises e medições no sinal TDR gerado através da realização das medidas. A janela é dividida em quatro regiões, sendo duas tabelas no lado esquerdo: a superior com foco nos detalhes do ensaio programado “Test details” e, a inferior com foco nas variáveis da medida realizada, a qual apresenta um

resumo das variáveis e botões para controle e determinação de novas variáveis. As duas regiões do lado direito da janela são uma planilha interativa na parte superior e um gráfico interativo na região inferior.

A planilha é intitulada com o número do ensaio realizado, por exemplo, “*Measurements of (Test 105)*”. Nela são apresentados os resultados das medidas com a ferramenta “*Control Graph*”, que permite a determinação de pontos de interesse existentes no gráfico, esta é composta por linhas em tom vermelho com fundo cinza, que ficam posicionadas sobre o sinal TDR plotado no gráfico. Na planilha existem funções atribuídas a cada coluna, sendo estas acessadas através de um clique com o botão direito do mouse sobre o título da mesma (Figura 4.17).

Figura 4.17 - Menu de funções atribuído a cada coluna da planilha

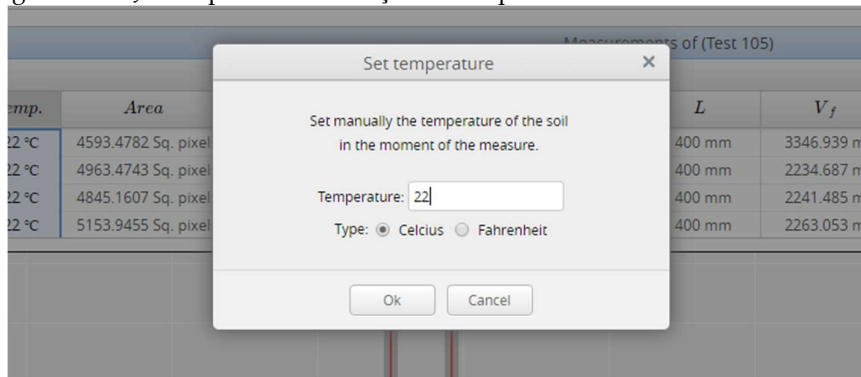
Measurements of (Test 105)									Calibration equations	
ID	Temp.	Area	Δtime(dt)	$V_p$	$K_a$	L	$V_f$	$V_0$	Created	VWC -- Top
1	22 °C	4593.4782 Sq. pixels	16.047 ns	0.198 m/ns	3.828596622400...	400 mm	3346.939 mV	942.357 mV	2017-06-03 21:21:10	5.0974 %
2	22 °C	4963.4743 Sq. pixels	16.533 ns	0.198 m/ns	4.711157070400...	400 mm	2234.687 mV	941.2 mV	2017-06-03 21:21:10	7.2808 %
3	22 °C	4845.1607 Sq. pixels	17.749 ns	0.198 m/ns	7.320054913599...	400 mm	2241.485 mV	925.378 mV	2017-06-03 21:21:10	13.2961 %
4	22 °C	5153.9455 Sq. pixels	18.965 ns	0.198 m/ns	10.50148836000...	400 mm	2263.053 mV	955.839 mV	2017-06-03 21:21:10	19.7969 %

A planilha possui dois grupos de colunas, sendo o primeiro relacionado aos parâmetros TDR básicos “*Basic parameters*”, que são a Temperatura (col. 2), Área (col. 3), Delta tempo (col. 4), Velocidade de propagação (col. 5), Constante dielétrica (col. 6), Comprimento das hastes TDR (col. 7), Voltagem final (col. 8) e Voltagem inicial (col. 9), o segundo grupo de colunas é relacionado as colunas customizáveis “*Calibration equations*”, as quais podem possuir títulos, unidades e equações customizadas conforme necessidade do usuário.

#### 4.2.2.5 Funções através da planilha “Analysis Lab”

A função “*Set temperature for all*”, possibilita a inserção manual de temperatura no momento dos testes, visto que esta interfere na velocidade de deslocamento do pulso eletromagnético (Figura 4.18).

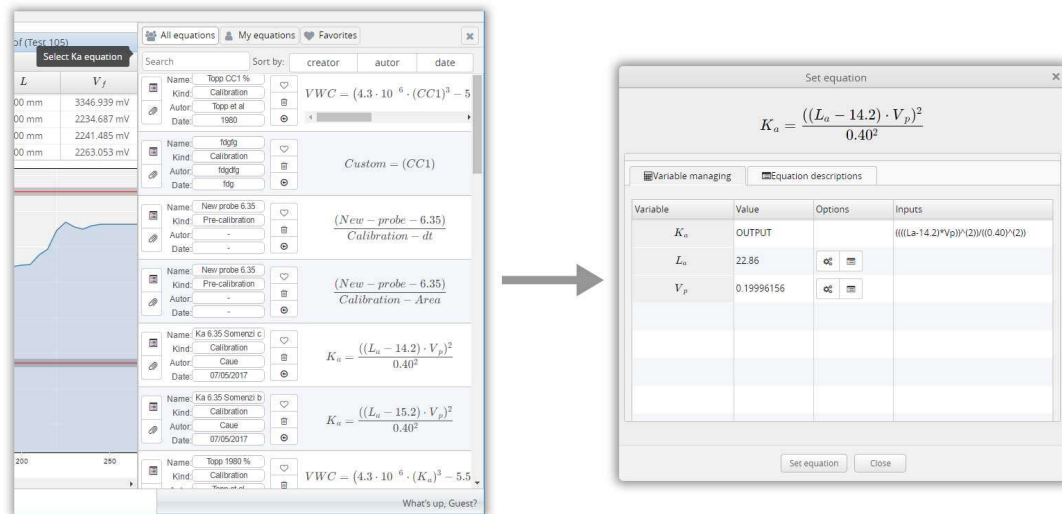
Figura 4.18 - Janela para determinação da temperatura no momento das medidas



A função “*Set area under curve*” calcula a área formada abaixo do sinal TDR, sendo que esta considera a extensão total da medida, a qual para o osciloscópio MSO-19 é cinco microssegundos (5000 nanosegundos). Já a função “*Save area intersection box*” é referente a um dos passos da função de pré-calibração baseada na interseção de um retângulo (box) do sinal TDR. Esta função será abordada à frente.

A função “*Set Measure Engine*” é referente às funções atribuídas no menu “*Main settings*” localizado na tabela inferior esquerda na mesma janela. A função “*Set equation*” é referente a associação de equações customizadas à coluna, sendo esta previamente cadastrada no software pelo usuário (Figura 4.19).

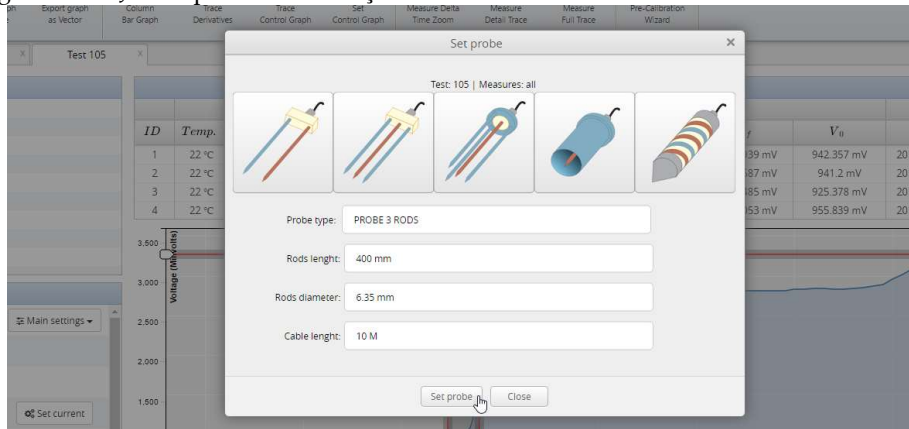
Figura 4.19 - Etapas de processo para aplicação de equações customizada



A função “*Set unit*” serve para a associação de unidades de medida, possibilitando uma melhor apresentação e identificação das colunas. A função “*Set manual changes*” está relacionada a situações em que o usuário deseja cadastrar manualmente os valores na coluna e salvá-los no banco de dados referente à medida.

A função “*Set probe*” possibilita a determinação do tipo de sonda utilizada durante a realização dos ensaios. Durante a etapa de análise, estas variáveis são importantes para as equações de calibração, pois tem relação direta com o tempo de percurso do pulso eletromagnético (Figura 4.20).

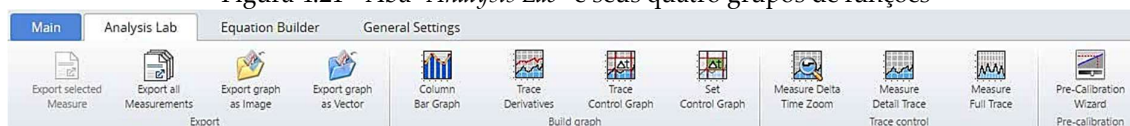
Figura 4.20 - Janela para determinação das características da sonda utilizada nos ensaios



#### 4.2.2.6 Funções da aba Analysis Lab

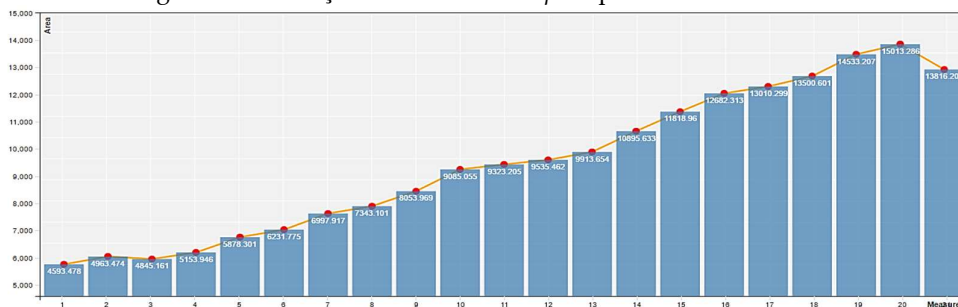
A aba “*Analysis Lab*” (Figura 4.21) do Menu superior, apresenta funções para análise das medidas, criação de novos gráficos e arquivos. As funções são separadas através de quatro grupos. O primeiro grupo é relativo às funções de exportação de dados, sendo os dois primeiros botões “*Export Selected Measure*” e “*Export all Measurements*” destinados à exportação dos dados constantes na planilha de medidas. Os outros dois botões são relativos a exportação do gráfico apresentado em tela, sendo “*Export graph as Image*” responsável por gerar uma imagem do gráfico em formato “png” de alta resolução (6540 por 2200 pixels) e “*Export graph as Vector*” por gerar um arquivo em vetor no formato “svg” (*Scalable Vector Graphics*), sendo facilmente inserido em softwares para vetores (Inkscape, Corel Draw e Adobe Illustrator).

Figura 4.21 - Aba “*Analysis Lab*” e seus quatro grupos de funções



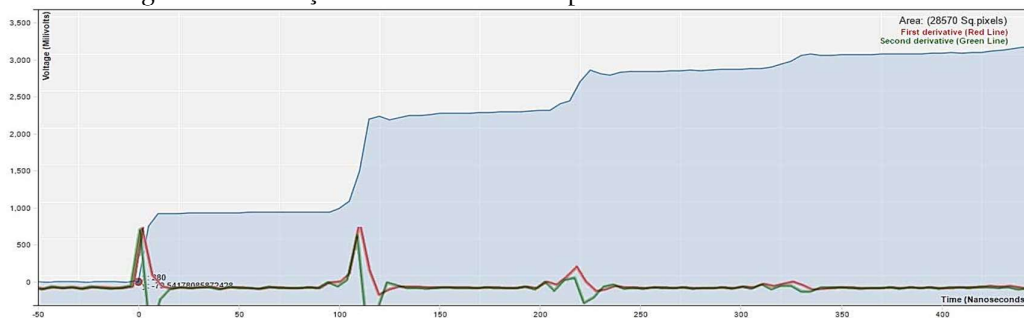
O segundo grupo de funções é relativo a construção de gráficos personalizados e determinação de parâmetros de medida através da ferramenta “*Graph Control*”. O primeiro botão, “*Column Bar Graph*”, é responsável pela criação de gráficos de barras a partir de colunas determinadas pelo usuário (Figura 4.22).

Figura 4.22 - Função “*Column Bar Graph*” aplicada a coluna Area



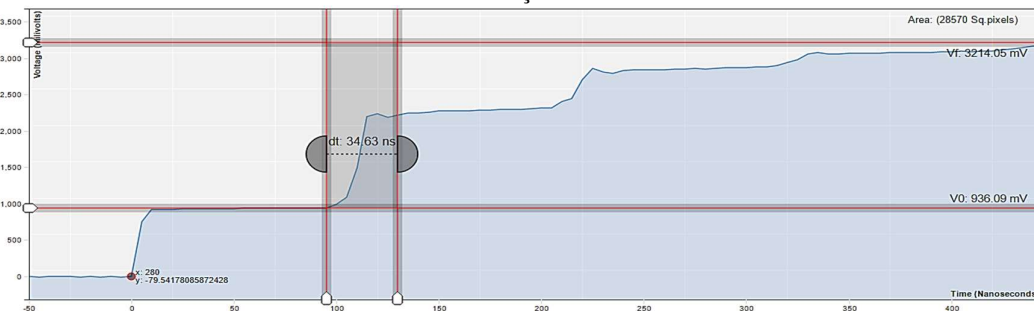
O botão “*Trace Derivatives*” possibilita o cálculo da primeira e da segunda derivada do sinal TDR, gerando duas novas curvas plotadas sobre o sinal TDR (Figura 4.23).

Figura 4.23 - Função “*Trace Derivatives*” aplicado ao sinal TDR da medida



O botão “*Trace Control Graph*” cria o gráfico com a plotagem do sinal TDR e o botão “*Set Control Graph*” associa as posições da ferramenta “*Graph Control*” às lacunas “dt” (col. 4), “Vf” (col. 8) e “V0” (col. 9) da planilha (Figura 4.24).

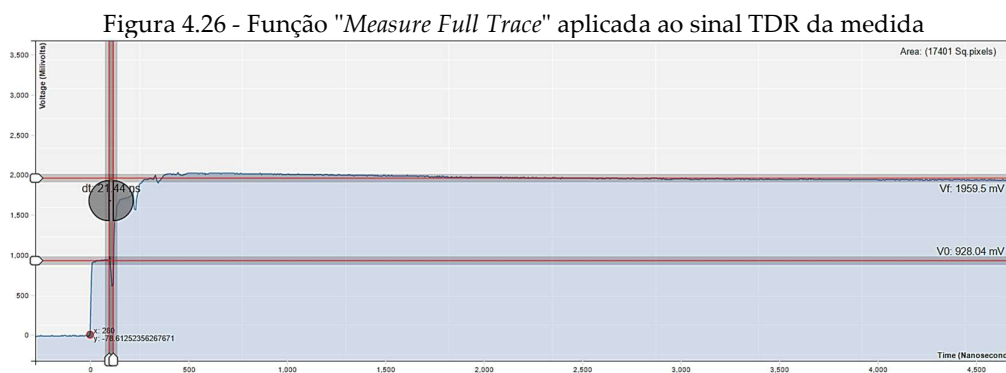
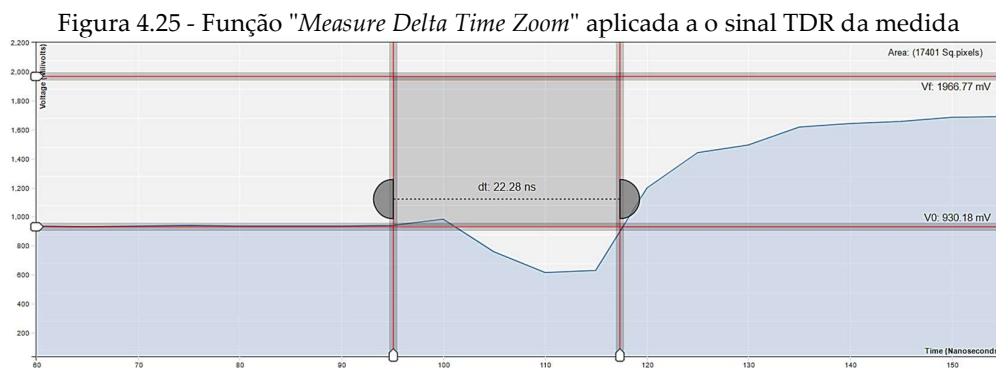
Figura 4.24 - Função “*Trace Control Graph*” aplicado ao sinal TDR da medida, com foco de zoom do sinal TDR conforme a função “*Measure Detail Trace*”



O terceiro grupo permite alterar a região de interesse nos dados do sinal TDR, sendo o primeiro botão “*Measure Delta Time Zoom*” responsável pelo zoom em um dado local do gráfico (Figura 4.25). Os botões “*Measure Detail Trace*” e “*Measure Full Trace*” são



responsáveis por aproximar e distanciar a plotagem do sinal TDR no gráfico (Figura 4.26).



O quarto grupo permite a criação de equações de pré-calibração, através da geração de correlações polinomiais que aumentam a acurácia das medidas, determinando a constante dielétrica.

#### 4.2.2.7 Função para Criação de Equações de Correlação - Pre-Calibration Wizard

Por meio do botão "Pre-Calibration Wizard" é possível acessar o sistema de pré-calibração que foi construído através de uma sequência de etapas de análise, que após concluídas permitem a criação de correlações avançadas para determinação da constante dielétrica aparente " $K_a$ " e da condutividade elétrica " $EC_b$ ". O sistema de pré-calibração faz uso de dois tipos de dados de entrada, o primeiro, referente a área

formada pelo método "IABT", que será abordado adiante, e outro em relação à diferença de tempo " $dt$ ", criando assim duas regressões polinomiais de terceiro grau.

Figura 4.27 - Função de Pre-Calibração - Etapa 1 "*Intersection Box*"

The screenshot shows the 'Set Pre-Calibration' dialog box with three tabs: '1 - Intersection Box' (selected), '2 - Input Parameters', and '3 - Polynomial Regression'. Under the '1 - Intersection Box' tab, there are seven blue buttons with corresponding descriptions:

- A - Define Intersection Box: Define the region of the Intersection Box
- B - Set Intersection Box: Set Intersection Box for all measures
- C - Define  $dt$ ,  $V_0$  and  $V_f$ : Define delta time,  $V_0$  and  $V_f$  parameters
- D - Define  $K_a$  manually: Define  $K_a$  value manually
- E - Define temperature: Define temperature
- F - Define Air Measure: Select air measure
- G - Define Water Measure: Select water measure

At the bottom of the dialog, there are four buttons: 'Show Intersection Box' (highlighted in orange), 'Save Pre-Calibration', 'Close', and 'Clear form'.

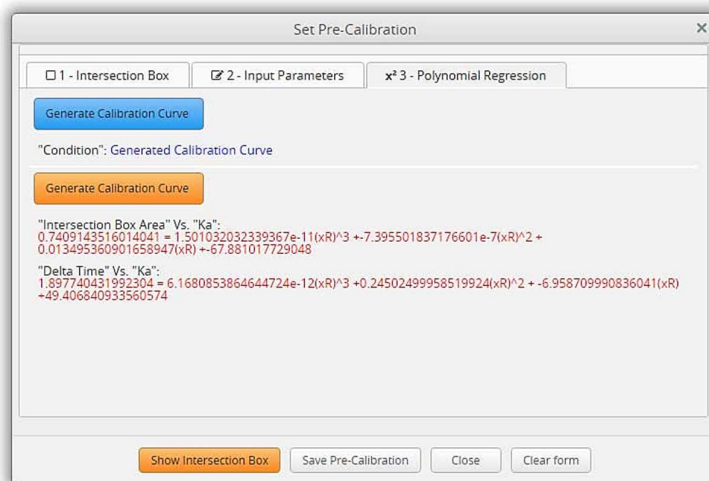
Figura 4.28 - Função de Pre-Calibração - Etapa 2 "*Input parameters*"

The screenshot shows the 'Set Pre-Calibration' dialog box with the '2 - Input Parameters' tab selected. The fields and options are as follows:

- Calibration name: \*
- Soil or substance:
- Calibration location:
- Probe type: A row of five icons representing different probe types.
- Rods length:
- Rods diameter:
- Cable Length:

At the bottom of the dialog, there are four buttons: 'Show Intersection Box' (highlighted in orange), 'Save Pre-Calibration', 'Close', and 'Clear form'.

Figura 4.29 - Função de Pre-Calibração - Etapa 3 "Polynomial Regression"



#### 4.2.2.8 Método Intersection Area Box and Trace – IABT

Em função da pequena resolução do osciloscópio MSO-19, cerca de 30 vezes inferior ao equipamento TDR100, foi idealizada uma nova técnica para a medição do tempo em que a onda eletromagnética permanece no sistema TDR. A nova técnica é realizada através da intersecção de uma área retangular com a área formada pelo sinal TDR. A partir da área resultante desta intersecção, é realizado um ajuste de amplitude, para minimizar os efeitos decorrentes da condutividade do meio, resultando em um valor adimensional com acurácia similar ao comprimento aparente " $L_a$ ".

Em função do potencial inovador da técnica IABT, maiores detalhes da mesma serão fornecidos através de uma publicação, a ser realizada após a análise de patenteabilidade do método.

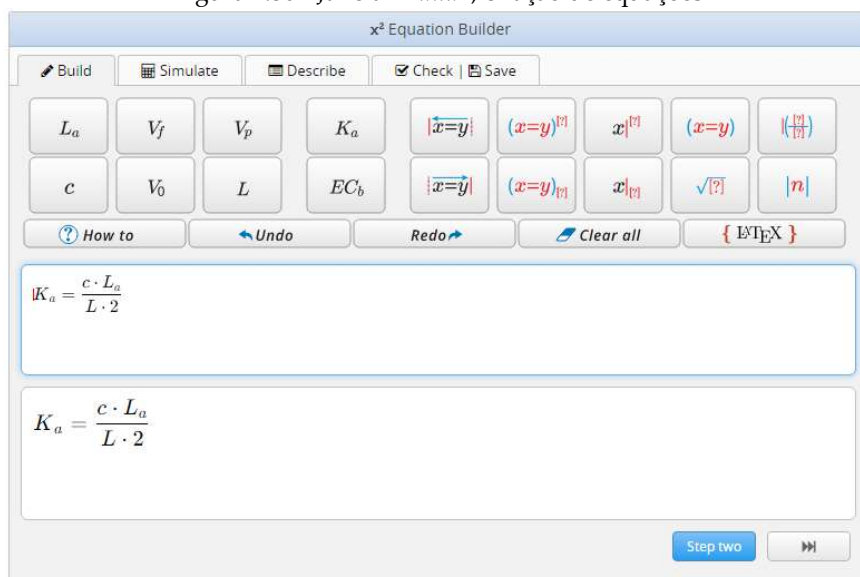
#### 4.2.2.9 Janela Construtor de Equações - Equation Builder

Através do Menu superior, aba "Equation Builder" e botão de mesmo nome, é possível acessar o construtor de equações do software EASYTDR, sendo este um elemento importante para o software, visto que existem diversas equações de calibração, variando conforme o tipo de solo, tipo de sonda e ainda outras características. O

construtor de equações foi elaborado para apresentar de forma gráfica e em tempo real, a inserção dos elementos que compõe as equações e ainda possibilitar a simulação das equações inseridas.

O sistema construtor de equações é composto por quatro janelas, formadas através de uma sequência de etapas “Wizard”, onde o usuário pode seguir os passos até o cadastro final da equação no sistema. Na etapa inicial “Build”, o usuário pode digitar a equação e ao mesmo visualizar o resultado da inserção. No menu superior são apresentados botões que inserem variáveis comuns ao ambiente TDR, e botões para a manipulação das variáveis constantes na equação (Figura 4.30).

Figura 4.30 - Janela “Build”, criação de equações



A etapa seguinte, composta pelo “Simulate”, é responsável pela simulação da equação de calibração criada na etapa “Buid”. Nessa etapa o usuário define qual será a saída de dados “Output”, sendo este o valor a esquerda do sinal de igual e também define um valor aproximado para cada variável que compõe a equação (Figura 4.31). Na mesma janela, após a definição dos valores, o usuário pode simular a solução do conjunto de variáveis atribuído à equação, visualizando através das lacunas, o resultado do

cálculo, a equação com os valores substituídos e a equação final após validação, botão “Validade” (Figura 4.32).

Figura 4.31 - Janela “Simulate” possibilita a simulação de equações criadas na aba “Build”

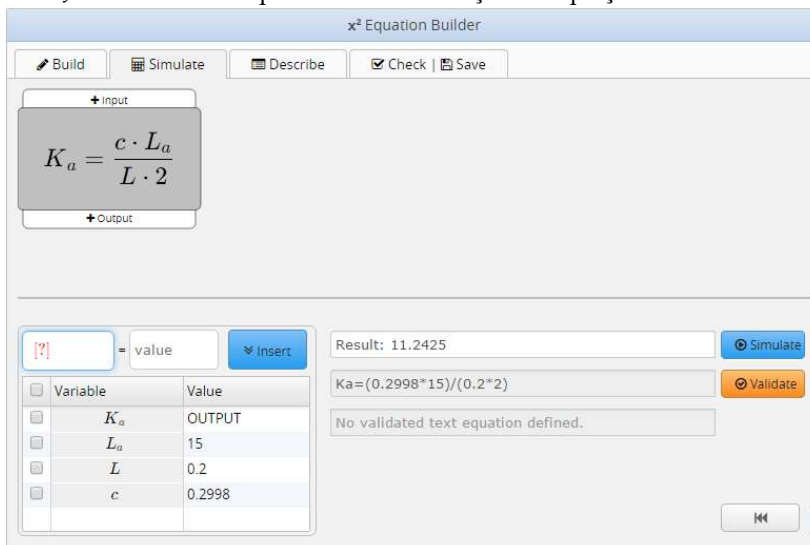
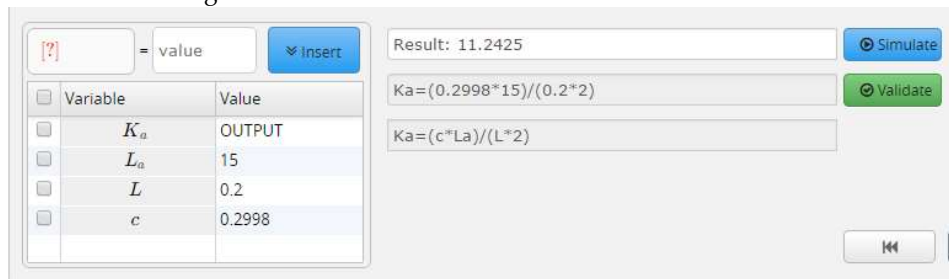


Figura 4.32 - Detalhe do resultado do botão “Validate”



Na etapa posterior, o usuário encontra a janela “Describe”, a qual possibilita a inserção de informações relativas à equação criada, onde o usuário deve definir um nome de identificação, o tipo de equação, a possibilidade de compartilhá-la com outros usuários do software, o autor original da equação e a data que o mesmo a criou. Também nesta seção o usuário pode inserir uma descrição geral de uso da equação, descrevendo detalhes do tipo de solo ou substância em que a mesma se aplica, entre outras informações úteis (Figura 4.33).

Figura 4.33 - Aba “Describe” possibilita a descrição das informações básicas da equação

**x² Equation Builder**

Build Simulate **Describe** Check Save

Username: somenzi@gmail.com

Equation name: \* Aparent Dielectric Constant

Kind of equation: Basic parameter

Sharing options: \* Shared equation

Reference autor name: \* Caue Somensi

Reference autor date: \* 05/05/2017

Description of use: Used to estimate Apparent Dielectric Constant when the user have a confident Apparent Length measure.

Step two Step four

A última etapa é referente a janela “Check | Save” (Figura 4.34) onde o usuário pode visualizar como a equação será salva no sistema e como será representada na lista de equações (Figura 4.35), sendo está aberta através do botão “Equation List”.

Figura 4.34 - Aba “Check / Save” possibilita a visualização geral das informações para posterior inserção no banco de dados do sistema

**x² Equation Builder**

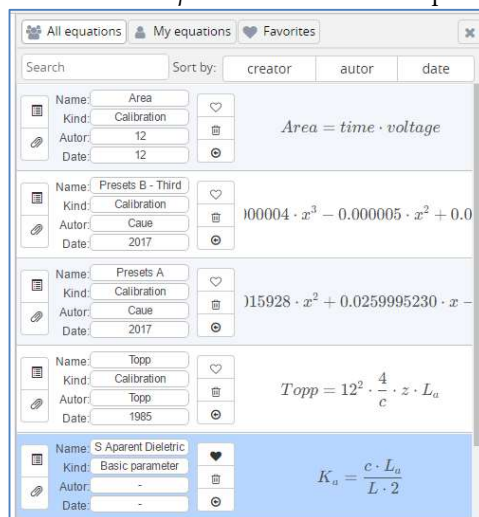
Build Simulate Describe **Check | Save**

Name:	Aparent Dielectric
Kind:	Basic parameter
Autor:	Caue Somensi
Date:	05/05/2017

$$K_a = \frac{c \cdot L_a}{L \cdot 2}$$

Step three Save

Figura 4.35 - Janela referente ao botão “Equation List” onde são apresentadas as equações salvas



### 4.3 Sondas TDR customizadas e Montagem de um Multiplexador

#### 4.3.1 Fabricação de Sondas TDR com impressão 3D

Foram fabricadas duas sondas TDR de grande formato, para uso com o osciloscópio MSO-19 e seu gerador de sinal interno. A criação das sondas personalizadas foi necessária, pois a configuração inicialmente realizada, com o uso das sondas tradicionais, de 200 milímetros de comprimento e o osciloscópio MSO-19, não permitiu a amostragem suficiente de pontos ao longo do sinal TDR gerado, para que fosse identificado o atraso de tempo que ocorre devido à realização dos ensaios.

Durante a análise dos resultados, identificou-se que o osciloscópio MSO-19 possuía uma resolução efetiva de somente 200 MHz, 30 vezes menor que a resolução do equipamento TDR100, com 6.15 GHz. Embora o fabricante apresente nas especificações que a resolução do equipamento em modo de amostragem mixado seja

de 2 GHz, ou seja, três vezes menor que o equipamento TDR100, esta última não se mostra eficaz como na fase de realização dos ensaios para a validação do equipamento.

As sondas customizadas foram construídas através de um processo moderno de fabricação, chamado Fusão e Deposição de Material - FDM, esta tecnologia é comumente conhecida como impressão 3D, usada para aplicações de prototipagem e pequenas produções. Foram projetadas duas sondas distintas conforme detalhes do Quadro 4.2, sendo a primeira uma sonda com hastes de 4,75 mm de espessura (Figura 4.36, Figura 4.37 e Figura 4.38, e a segunda com 6,35 mm de espessura (Figura 4.39 e Figura 4.40). O projeto das sondas foi realizado com programa Autodesk Inventor, modeladas em 3D e com detalhes diferentes na modelagem do invólucro, vedação e posição do cabo.

Quadro 4.2 - Características das sondas customizadas

Sonda	Dimensão útil	Diâmetro haste	Cabo	Detalhes
A	400 mm	4.75 mm (3/16")	10 metros	Cabo superior.
B	400 mm	6.35 mm (1/4")	10 metros	Led indicador, cabo lateral e reforço superior.



Figura 4.36 - Ilustração 3D do projeto da sonda "A"

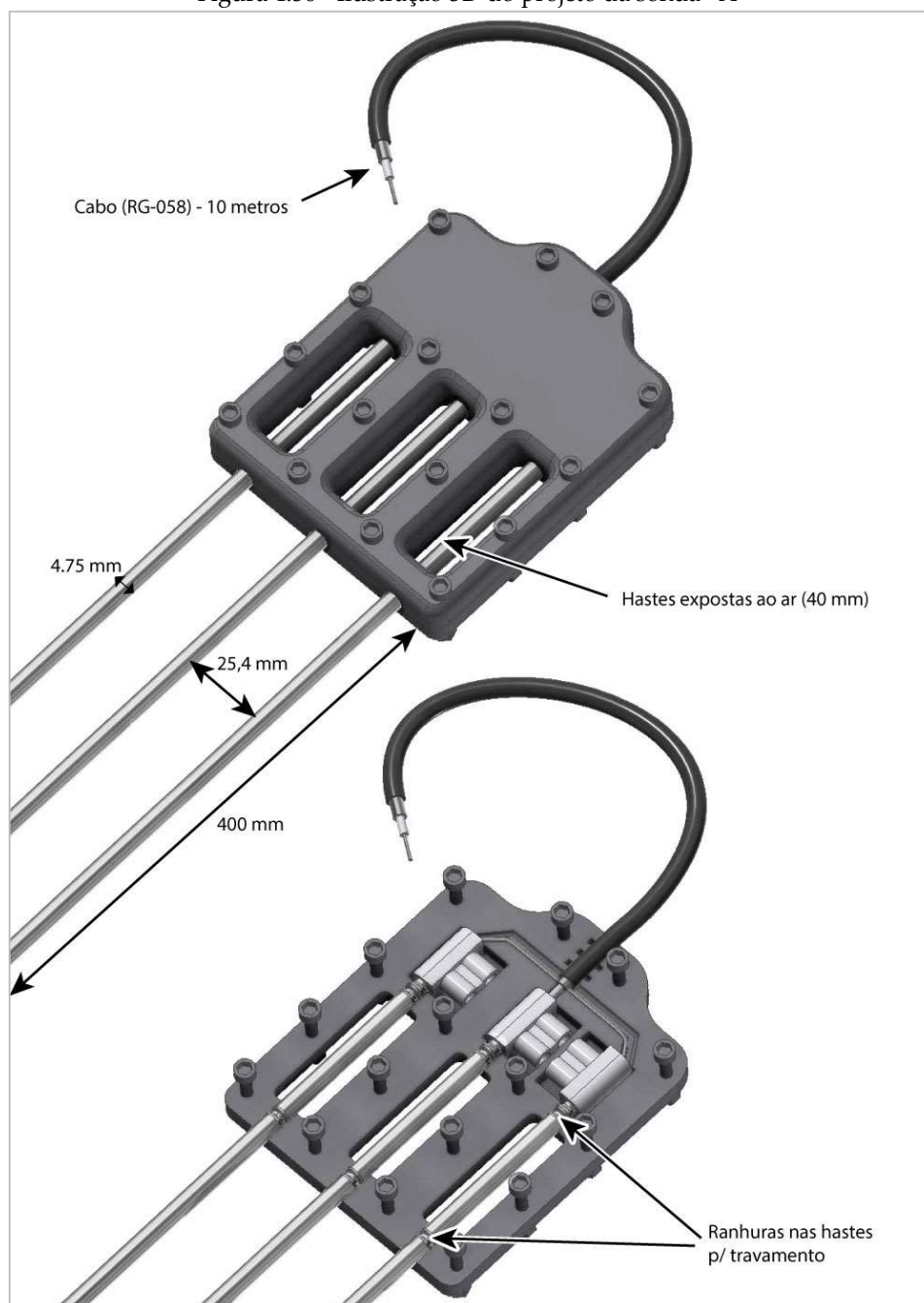


Figura 4.37 - Processo de impressão 3D (FDM) da sonda "A", (a) primeira camada impressa, (b) 50% das camadas impressas, (c) lado interno da peça e (d) lado externo da peça

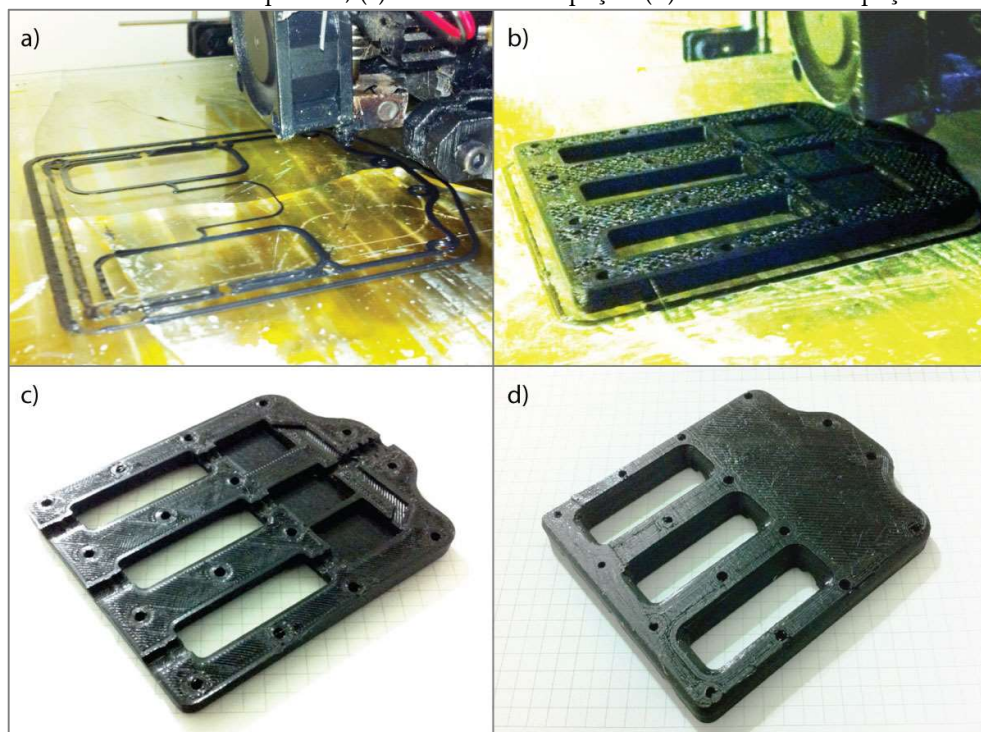


Figura 4.38 - Sonda "A" finalizada com as hastes e cabo de 10 metros



Figura 4.39 - Ilustração 3D do projeto da sonda "B"

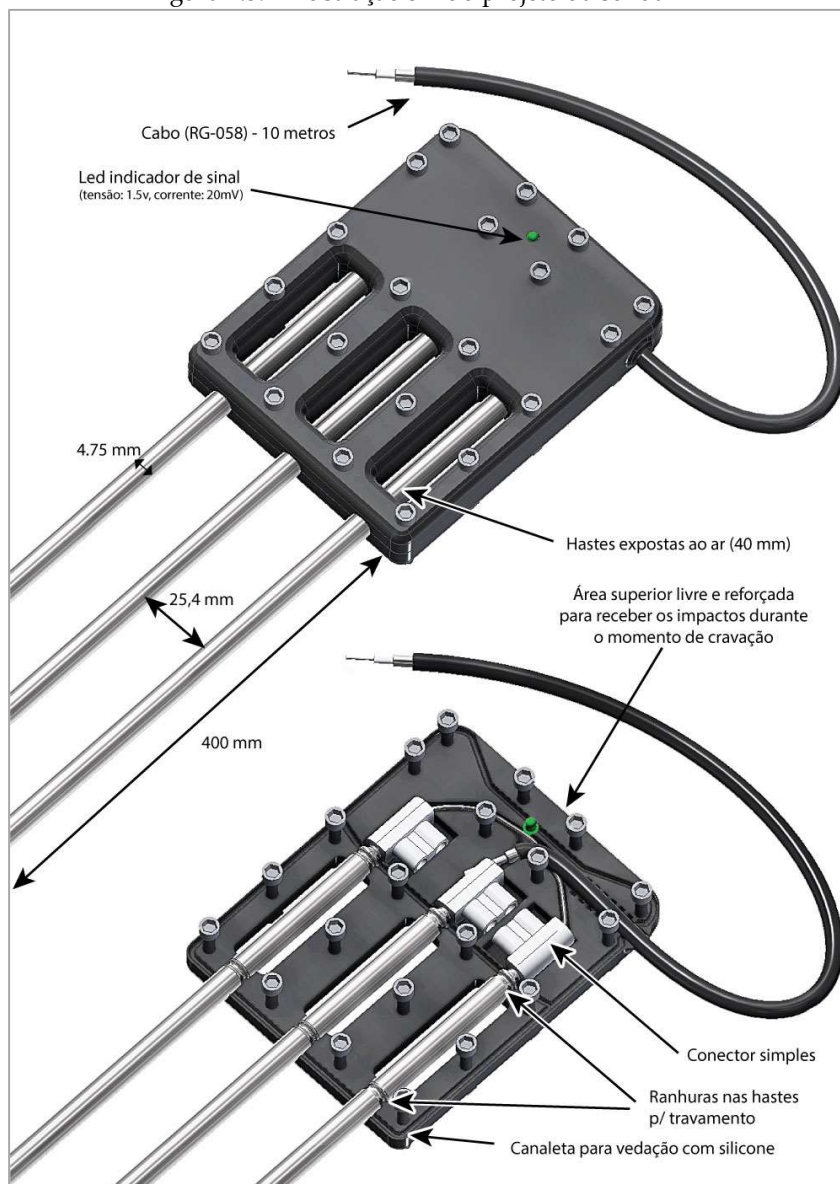


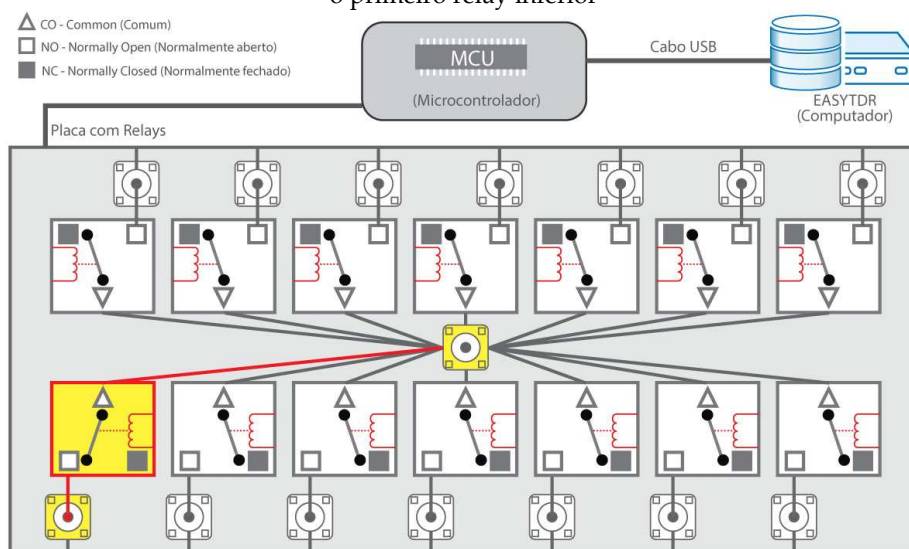
Figura 4.40 - Sonda "B" finalizada com as hastes e cabo de 10 metros



### 4.3.2 Projeto e Montagem de Multiplexador baseado em *Relays*

Os dispositivos conhecidos como multiplexadores permitem que equipamentos monocanais trabalhem em regime semelhante a dispositivos multicanais. O projeto e a montagem de um multiplexador experimental foi realizado com o uso de componentes eletromecânicos conhecidos como *relays* (Figura 4.41). O qual foi controlado através do uso de um microcontrolador da marca Atmel, modelo ATMEGA-328P, funcionando em uma placa do projeto *Open Source ARDUINO*. O sistema multiplexador foi controlado pelo software EASYTDR através da conexão USB estabelecida entre o microcontrolador e o computador onde o software estava instalado.

Figura 4.41 - Projeto esquemático do multiplexador experimental. Detalhe em amarelo (canto inferior esquerdo) circuito fechado realizando a transferência do pulso eletromagnético entre o ponto central e o primeiro relay inferior



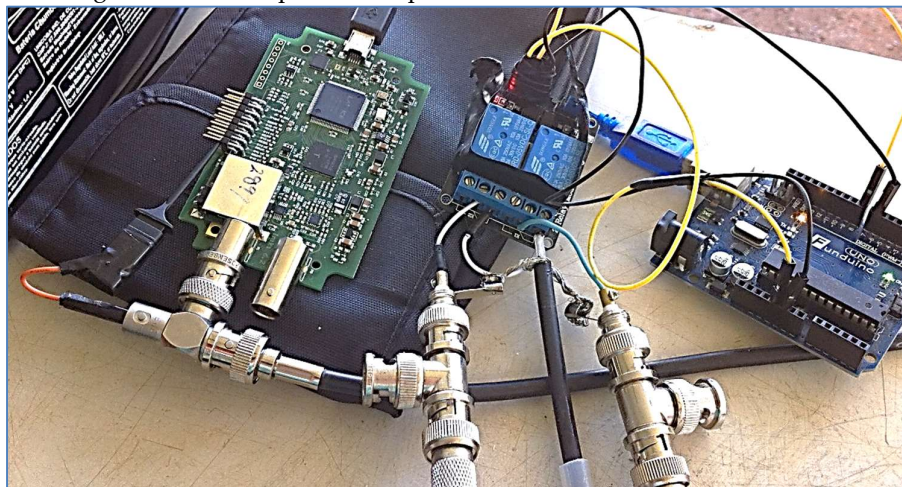
A validação do uso desse tipo de multiplexador é importante para um sistema TDR de baixo custo, pois o seu desenvolvimento é baseado em uma abordagem simples de construção, com elementos comuns no mercado nacional e de fácil escalabilidade no caso de projetos que demandem uma quantidade grande de canais. Dado que o pulso eletromagnético interage com o meio onde se propaga, a presença de elementos com



impedâncias diferentes do sistema TDR, como os elementos relays, conectores e trilhas da placa, pode produzir uma alteração significativa no sinal TDR gerado.

Para validação do multiplexador, foi realizada a montagem de um sistema simples, com uma placa comercial de relays de dois canais, da marca Songle, modelo SRD-05VDC-SL-C e conectores do tipo divisor BNC (Figura 4.42).

Figura 4.42 - Multiplexador experimental com dois canais de medidas



A presença do multiplexador na linha de transmissão do sistema TDR influenciou as medições realizadas, porém, a partir da realização da pré-calibração por correlações, baseado na função “Pre-Calibration Wizard” as alterações não foram significativas a ponto de comprometer a estimativa dos parâmetros básicos do ensaio TDR. As alterações dos parâmetros são apresentadas na Tabela 4.1, através de uma comparação entre o valor de referência medido e a diferença proporcional da medição com o multiplexador.

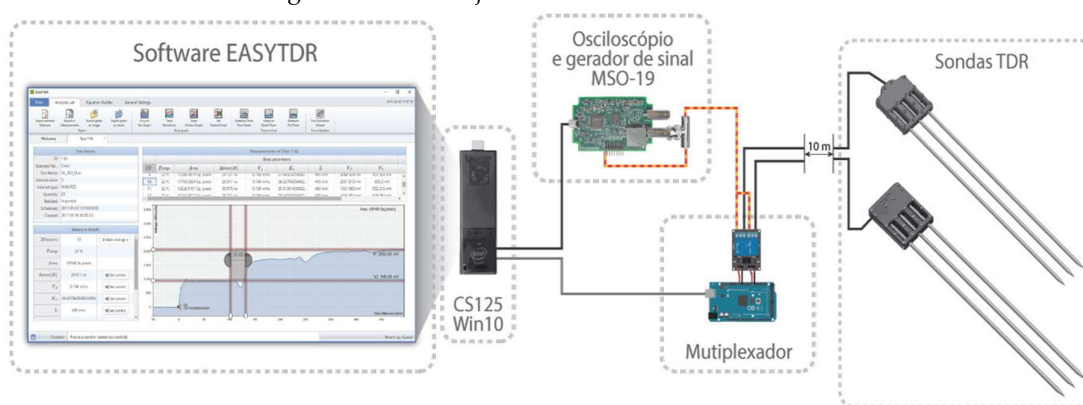
Tabela 4.1 - Alterações no parâmetros básicos em função do uso do multiplexador

Measure	Diff. Voltage	Vf	V0	Diff. Voltage	Area Under Curve	Delta Time
S4 - 4.75	0%	0%	0%	0%	0%	0%
S4 - 4.75 Mux	-7.13%	7.13%	1.70%	-13.60%	+7.52%	+0.94%
S6 - 6.35	0%	0%	0%	0%	0%	0%
S6 - 6.35 Mux	-2.75%	2.75%	1.03%	-5.71%	-0.92%	0%

#### 4.4 Sistema TDR de baixo custo

O desenvolvimento do Sistema TDR de baixo custo, foi possível em virtude da união dos elementos desenvolvidos neste trabalho, como o software EASYTDR, as sondas de 400 mm, o multiplexador baseado em relays, e os demais dispositivos comerciais, como o minicomputador Intel *Computer Stick* CS125 e o osciloscópio MSO-19 com seu respectivo software de controle. O arranjo final do sistema pode ser visualizado na Figura 4.43.

Figura 4.43 - Arranjo do sistema TDR de baixo custo



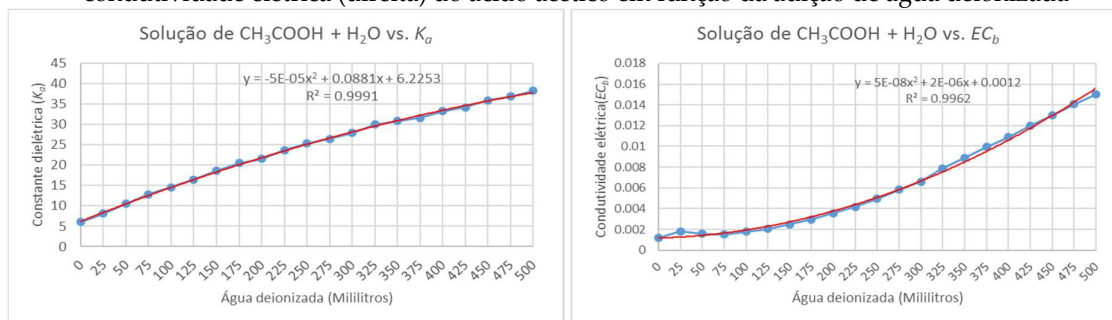
Foram realizados ensaios com a finalidade de comparar o desempenho do Sistema EASYTDR e o Sistema comercial da Campbell Scientific, composto pelo equipamento TDR100, sonda CS605 e o software PC-TDR. As medições foram repetidas após a adição consecutiva de 25 mililitros de água destilada em um litro de ácido acético, totalizando 20 medições e uma molaridade final igual a 27.754 Mols (g/L) de água destilada.

Os resultados apresentados na Tabela 4.2 e na Figura 4.44, foram adotados como valores de referência para as demais análises realizadas, dada a acurácia do equipamento TDR100 e o reconhecimento do mesmo no meio científico. Na Tabela 4.2 são apresentados os valores de concentração água destilada em uma base da ácido acético.

Tabela 4.2 - Concentração da solução e valores medidos com o Sistema Campbell Scientific.

ID	água destilada	Mols (g/L):	Condut. Elétrica	Umidade Volum.	Const. Diel. (Ka)	Increment. (Ka)	Sonda inicial	Sonda final	Incremento (m)
1	0 ml	0.00000	0.00119	10.43%	6.040	-	2.893	3.440	0.547
2	25 ml	1.38771	0.00181	14.92%	8.076	2.036	2.900	3.526	0.626
3	50 ml	2.77542	0.00157	19.78%	10.490	2.415	2.893	3.600	0.707
4	75 ml	4.16313	0.00153	24.00%	12.822	2.331	2.894	3.671	0.777
5	100 ml	5.55084	0.00177	26.94%	14.597	1.775	2.895	3.721	0.827
6	125 ml	6.93855	0.00206	29.80%	16.472	1.875	2.890	3.766	0.875
7	150 ml	8.32627	0.00248	32.82%	18.652	2.180	2.886	3.815	0.929
8	175 ml	9.71398	0.00297	35.14%	20.490	1.839	2.887	3.858	0.971
9	200 ml	11.10169	0.00357	36.44%	21.594	1.103	2.894	3.889	0.996
10	225 ml	12.48940	0.00419	38.74%	23.709	2.116	2.897	3.938	1.041
11	250 ml	13.87711	0.00497	40.41%	25.379	1.670	2.891	3.967	1.076
12	275 ml	15.26482	0.00585	41.43%	26.467	1.088	2.897	3.994	1.098
13	300 ml	16.65253	0.00662	42.69%	27.892	1.425	2.898	4.024	1.126
14	325 ml	18.04024	0.00790	44.42%	30.012	2.120	2.894	4.060	1.166
15	350 ml	19.42795	0.00890	45.05%	30.834	0.822	2.894	4.076	1.181
16	375 ml	20.81566	0.00993	45.67%	31.673	0.839	2.904	4.100	1.197
17	400 ml	22.20337	0.01089	46.82%	33.289	1.615	2.902	4.127	1.226
18	425 ml	23.59108	0.01202	47.44%	34.213	0.925	2.900	4.142	1.242
19	450 ml	24.97880	0.01299	48.54%	35.906	1.692	2.901	4.172	1.271
20	475 ml	26.36651	0.01408	49.17%	36.914	1.008	2.900	4.189	1.288
21	500 ml	27.75422	0.01502	50.02%	38.304	1.390	2.892	4.203	1.312

Figura 4.44 – Medições com o sistema Campbell Scientific, constante dielétrica (esquerda) e condutividade elétrica (direita) do ácido acético em função da adição de água deionizada

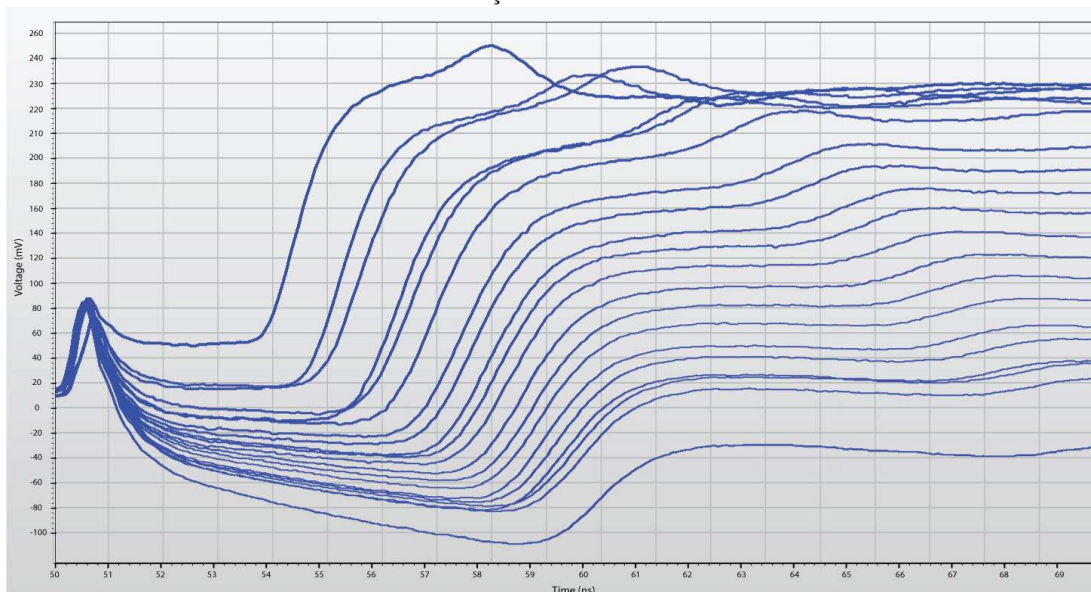


#### 4.4.1 Análise de comportamento do sinal TDR

Em um sistema TDR adequadamente construído a repetibilidade de um ensaio TDR deve possuir pequena variabilidade. O sinal TDR deve apresentar uma forma homogênea, com influência principal de sua forma em função das características do meio onde o pulso TDR se propaga. Visando observar o comportamento do pulso TDR e a variabilidade do mesmo em função da alteração do teor de umidade e da mudança de condutividade. Os sinais TDR gerados foram apresentados de forma sobreposta, em um único gráfico, expressando de maneira clara o comportamento dos ensaios realizados.

Na Figura 4.45, apresenta-se a sobreposição de 21 ensaios de referência, realizados com o Sistema Campbell Scientific. É possível observar que o comportamento do sinal TDR é uniforme, e o atraso das reflexões devido à alteração do meio é significativa, variando de 53,5 nanosegundos, com uma constante dielétrica igual 6,040 (constante dielétrica do ácido acético puro a 20 graus centígrados) até 59,3 nanosegundos com uma constante dielétrica igual a 38,304.

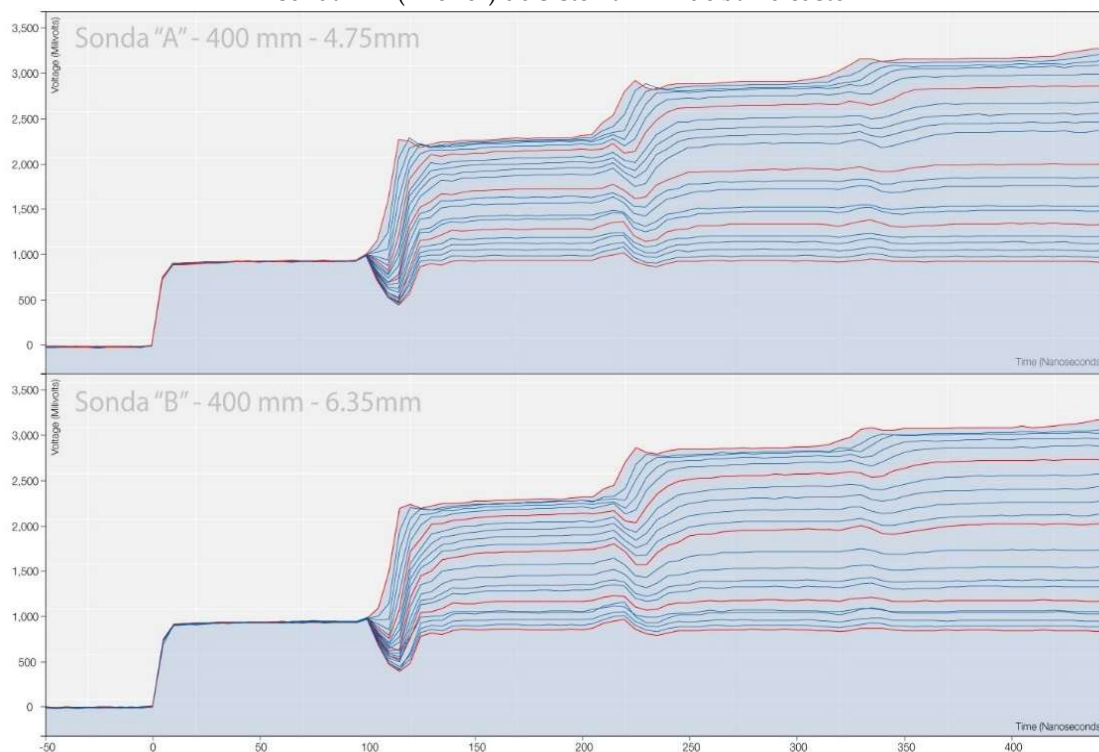
Figura 4.45 - Sobreposição de medidas com equipamento TDR100 e o software PC-TDR em diferentes concentrações de ácido acético.





O sistema desenvolvido apresentou bons resultados quanto à forma do sinal TDR gerado e também quanto à homogeneidade dos resultados ao longo da bateria de ensaios. Na Figura 4.46, encontram-se as sobreposições dos sinais TDR plotados através do software EASYTDR, realizados com a sonda "A" e com sonda "B".

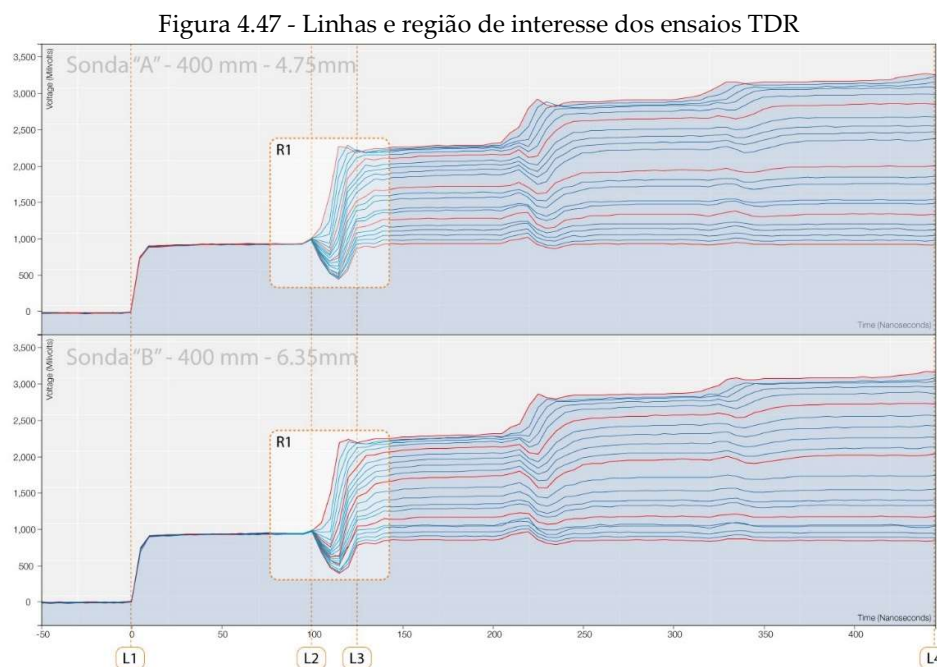
Figura 4.46 - Sobreposição do sinal TDR para sondas "A" (superior) e sonda "B" (inferior) do Sistema TDR de baixo custo



A partir da análise realizada com o software EASYTDR, foram obtidos os parâmetros básicos da técnica, os quais são: o tempo que o pulso TDR levou para percorrer a sonda TDR, as voltagens relativas, inicial " $V_0$ " e final " $V_f$ ", a área do método "IABT" e as curvas de calibração em relação à área e à diferença de tempo. A partir desses parâmetros, foram realizados os tratamentos matemáticos necessários para obtenção da constante dielétrica " $K_a$ " e a condutividade elétrica " $EC_b$ ".

#### 4.4.1.1 Resultados de obtenção da Constante Dielétrica Aparente - $K_a$

A determinação da constante dielétrica aparente depende da correta determinação do tempo de percurso obtido através do sinal TDR. Esse efeito é observado preferencialmente na primeira região de reflexões do sinal TDR, delimitada pelas linhas “L2” e “L3”, região “R1” da Figura 4.47.



A linha posicionada na posição “L1” é referente ao momento de injeção do pulso, criado pelo gerador de sinal do equipamento TDR, gerada com 3300 mV. Após o pulso passar pelo conector BNC (tipo divisor), acoplado à entrada do osciloscópio MSO-19, parte do pulso elétrico entra no mesmo, gerando o incremento de tensão (800 mV), e parte segue para a linha de transmissão, composta pelo cabo e sonda. Conforme observado na Figura 4.47, o tempo de percurso entre “L1” e “L2” é de 100

nanossegundos, que representa de maneira exata o tamanho do cabo que é de 10 metros, sendo o cálculo realizado através da Equação 6.

$$v = \frac{2L}{t} \quad \rightarrow \quad L = \frac{t * v}{2} \quad \rightarrow \quad L = \frac{100 \text{ (ns)} * 0.20086 \left(\frac{m}{ns}\right)}{2} = 10.04 \text{ m}$$

O segmento compreendido entre “L2” e “L3” compõe a principal região de interesse para medição do tempo de atraso do pulso injetado, sendo ainda que nesta região são aplicados os métodos para obtenção do comprimento aparente “ $L_a$ ”, os quais podem ser os métodos das tangentes, dos picos, das linhas divergentes ou das tangentes alternativo.

As reflexões resultantes no segmento entre “L3” e “L4”, ocorrem por não haver um filtro apropriado que minimize as reflexões secundárias, que de maneira semelhante, sucedem no segmento compreendido entre “L1” e “L3”, porém com uma forte atenuação do potencial elétrico devido a entrada de parte da reflexão no osciloscópio MSO-19. A fração do sinal que reflete na entrada do osciloscópio, continua no sistema, propagando-se até a completa dissipação na linha “L4”. Após essa última, o sinal é contínuo, composto pelo platô superior, conhecido como “*Duty Cicle*”, onde é medida a amplitude “ $V_f$ ”, tensão final.

Para a determinação da constante dielétrica “ $K_a$ ”, a Equação 7 foi inserida na lista de equações do software através da função “*Equation Builder*”, para ser posteriormente utilizada na coluna de número seis “ $K_a$ ”. Essa equação faz uso do valor determinado na coluna quatro “ $\Delta time(dt)$ ”, previamente definida pelo usuário.

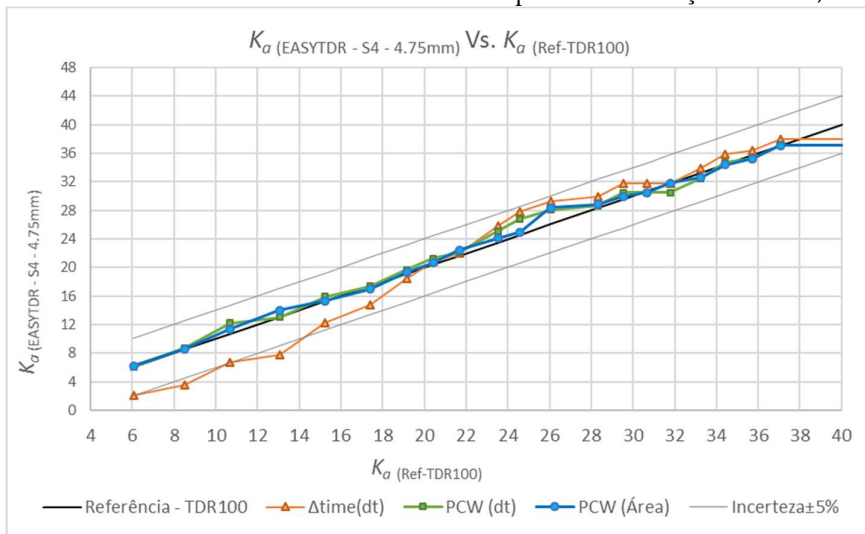
Na Tabela 4.3 e na Figura 4.48, são apresentados os resultados da determinação de “ $K_a$ ” utilizando a equação tradicional (Equação 7) e também os valores de “ $K_a$ ” obtidos através da função “*Pre-Calibration Wizard - PCW*” que cria regressões polinomiais, com base na área obtida com a técnica “IABT” e com o valores de “ $\Delta time(dt)$ ” definidos

pelo usuário, produzindo assim modelos de aproximação do valor de “ $K_a$ ”, melhorando a acurácia estimativa.

Tabela 4.3 - Determinação da constante dielétrica aparente -  $K_a$  – Sonda “A”

ID	Ka (Referência)	Sonda “A”									
		Delta time (dt)			PCW (dt)			PCW (IABT)			
		Ka	(y-y')	(y-y')²	Ka	(y-y')	(y-y')²	Ka	(y-y')	(y-y')²	
1	6.040	2.095	3.945	15.566	6.096	-0.056	0.003	6.189	-0.149	0.022	
2	8.076	3.488	4.588	21.048	8.709	-0.633	0.401	8.618	-0.543	0.294	
3	10.490	6.705	3.786	14.332	12.198	-1.708	2.916	11.346	-0.856	0.732	
4	12.822	7.764	5.058	25.581	13.019	-0.197	0.039	14.034	-1.212	1.469	
5	14.597	12.303	2.294	5.261	15.934	-1.338	1.789	15.337	-0.740	0.548	
6	16.472	14.713	1.759	3.094	17.370	-0.898	0.807	17.004	-0.532	0.283	
7	18.652	18.448	0.204	0.041	19.692	-1.040	1.083	19.359	-0.707	0.500	
8	20.490	20.770	-0.280	0.078	21.253	-0.763	0.582	20.687	-0.197	0.039	
9	21.594	21.983	-0.390	0.152	22.114	-0.520	0.271	22.463	-0.870	0.756	
10	23.709	25.828	-2.119	4.491	25.075	-1.366	1.866	24.119	-0.410	0.168	
11	25.379	27.870	-2.490	6.201	26.802	-1.422	2.023	24.947	0.432	0.187	
12	26.467	29.272	-2.805	7.866	28.053	-1.586	2.514	28.414	-1.947	3.790	
13	27.892	29.891	-1.999	3.997	28.623	-0.731	0.534	28.873	-0.981	0.962	
14	30.012	31.832	-1.820	3.314	30.478	-0.466	0.217	29.994	0.017	0.000	
15	30.834	31.832	-0.998	0.997	30.478	0.356	0.127	30.518	0.316	0.100	
16	31.673	31.832	-0.159	0.025	30.478	1.196	1.430	31.792	-0.119	0.014	
17	33.289	33.840	-0.552	0.304	32.508	0.781	0.609	32.604	0.684	0.468	
18	34.213	35.910	-1.696	2.877	34.721	-0.507	0.257	34.378	-0.164	0.027	
19	35.906	36.380	-0.474	0.225	35.241	0.665	0.442	35.274	0.632	0.399	
20	36.914	38.041	-1.127	1.270	37.127	-0.214	0.046	37.093	-0.180	0.032	
Σ=				116.721	Σ=			17.955	Σ=		10.791
S <sub>est</sub> =				2.546	S <sub>est</sub> =			0.999	S <sub>est</sub> =		0.774

Figura 4.48 - Resultados entre os diferentes métodos para determinação de “ $K_a$ ”, sonda “A”

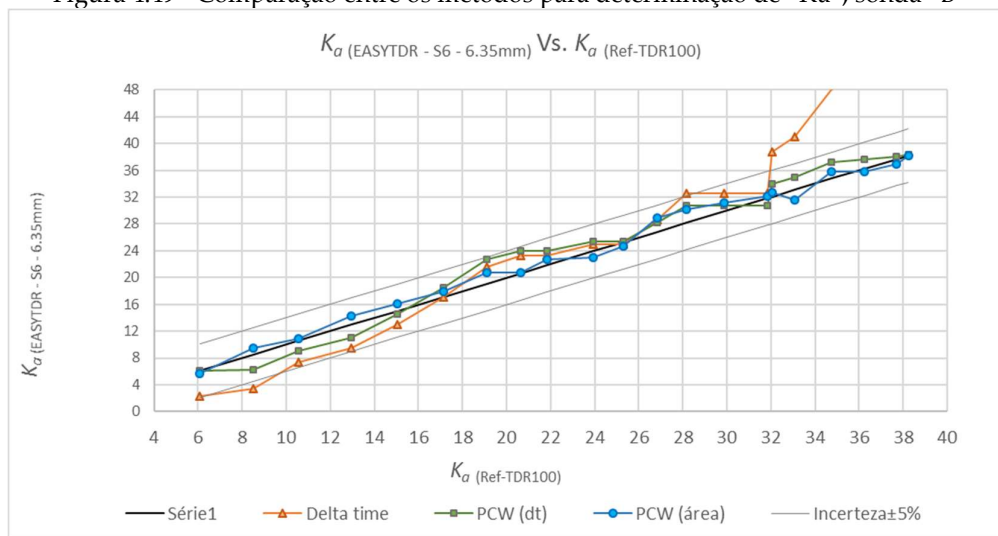


Conforme apresentado anteriormente, é possível observar a baixa variabilidade do ensaio e uma boa acurácia do sistema TDR de baixo custo na estimativa dos valores de “ $K_a$ ”, quando da utilização da sonda “A”. Destaca-se ainda, a importância de utilização da função “*Pre-Calibration Wizard - PCW*”, para aumento da acurácia nas estimativas, visto que o erro padrão médio com uso da mesma é inferior a 1 para PCW (*IABT* e *dt*).

Tabela 4.4 - Determinação da constante dielétrica aparente -  $K_a$  - Sonda “B”

ID	Ka (Referência)	Sonda “B”										
		Delta time (dt)			PCW (dt)			PCW (IABT)				
		Ka	(y-y')	(y-y')²	Ka	(y-y')	(y-y')²	Ka	(y-y')	(y-y')²		
1	6.040	1.898	4.143	17.160	4.401	1.639	2.686	6.377	-0.337	0.113		
2	8.076	2.411	5.665	32.088	5.128	2.948	8.693	9.410	-1.335	1.781		
3	10.490	3.622	6.868	47.170	6.883	3.608	13.017	10.588	-0.097	0.009		
4	12.822	8.727	4.094	16.765	13.970	-1.149	1.320	13.409	-0.587	0.345		
5	14.597	8.727	5.870	34.453	13.970	0.626	0.392	14.353	0.244	0.060		
6	16.472	16.040	0.432	0.186	22.412	-5.940	35.284	16.066	0.406	0.165		
7	18.652	17.475	1.177	1.385	23.826	-5.175	26.778	18.098	0.554	0.306		
8	20.490	17.475	3.016	9.094	23.826	-3.336	11.129	18.268	2.223	4.940		
9	21.594	18.966	2.627	6.903	25.217	-3.623	13.128	19.731	1.863	3.470		
10	23.709	17.475	6.235	38.869	23.826	-0.117	0.014	19.944	3.765	14.177		
11	25.379	16.040	9.339	87.219	22.412	2.967	8.806	21.136	4.244	18.009		
12	26.467	16.040	10.427	108.721	22.412	4.055	16.445	24.414	2.053	4.215		
13	27.892	17.475	10.417	108.517	23.826	4.066	16.529	25.388	2.504	6.272		
14	30.012	22.141	7.870	61.943	27.913	2.099	4.407	26.345	3.667	13.449		
15	30.834	27.365	3.469	12.032	31.600	-0.766	0.587	27.391	3.443	11.851		
16	31.673	29.224	2.450	6.000	32.698	-1.025	1.050	28.341	3.332	11.102		
17	33.289	37.293	-4.005	16.037	36.244	-2.955	8.733	27.185	6.104	37.254		
18	34.213	41.690	-7.477	55.898	37.384	-3.171	10.054	33.094	1.120	1.254		
19	35.906	39.464	-3.558	12.663	36.874	-0.968	0.938	33.488	2.418	5.846		
20	36.914	41.690	-4.776	22.814	37.384	-0.471	0.222	35.653	1.261	1.590		
Σ=				695.919	Σ=			180.212	Σ=			136.208
S <sub>est</sub> =				6.218	S <sub>est</sub> =			3.164	S <sub>est</sub> =			2.751

Figura 4.49 - Comparação entre os métodos para determinação de “Ka”, sonda “B”



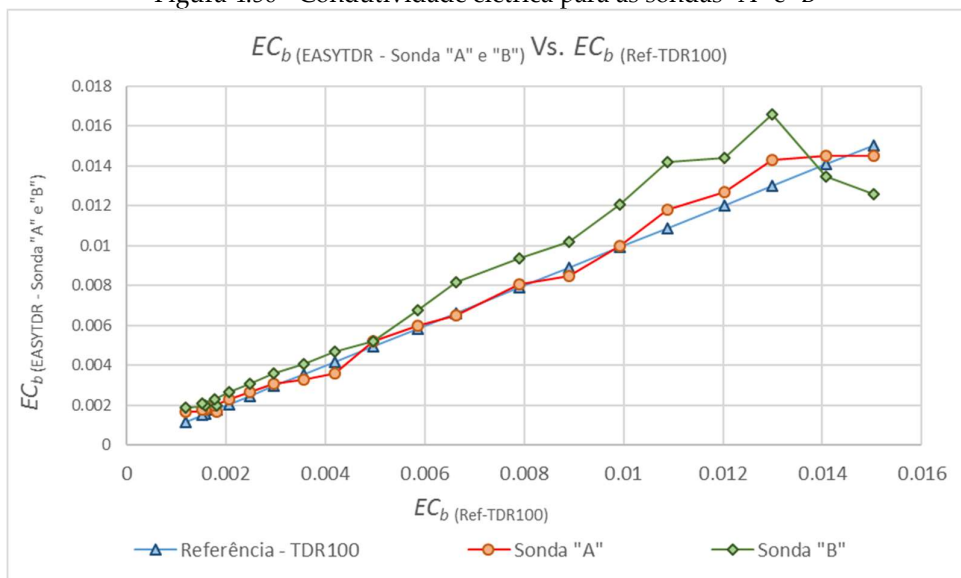
Quando utilizada a sonda “B”, os valores de “ $K_a$ ” não obtiveram acurácia satisfatória como na sonda “A”, dada a variabilidade ocorrida durante a determinação de “delta time”, ou ainda devido às falhas no processo de aplicação da função PCW.

#### 4.4.1.2 Determinação da Condutividade Elétrica - $EC_b$

A comparação dos resultados da sonda “A” com a sonda “B” (Figura 4.50) sem o uso do multiplexador, demonstrou que o aumento dos diâmetros das hastes proporcionou uma perda do potencial elétrico, sendo que para a medida inicial, com  $K_a = 6$ , a tensão final da sonda “A” foi de 3335,28 mV e para sonda “B”, 3211,06 mV, em torno de 4% menor. Isso deve-se ao fato da sonda “B” possuir uma área maior de contato (33,68 %) com o meio dielétrico onde está inserida, permitindo maior dissipação do potencial elétrico e levando a resultados superiores de condutividade elétrica do solo/solução. Este efeito é também observado após o cálculo da condutividade elétrica, que mostra

valores próximos ao valor referência, com um erro padrão médio de 0,00049839 para a sonda “A” e 0,0015839 para a sonda “B”.

Figura 4.50 - Condutividade elétrica para as sondas “A” e “B”



#### 4.4.1.3 Comparação entre Sondas e o uso do Multiplexador experimental

O sinal TDR gerado com a sonda “A” de 400 mm e 4.75 mm de diâmetro (Figura 4.51), pode ser visualizado em comparação ao sinal TDR gerado a partir do uso do multiplexador com a mesma sonda “A” (Figura 4.52).

Figura 4.51 - Sobreposição de sinais com a sonda “A” na solução de ácido acético

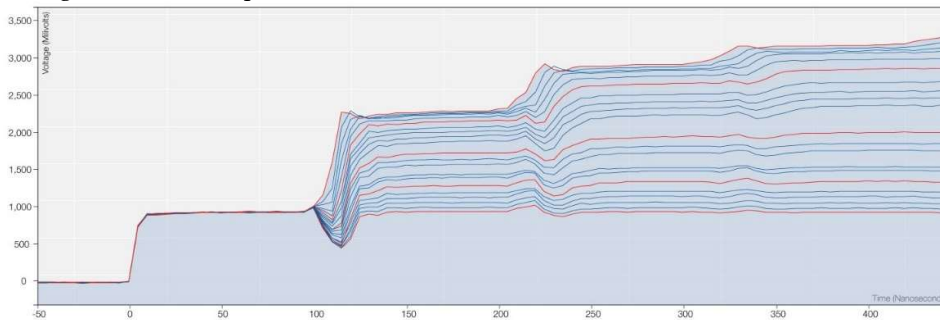
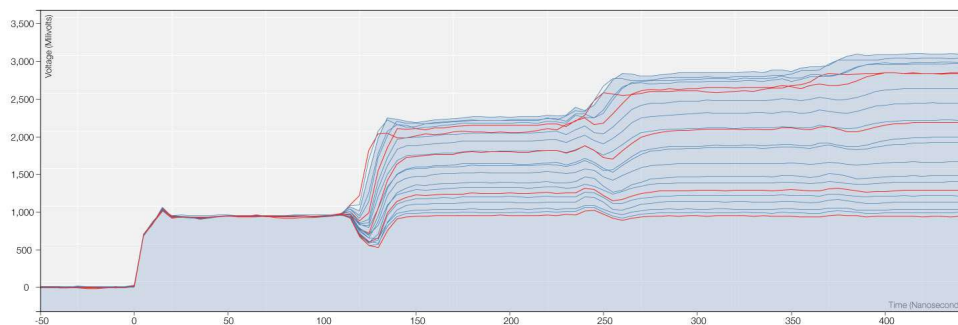


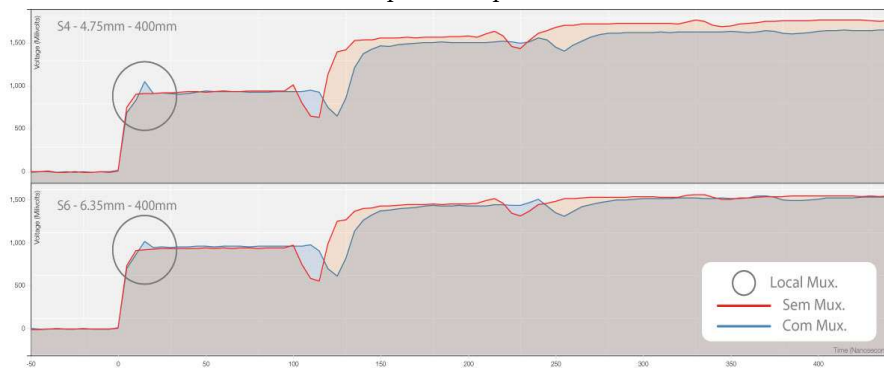
Figura 4.52 - Sobreposição de sinais com a sonda “A” multiplexada na solução de ácido acético



É possível observar as perturbações criadas pelo uso do sistema multiplexado com relays, o qual comprometeu as reflexões ao longo da linha transmissão. Observa-se que a alteração foi significativa nas cinco primeiras medições, modificando a amplitude do pulso TDR já na primeira reflexão do sinal TDR. Esse fato se dá devido as alterações de impedância do interior dos relays e das conexões utilizadas entre o protótipo de multiplexador desenvolvido e o osciloscópio MSO-19.

Observa-se ainda que houve um atraso devido à presença de um metro a mais de cabo coaxial (RG-58), para a ligação entre o osciloscópio MSO-19 e o multiplexador.

Figura 4.53 - Sinal TDR com e sem o multiplexador para ambas a sondas de 400 mm construídas





Com relação à diferença de tempo ocorrida na região de interesse (início da primeira reflexão) as alterações foram pouco significativas, não maiores que 1% (Tabela 4.1).

Figura 4.54 - Sobreposição de sinais com a sonda “B” na solução de ácido acético, em vermelho: 0 (zero), 6.939, 13.877, 20.816 e 27.754 mols (g/L) de água

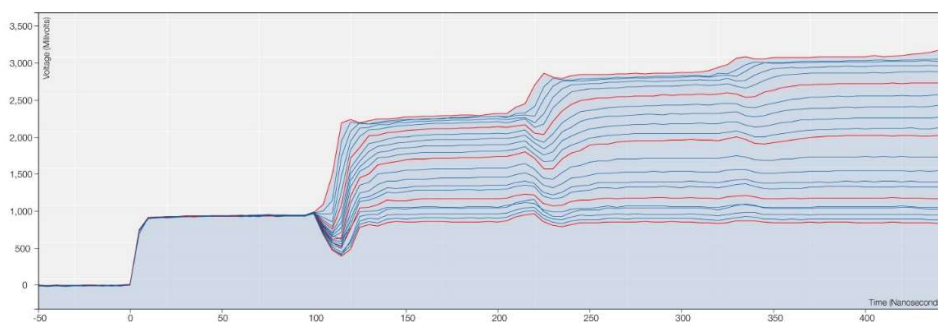
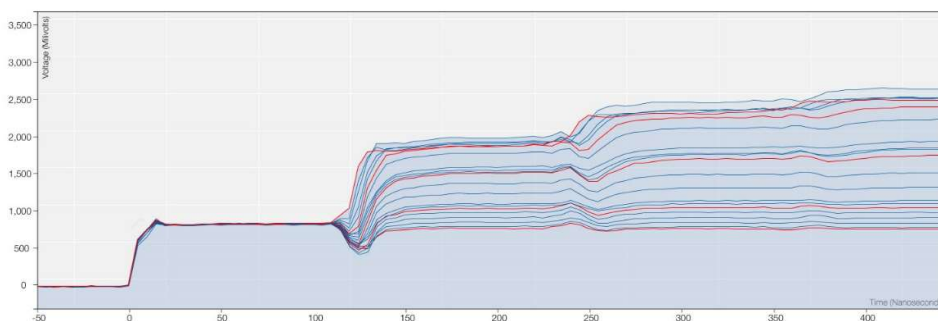


Figura 4.55 - Sobreposição de sinais com a sonda “B” multiplexada na solução de ácido acético



Para a sonda “B”, os efeitos de alteração do sinal TDR em função do uso do osciloscópio também foram constatados, sendo as considerações realizadas para a sonda “A” válidas para a sonda “B”.

#### 4.4.1.4 Teor de umidade volumétrico com o sistema EASYTDR

Na

Figura 4.56 e

Figura 4.57, são apresentados os resultados para o teor de umidade volumétrico obtidos para as sondas “A” e “B” com o sistema TDR de baixo custo. Os valores do teor de umidade foram calculados através da Equação 8 proposta por Topp *et al.* (1980).

Os resultados apresentaram homogeneidade satisfatória e boa relação com o valor de referência obtido com o sistema Campbell Scientific.

Figura 4.56 - Umidade volumétrica para a Sonda "A"

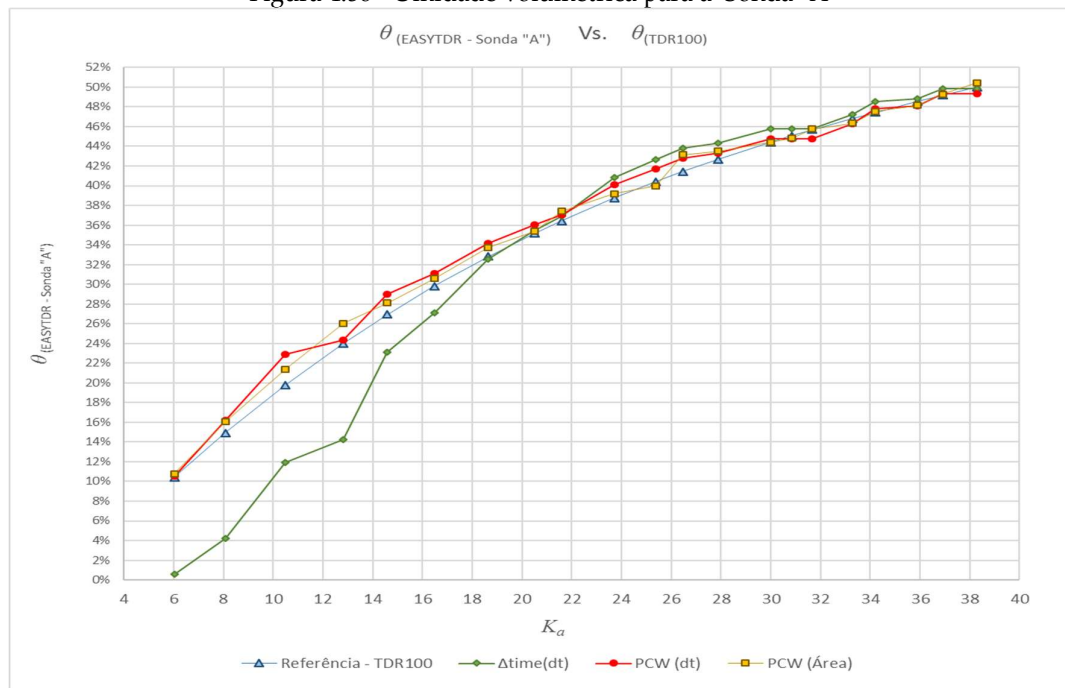
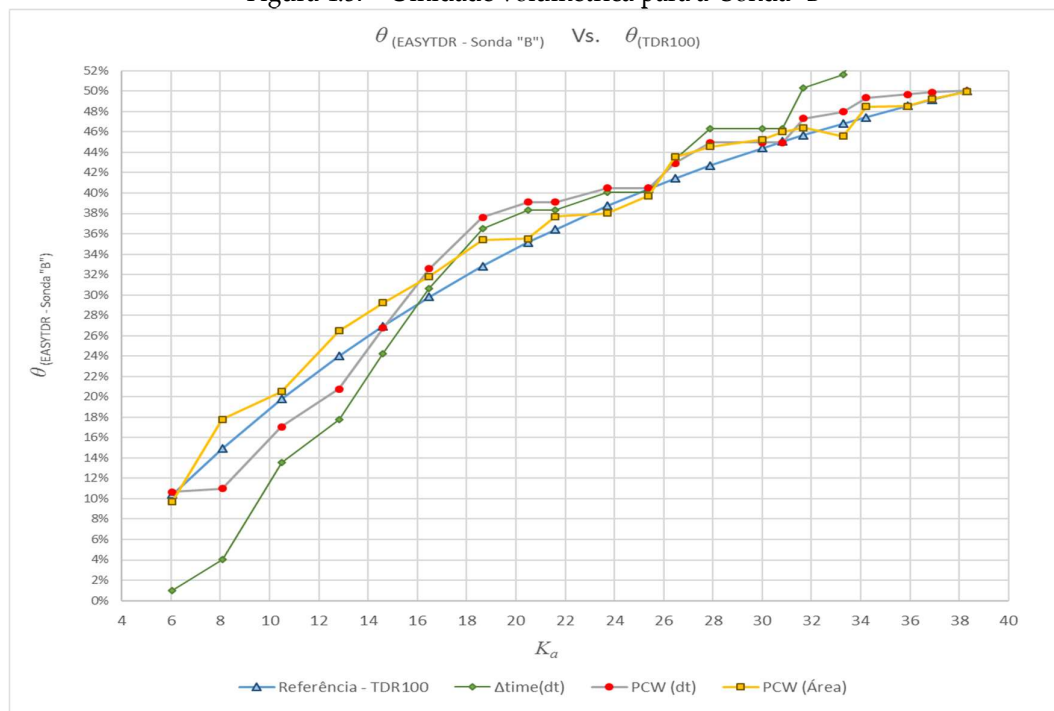


Figura 4.57 - Umidade volumétrica para a Sonda "B"



O erro padrão médio ficou em torno de 1,0% para a sonda “A” com a função PCW “IABT”, e 1,3% para sonda “B” conforme apresentado na Tabela 4.5. Os valores de umidade volumétrica provenientes do intervalo de tempo ( $\Delta t$ ), sofreram maior influência da falta de resolução causada pelo uso do hardware MSO-19, o que influenciou na maior dispersão da correlação PCW “dt”.

Tabela 4.5 - Erro padrão médio para as medidas de umidade volumétrica

ID	Sonda “A”				Sonda “B”			
	TDR100	Intervalo de tempo ( $\Delta t$ )	PCW (dt)	PCW (IABT)	TDR100	Intervalo de tempo ( $\Delta t$ )	PCW (dt)	PCW (IABT)
1	10.43%	0.58%	10.55%	10.77%	10.51%	1.00%	10.67%	9.74%
2	14.92%	4.23%	16.24%	16.06%	15.78%	4.07%	11.00%	17.79%
3	19.78%	11.93%	22.92%	21.38%	19.90%	13.54%	17.06%	20.51%
4	24.00%	14.26%	24.34%	26.03%	24.24%	17.77%	20.78%	26.49%
5	26.94%	23.10%	29.00%	28.10%	27.64%	24.26%	26.78%	29.22%
6	29.80%	27.13%	31.08%	30.56%	30.75%	30.60%	32.56%	31.80%
7	32.82%	32.55%	34.16%	33.74%	33.41%	36.50%	37.62%	35.40%
8	35.14%	35.48%	36.04%	35.38%	35.32%	38.32%	39.10%	35.50%
9	36.44%	36.88%	37.03%	37.41%	36.71%	38.32%	39.10%	37.70%
10	38.74%	40.84%	40.12%	39.17%	38.99%	40.07%	40.47%	38.01%
11	40.41%	42.67%	41.73%	39.99%	40.32%	40.07%	40.47%	39.73%
12	41.43%	43.83%	42.82%	43.13%	41.78%	43.33%	42.91%	43.53%
13	42.69%	44.32%	43.30%	43.51%	42.92%	46.29%	44.95%	44.56%
14	44.42%	45.79%	44.78%	44.41%	44.31%	46.29%	44.95%	45.25%
15	45.05%	45.79%	44.78%	44.81%	45.80%	46.29%	44.95%	46.02%
16	45.67%	45.79%	44.78%	45.76%	45.94%	50.31%	47.33%	46.41%
17	46.82%	47.19%	46.27%	46.34%	46.67%	51.61%	47.96%	45.58%
18	47.44%	48.54%	47.78%	47.55%	47.81%	55.71%	49.36%	48.47%
19	48.54%	48.84%	48.12%	48.14%	48.77%	57.26%	49.66%	48.50%
20	49.17%	49.86%	49.30%	49.28%	49.66%	58.98%	49.88%	49.23%
	$S_{est} =$	4.79%	1.25%	0.95%	$S_{est} =$	5.90%	2.36%	1.26%

## 5

## Conclusões e trabalhos futuros

Este trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento de um sistema TDR de baixo custo, para uso como instrumento de pesquisa e ferramenta auxiliar no estudo dos solos não saturados. O software EASYTDR implementado, permite uma análise detalhada dos resultados de ensaios TDR. A aplicação de algoritmos para filtragem de ruídos e as pré-calibrações por correlações, permitem o uso do osciloscópio MSO-19 com aceitável acurácia e baixa variabilidade das estimativas.

Em função da sua arquitetura, uma das características do software EASYTDR é o funcionamento através da internet, como um website. Esta funcionalidade permite a sua utilização de maneira remota, possibilitando aos usuários a realização de análise de ensaios, o compartilhamento de resultados de ensaios e equações de calibração entre usuários, a criação e customização de equações de calibração e o download de sondas TDR para fabricação com a tecnologia de impressão 3D. A plataforma online do software EASYTDR, pode ser acessada através do domínio <http://easytdr.geo.space/>, sendo necessário *login* e senha para acesso. Esta característica poderá tornar o software EASYTDR um canal de divulgação e promoção da técnica TDR, tornando a realização dos ensaios TDR mais acessível e interativa.

O custo do novo sistema TDR completo corresponde a cerca de apenas 6% do custo de um sistema TDR tradicional, ou seja, um investimento inferior a 300 dólares americanos.

O desempenho do novo sistema foi bastante satisfatório, apresentando valores medidos de constante dielétrica com boa aderência aos valores de referência, obtidos com o sistema Campbell Scientific. Os algoritmos de pré-calibração por correlações implementados ao software EASYTDR, permitiram a obtenção de um erro padrão médio (desvio padrão das estimativas) da ordem de 1%. Já nos ensaios com o procedimento TDR padrão, onde é realizada a medida do comprimento aparente " $L_a$ ", foi obtido um erro padrão de estimativa da ordem de 5%. Esta variação elevada é decorrente da baixa resolução do osciloscópio MSO-19 em comparação com o equipamento TDR100.

O sistema desenvolvido pode ser utilizado como um sistema embarcado e/ou portátil, quando alimentado por baterias. Considerando as pequenas dimensões do computador CS125 e do osciloscópio MSO-19, o sistema torna-se portátil, permitindo ainda que o mesmo seja embarcado na sonda TDR. Através da sua funcionalidade de telemetria, o sistema pode ser utilizado para o monitoramento de sondas remotas, ou até mesmo diversas sondas TDR, quando utilizado em conjunto com um multiplexador. Isso permite que o sistema atue como um sistema de segurança preditivo para estruturas geotécnicas que dependam do controle de teor umidade para sua segurança e estabilidade.

Com o desenvolvimento do sistema TDR de baixo custo e do software EASYTDR, conclui-se que é possível determinar o teor de umidade dos solos ao longo do tempo, com uso de sondas customizadas, de forma automática. Consequentemente, são

reduzidos os erros durante as fases de caracterização geotécnica e de investigação dos solos não saturados.

Destacam-se abaixo, algumas sugestões para futuros trabalhos que poderão proporcionar a expansão e continuidade desta pesquisa:

- Embarcar o sistema TDR em sondas helicoidais para uso conjunto com equipamentos de prospecção geotécnica, visando a medida do teor de umidade ao longo de várias profundidades;
- Aprimorar a acurácia do sistema TDR de baixo custo através da criação de novos algoritmos de pré-calibração ou de equações de calibração, buscando o compartilhamento destas através da plataforma do software EASYTDR;
- Aprimorar o projeto de multiplexador de baixo custo para uso em conjunto com o novo sistema TDR, visando uma menor interferência dos *relays* e proporcionando um sinal TDR com maior qualidade;
- Criar novos *drivers* para comunicação entre o software EASYTDR e osciloscópios TDR100, Trase TDR e Tektornix 1502C, visando o controle direto dos mesmos;
- Realizar o monitoramento do teor de umidade de taludes através do software EASYTDR por telemetria, visando o desenvolvimento de sistemas preditivos de monitoramento de infraestrutura rodoviária e ferroviária;
- Realizar ensaios de monitoramento da variabilidade do teor de umidade em regiões com locais com problemas de solos expansivos ou colapsáveis;
- Monitorar a posição do nível freático em regiões com forte alteração da posição deste ao longo do ano, assim como os valores do teor de umidade correspondentes às zonas não saturadas.

# 6

## Referências

AGUIAR, R. S. **Comportamento anisotrópico de um solo laterítico compactado**. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, 2015.

American Association of State Highway and Transportation Officials. **AASHTO T 217: Determination of Moisture in Soil by Means of Calcium Carbide Gas Pressure Moisture Tester (Speedy)**. Washington, United States 2014.

American Society for Testing and Materials. **ASTM D698**: Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. Pennsylvania, United States, 2012.

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.

American Society for Testing and Materials. **ASTM D4944**: Standard Test Method for Field Determination of Water (Moisture) Content of Soil by the Calcium Carbide Gas Pressure Tester. Pennsylvania, United States, 2011.

ANNAN, A. P. *Ground penetration radar workshop notes*. Sensors & Software, Inc., Internal Report, 130 p. 1992.

AQUINO FILHO, G. C. **Compactação de solos com energias, aproximadamente, iguais e diferentes procedimentos**. 1995. 91p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

ARAÚJO, A. **Algumas considerações sobre o ensaio de compactação com energia de 585 quilos joule por metro cúbico**. 1996. 71p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

ARDUINO. *Arduino Project*. Disponível em: <<http://www.arduino.cc/>>. Acesso em: jun. 2016.

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 5462**: Confiabilidade e manutenibilidade. 14 p., Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização. Rio de Janeiro, 9p, 1986.

ATMEL. *AVR 8-Bit Microcontroller Family*. Disponível em <<http://www.atmel.com/pt/br/devices/atmega328p.aspx>>. Model 328P-PU. Acessado em: ago. 2017.

BAKER, J. M., ALLMARAS, R. R. *System for automating and multiplexing soil moisture measurement by time domain reflectometry*. Soil Science Society America Journal, v. 54, 6p, 1990.



BATISTA, W. R., **Emprego da reflectometria por domínio do tempo na determinação da umidade de madeiras comerciais**. Tese (Doutorado), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2008.

BELL, J. P, T.J. DEAN and M.G. HODNETT. *Soil Moisture Measurement by an Improved Capacitance Technique. Part II. Field Techniques, Evaluation And Calibration*. Journal of Hidrology. V. 93, 79-90p, 1987.

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

BICALHO, K. V. *Modeling Water Flow In An Unsaturated Compacted Soil*. Tese (doutorado). 265p. University of Colorado. Boulder, CO, EUA, 2000.

BOOTSTRAP. *Javascript Library*. Disponível em <<http://getbootstrap.com/>>. Acesso em: mar. 2016.

BROWN, R. J. S., GAMSON, B. W. *Nuclear Magnetism Logging*. Petroleum Transactions, AIME, v. 219, pp. 201-209, 1960.

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.

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

CAMPBELL-SCIENTIFIC. Disponível em <<https://www.campbellsci.com/>>. Acessado em: fev. 2017.

CARNEIRO, B. J. I. **Comportamento de tubulões à céu aberto, instrumentados, em solo não-saturado, colapsível**. 323p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1999.

CHANASYK, D. S.; NAETH, M. A. *Field measurement of soil moisture using neutron probes*. Canadian Journal of Soil Science, v.76, n.3, p.317-323, 1996.

CONCIANI, W.; CARNEIRO, B.J.I, CRESTANA, S. & HERRMANN, P.S.P; **Emprego de TDR com sondas multi-hastes segmentadas para medida de umidade do solo**. 1º. Simpósio Brasileiro de Instrumentação Agropecuária. 1996.

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

CRUZ, T. M. L.; TEIXEIRA, A. S.; CANAFÍSTULA, F. J. F.; SANTOS, C. C.; OLIVEIRA, A. D. S.; DAHER, S. **Avaliação de sensor capacitivo para o monitoramento do teor de água do solo**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.30, n.1, p.33-45, 2010.

D3. *Data-Driven Documents*. Disponível em <<https://d3js.org/>>. Acesso em: abril, 2016.

DALTON, F. N., HERKELRATH, W. N., RAWLINS, D. S., RHOADES, J. D. *Time domain reflectometry: simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe*. Science, v. 224, 989-990, 1984.

DAVIS, J. T., RIDEAL, E. K., *Interfacial Phenomena*, 2<sup>nd</sup> ed., Academic Press, New York, N. Y., 1963.

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

DORNELES, J. G. L e RUIVARO, C. **Proposta de procedimento para calibração de sensores de umidade ECH<sub>2</sub>O para manejo de irrigação.** Vivências. Vol. 8, n. 14, p. 210-218, 2012.

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

DRNEVICH, V., YU, X., LOVELL, J. **Beta Testing Implementation of the Purdue Time Domain Reflectometry (TDR): Method for Soil Water Content and Density Measurement,** Final Report. School of Civil Engineering. Purdue University 2003.

DÓRIA, K. G. **Desenvolvimento de uma sonda TDR helicoidal para uso em conjunto com ensaio CPT.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

ELLER, H. and DENOTH, A. *A capacitive soil moisture sensor,* Journal of Hydrology. V. 185, pp. 137-146. 1996

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

ESQUIVEL, E. R. **Desenvolvimento de uma sonda baseada na reflectometria no domínio de tempo (TDR) para a determinação in situ do teor de umidade e condutividade elétrica dos solos.** Projeto de Pesquisa FAPESP, Processo 04/13273-6. 2004.

EVETT, S. R.; Soil Water Measurement by Time Domain Reflectometry, *Encyclopedia of Water Science*, NewYork, p. 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.

EVETT, S. R. *The TACQ computer program for automatic measurement of Water Content and bulk electrical conductivity using Time Domain Reflectometry*. ASAE Meeting, Florida, 1998.

EVETT, S. R. *Evapotranspiration by Soil Water Balance Using TDR and Neutron Scattering*. In Management of Irrigation and Drainage Systems, Irrigation and Drainage Div./ASCE, July 21-23, 1993.

EVETT, S. R. *TDR temperature arrays for analysis of field soil thermal properties*. In Proceedings of the Symposium on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure and Mining Applications, Sept. 7-9, 1994.

EVETT, S. R. *The TACQ computer program for automatic Time Domain Reflectometry Measurements: I. Design And Operating Characteristics*. Transactions of the ASAE, vol. 43(6), p1939-1946. 2000.

FENG, W., LIN C., DRNEVICH, V. P., DESCHAMPS, R. J. *Automation and Standardization of Measuring Moisture Content and Density Using Time Domain Reflectometry*. Final Report. School of Civil Engineering. Purdue University 1998.

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.

FHWA/IN/JHRP-95/9. *Use of Time Domain Reflectometry for Determination of Water Content and Density of Soil*. Tecnical Report – Indiana Department of Transportation and Federal Highway Administration. Purdue University. Indiana – USA, 1995.

FREDLUND, D. G. *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental. ASCE, v.132, n.3. 2005.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. *Stress state variables for unsaturated soils*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 103, n. 12919, 1977.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. *Soil mechanics for unsaturated soils*. New York: Wiley and Sons, INC., 1993.

GEORGETTI, G. B. **Deformabilidade e resistência de um solo laterítico**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

GEORGETTI, G. B. **Resistência de um solo não saturado a partir de ensaios com teor de umidade constante (CW)**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

GRAMELICH, J. C. **Avaliação da função de calibração usada para estimativa da umidade volumétrica de diferentes solos com a técnica de TDR**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

HEIMOVAARA, T. J. AND BOUTEN, W. *A Computer-Controlled 36-Channel Time Domain Reflectometry System for Monitoring Soil Water Contents*. Water Resources Research, v. 26, N<sup>o</sup>. 10, p.2311-2316, 1990.

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

HERRMANN, Jr. P. S. P. **Construção de um equipamento para medida de umidade do solo através de técnica de microondas**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

HEWLETT-PACKARD, *Time Domain Reflectometry*. Application Note. 19p. 1962.

IMKO. Disponível em <<https://imko.de/>>. Acessado em 20 junho de 2016.

INTEL. *Computer Stick CS125*. Disponível em <<https://www.intel.com.br/content/www/br/pt/compute-stick/intel-compute-stick.html>>. Acesso em: jun. 2016.

ISIXSIGMA. *Design Failure Mode and Effect Analysis – DFMEA*. Disponível em <<https://www.isixsigma.com/dictionary/dfmea/>>. Acessado em: ago. 2016.

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, n. 2, p. 147-157, 1993.

JAVASCRIPT. *ECMAScript*. Disponível em <<https://www.ecma-international.org/publications/standards/Ecma-262.htm/>>. Acesso em: abril, 2016.

JQUERY. *Javascript Library*. Disponível em <<https://jquery.com/>>. Acesso em: jun. 2016.

KATEX. *Javascript Library*. Disponível em <<https://khan.github.io/KaTeX/>>. Acesso em: jun. 2016.

KLEMUNES JR., J. *Determining soil volumetric moisture content using time domain reflectometry*. FHWA-RD-97-139, Technical Report – U.S. Department Of Transportation / Federal Highway Administration. Washington, DC – USA, 1998.

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

LATEX. *Javascript Library*. Disponível em <<https://www.latex-project.org/>>. Acesso em: jun. 2016.

LAUDON, K. C., LAUDON, J. P. **Sistemas de Informação Gerenciais; administrando a empresa digital**. 5. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2004.

LIMA, V. A. **Uso das técnicas HCT e TDR no monitoramento do processo de consolidação em reservatórios de barragens de rejeitos**. 2009. 145 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

LINK-INSTRUMENTS, MSO-19. *Mixed USB Oscilloscope*. Disponível em <<https://www.linkinstruments.com/>>. Acesso em: jul. 2016.

MATHJAX. *Javascript Library*. Disponível em <<https://www.mathjax.org/>>. Acesso em: jul. 2016.

NAVARRO, V.; CANDEL, M.; YUSTRES, A.; MERLO, O.; MENA, M. *Analysis of installation of FDR sensors in a hard soil*. Geotechnical Testing Journal. V. 29, N. 6, p. 1-5, 2006.

NISSEN H.; MOLDRUP, P. *Proceedings of the Symposium: Time Domain Reflectometry Applications in Soil Science held at the Research Centre Foulum*. Danish Institute of Plant and Soil Science. p. 9-23, 1994.

NOFZIGER, D. L. *Errors in gamma-ray measurement of water content and bulk density in nonuniform soils*. Soil Science Society of America Journal, v. 42, p. 845-850, 1978.

LIN, C; DRNEVICH, V. *TDR Method for Compaction Quality Control: Multi Evaluation and Sources of Error*. **Geotechnical Testing Journal**, v. 35, no. 5, 2012.

OLIVEIRA-SILVA, R. **Utilização da RMN no estudo de rochas reservatório siliciclásticas**. 207 p. São Carlos-SP, Universidade de São Paulo. 2014.

ORACLE-VIRTUALBOX. Disponível em <<https://www.virtualbox.org/>>. Acesso em: maio, 2016.

PAES-DE-CAMARGO, A e LOPES-DA-COSTA, A. O. Determinação rápida da umidade do solo pelo método da reação com o carbureto de cálcio. Boletim Técnico do Instituto Agronômico do Estado de São Paulo. Vol. 19, p.1-10, Campinas. 1960.

PEREIRA, A. **Resistência ao cisalhamento de solos não saturados: análise experimental e teórica**. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre, RS: PPGECC/UFRGS, 2006.

PHP. *Programming Language*. Disponível em <<https://secure.php.net/>>. Acesso em: maio, 2016.

PHP-DESKTOP. *Software*. Disponível em <<https://github.com/cztomczak/phpdesktop/>>. Acesso em: set. 2016.

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

ROTH, C.H.; MALICKI, M.A. & PLAGGE, R. *Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR*. **Journal of Soil Science**, v. 43, n. 1, p. 1-13, 1990.

SANTOS, D. B. dos *et al.* Calibração de TDR: desempenho de alguns métodos e equações de calibração. **Revista Agraria**, v. 5, n. 16, p. 131-139, 2012.

SHENG D., GENS A., FREDLUND D., SLOAN S., *Unsaturated soils: from constitutive modelling to numerical algorithms*. Computers and Geotechnics, v. 35, p. 810-824, 2008.

SHENG D., *Review of fundamental principles in modelling unsaturated soil behaviour*. Computers and Geotechnics, v. 38, p. 757-776, 2011.



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° HWA/IN/JTRP-95/9, **Joint Transportation Research Program**, Indiana Department of Transportation Purdue University, 1995.

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

SILVA, M. A. P. **O Estudo de parâmetros geotécnicos de solo arenoso com comportamento anisotrópico**. 1996. 113p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

SOARES, R. M. **Resistência ao Cisalhamento de um Solo Coluvionar Não Saturado do Rio de Janeiro, RJ**. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

SPECMETERS. Disponível em <<http://www.specmeters.com/>>. Acessado em: ago. 2016.

STINGACIU, L. R. *Characterization of natural porous media by NMR and MRI techniques: High and low magnetic field studies for estimation of hydraulic properties*. 2010. Institute of Chemistry and Dynamics of the Geosphere.

SUCRE, O. E. *A Low-Field NMR Tool for Soil Moisture*. Tese (doutorado). RWTH. Aachen, Alemanha, 2011.

TEIXEIRA, M. M. C. A. D.; **Modelagem hidro-mecânica dos solos colapsíveis de Petrolândia**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2006.

TEIXEIRA, C. F. A.; MORAES, S. O.; SIMONETE, M. A.; Desempenho do Tensiômetro, TDR e Sonda de Nêutrons na determinação da umidade e condutividade hidráulica do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 29, núm. 2, 2005, pp. 161-168.

TEIXEIRA, M. M. C. A. D. **Modelagem hidro-mecânica dos solos colapsíveis de Petrolândia**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. 118p. 2006.

TEIXEIRA, C. F. A.; MORAES, S. O.; SIMONETE, M. A.; Calibração de Sonda de Nêutrons: amostragem de solos versus tensiometria. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, vol. 1, núm. 1, p. 58-67, Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, SC. 2003.

TEKTRONIX. *Metallic Time Domain Reflectometer*. Disponível em <<http://www.tek.com/>>. Model N°. 1502C. Acessado em: ago. 2016.

TERZAGHI, K. *Theoretical soil mechanics*, Wiley, New York. 1943.

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

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN A. P. **Electromagnetic 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.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. *Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines*. *Water Resources Research*, v. 16, n.3, p. 574–582, 1980.

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

TRUSS, S. W. and WEST, L. J. *Borehole-Based TDR Probes in a Layered Sandstone Aquifer: Optimising Data Quality*. Proc. TDR 2006, Purdue University, West Lafayette, USA, Paper ID 32, 13 p., 2006.

TURATTI, A.L.; VILLAGRA, M.M.; PONCE, J.E.; BACCHI, O.O.S. e REICHARDT, K. **Variabilidade espacial de solo e sua implicação na calibração de sondas de nêutrons**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 14, p. 259-262, 1990.

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

VIELMO, A. L. **Limite superior da retenção da água no solo: método de campo e método de estimativa**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2008.

W3TECHS. Disponível em: < <https://w3techs.com/technologies/details/pl-php/all/all>>. Acessado em: fev. 2017.

WINTDR. Disponível em <<https://psc.usu.edu/soilphysics/win-tdr/>>. Acesso em: ago. 2016.

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

ZAZUETA, F.S.; XIN, J. *Soil moisture sensors*. Bulletin 292. University of Florida, 1994.