

CLEBER DECARLI DE ASSIS

**AVALIAÇÃO DE UMA SONDA TDR HELICOIDAL PARA A
ESTIMATIVA DO TEOR DE UMIDADE DOS SOLOS EM CAMPO E
LABORATÓRIO**

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

Orientador: Prof. Dr. Edmundo Rogério Esquivel

São Carlos
2008

FOLHA DE JULGAMENTO

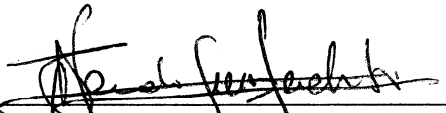
Candidato: Engenheiro **CLEBER DECARLI DE ASSIS**

Dissertação defendida e julgada em 09/05/2008 perante a Comissão Julgadora:



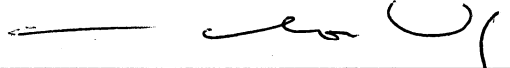
Prof. Dr. **EDMUNDO ROGERIO ESQUIVEL (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO




Prof. Dr. **HERALDO LUIZ GIACHETI**
(Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"/UNESP-Campus de Bauru)

APROVADO

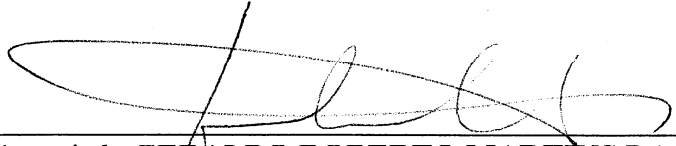


Dr. **CARLOS MANOEL PEDRO VAZ**
(Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/EMBRAPA)

APROVADO



Prof. Associado **LAZARO VALENTIN ZUQUETTE**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Geotecnia



Prof. Associado **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

A Deus.
Aos meus queridos pais Alcides e Doracy.
À minha amada esposa Celiana.

AGRADECIMENTOS

Aos meus irmãos, Adrieri, Diego Augusto, Maria Eduarda e Maria Fernanda, pelo amor, carinho e companheirismo.

Aos meus sogros, José Filho e Algeny, pelo carinho e apoio em todos os momentos.

Ao meu cunhado, Ivan, pelo companheirismo e apoio. Às minhas cunhadas, Poliana e Graciela, pelo amor, carinho e cooperação no trabalho.

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

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de mestrado concedida.

Ao Professor Benedito de Souza Bueno pela oportunidade dada de conhecer o Departamento de Geotecnia da EESC-USP e pela oportunidade de entrar no mestrado.

Ao Dr. Carlos Vaz por sua preciosa ajuda no estudo desta técnica, estando sempre a nossa disposição para a solução de quaisquer problemas durante a execução da pesquisa.

À Prefeitura do Campus da EESC-USP, por autorizar a realização de ensaios de campo nos Campus I e II.

Ao Professor Sérgio Rohn e à Prefeitura do Campus da UFSCar por ter disponibilizado o Campus da UFSCar para realização dos ensaios de campo.

Aos Professores Jocélio de Cabral Mendonça e Eduardo Suassuna da Nóbrega pelo incentivo na realização do mestrado.

Aos funcionários do Departamento de Geotecnia da EESC-USP, José Luís, Décio, Benedito, Antônio Garcia, Maristela, Neiva, Antônio Carriel, Herivelto, Álvaro e Clever, pelo apoio incondicional sempre que necessário, muitas vezes ajudando mais do que lhes cabiam.

Ao amigo, Oscar dos Santos Neto, pela ajuda em qualquer momento, pelos seus conselhos, pelos seus ensinamentos e principalmente por sua valiosa amizade.

Aos amigos, Alexandre, André, Diogo, Gilberto, Julio Zambrano, Leonardo, Marcelo, Osvaldo, Ovídio e Régis, pelo companheirismo, pela força, por todos os momentos que passamos juntos durante o período do mestrado e pela amizade inestimável a qualquer cultivarei para sempre.

Aos amigos do Departamento de Geotecnia, Alberto, Ana Elisa, Camilla, Crisley, Eder, Fagner, Fernando, Heraldo, Juliana, Julio Fialho, Junio, Lucas, Luciene, Neto, Rafael, Roger, Simone, Valéria e todos os outros aqui não citados pela cooperação.

Ao amigo, José Carlos, pela ajuda nos ensaios realizados no CEULP-ULBRA.

Enfim a todos aqueles, que de alguma forma cooperaram na realização deste sonho.

Muito Obrigado!

RESUMO

ASSIS, C. D. **Avaliação de uma Sonda TDR Helicoidal para a Estimativa do Teor de Umidade dos Solos em Campo e Laboratório.** 2008. 178 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

Este trabalho de pesquisa apresenta a avaliação de uma sonda TDR helicoidal para estimar o teor de umidade dos solos, em diferentes profundidades, através da técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR). Essa sonda, desenvolvida especificamente para esse fim, foi devidamente calibrada em laboratório para diferentes tipos de solo. O processo de calibração consistiu na determinação da constante dielétrica aparente (K_a) e condutividade elétrica volumétrica (EC_b) de um mesmo solo com diferentes teores de umidade. Posteriormente foram buscadas correlações entre K_a e o teor de umidade gravimétrico (w), obtido em estufa. São propostas correlações entre w e K_a , entre w e $\sqrt{K_a}$ e entre teor de umidade volumétrico (θ) e K_a . Também foram consideradas as correlações propostas por Yu e Drnevich (2004), visando estimar também a massa específica seca dos solos. Foram realizados ensaios de campo para a validação das equações de calibração. Os valores dos teores de umidade estimados através da técnica da reflectometria no domínio do tempo, tanto em laboratório como em campo, foram comparados com os valores de teor de umidade obtidos com o método da estufa. Com base nos resultados foram determinados os erros referentes às calibrações. Nos ensaios de campo, os teores de umidade obtidos através da correlação entre w e $\sqrt{K_a}$ apresentaram melhores resultados, quando comparados com aqueles estimados com as outras correlações. Pelos resultados obtidos conclui-se que a técnica TDR é uma alternativa viável para a estimativa em campo do teor de umidade em grandes profundidades.

Palavras chave: reflectometria no domínio do tempo, teor de umidade, constante dielétrica e condutividade elétrica volumétrica.

ABSTRACT

ASSIS, C. D. **Evaluation of a helicoidal TDR probe to estimate the soil water content in laboratory and in situ.** 2008. 178 p. Master Thesis – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

In this work is presented the evaluation of a recently developed helicoidal probe used for estimating the soil water content through the Time Domain Technology (TDR). This probe has been calibrated in laboratory for different types of soils. The calibration process consisted in assessing the values of the apparent dielectric constant (K_a) and the bulk electric conductivity (EC_b) of a specific soil at different levels of water content (w). Subsequently, correlations between the apparent dielectric constant and the water content have been established. The same has done with the bulk electric conductivity. Correlations between K_a and w , $\sqrt{K_a}$ and w , θ (volumetric water content) and K_a have been proposed. Also, the correlations proposed by Yu and Drnevich (2004) have been considered. To validate the proposed correlations, tests using the helicoidal probe were performed in the field. Estimated values of field water content, using the TDR technology have been compared to the correspondent oven water content values. Based on these comparisons, errors regarding the calibrations have been calculated. In the field tests, the correlations between $\sqrt{K_a}$ and w have presented more accurate results than those obtained with the other correlations. Experimental results have shown that the TDR technology for estimating water content at different depths in the field is feasible and expedite.

Keywords: time domain reflectometry, water content of soils, geotechnical field tests, dielectric constant and electrical conductivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Desenho esquemático de uma sonda de nêutrons inserida no solo (modificado de BELL, 1987).....	29
Figura 2.2 – Princípio de funcionamento do GPR.	32
Figura 2.3 – Exemplo de trace.....	36
Figura 2.4 – Método das tangentes (KLEMUNES Jr., 1998).....	37
Figura 2.5– Método dos picos (KLEMUNES Jr., 1998).....	38
Figura 2.6 – Método das linhas divergentes (KLEMUNES Jr., 1998).....	38
Figura 2.7 – Método das tangentes alternativo (KLEMUNES Jr., 1998).	40
Figura 2.8 – Forma de onda de um pulso eletromagnético. (ROBINSON <i>et al.</i> 2003)	40
Figura 2.9: Esquema de aquisição de dados do TDR.....	41
Figura 2.10 – Cabo Coaxial.....	42
Figura 2.11 - Alguns modelos de equipamentos TDR comercializados (VAZ, 2001).	43
Figura 2.12 – Comparação entre as curvas determinadas pela Equação 11 e pela Equação 13, com $n=0.5$ e $\beta = 0.5$ (JONES <i>et al.</i> 2002).....	45
Figura 2.13 - Modelos de configurações de sondas (Fonte: Jones <i>et al.</i> , 2002).....	48
Figura 2.14 – Sonda Helicoidal (VAZ e HOPMANS, 2001).....	51
Figura 3.1 – Esquema geral da sonda projetada.	56
Figura 3.2 – Detalhes de projeto da sonda projetada.....	57
Figura 3.3 – Protótipo da sonda.....	58
Figura 3.4 – Painel frontal do Tektronix 1502C.....	59
Figura 3.5 - Janela após a execução do comando <i>Sweep</i>	61
Figura 3.6 - Janela após a o ajuste da escala.	61
Figura 3.7 - Janela após o ajuste inicial da localização do primeiro pico.	62

Figura 3.8 - Janela após o comando <i>Auto Analyze</i>	62
Figura 3.9 - Janela típica do software WinTDR.	63
Figura 3.10 - Janela de ajuste de opções do software WinTDR.	63
Figura 3.11 – Materiais utilizados na execução do ensaio.....	67
Figura 3.12 –Micro- Computador usado na aquisição de dados.....	68
Figura 3.13 – Compactação do solo.....	69
Figura 3.14 – Nivelamento do topo do molde.	70
Figura 3.15 – Pesagem do conjunto molde mais solo.....	70
Figura 3.16 – Material após ter sido homogeneizado na betoneira.	71
Figura 3.17 – Locais onde foram realizados os ensaios de campo.	73
Figura 3.18 - Aparelhamento para realização de ensaios SPT mecanizados, adaptado para a cravação da sonda TDR.	75
Figura 3.19 - Adaptador usado para o levantamento do conjunto de hastes e sonda, sem intervir com o cabo da sonda TDR.	76
Figura 3.20 - Coleta de amostra de solo com amostrador bipartido.	77
Figura 3.21 - Detalhe do trado manual.	79
Figura 3.22 - Conjunto sonda-haste cravado no solo.....	80
Figura 3.23 - Detalhe do computador portátil e do equipamento TDR.	80
Figura 3.24 - Coleta amostra de solo para determinação do teor de umidade gravimétrico....	81
Figura 4.1 – Curva Granulométrica do Solo 1	83
Figura 4.2 – Curva Granulométrica do Solo 2.....	84
Figura 4.3 – Curva Granulométrica do Solo 3	84
Figura 4.4 – Curva granulométrica do Solo 4.....	85
Figura 4.5 – Curva granulométrica do Solo 5.....	85
Figura 4.6 – Curva granulométrica do Solo 6.....	86

Figura 4.7 – Curva granulométrica do Solo 7.	86
Figura 4.8 – Curva granulométrica do Solo 8.	87
Figura 4.9 – Curva granulométrica do Solo 9.	87
Figura 4.10 – Curva granulométrica do Solo 10.	88
Figura 4.11 – Forma de onda obtida a 2,0 m de profundidade.....	97
Figura 5.1 – Comparação entre as constantes dielétricas determinadas em diferentes recipientes.....	101
Figura 5.2 – Comparação entre os traces obtidos com diferentes sondas com diferentes comprimentos de cabo (Solo 8, com $w = 62.8\%$).....	102
Figura 5.3 – Determinação das constantes da correlação de w versus $\sqrt{K_a}$	103
Figura 5.4 – Comparação entre teor de umidade gravimétrico e teor de umidade gravimétrico estimado dos solos.....	104
Figura 5.5 – Determinação das constantes da correlação de w versus K_a para o Solo 1.....	105
Figura 5.6 – Comparação entre teor de umidade gravimétrico e teor de umidade gravimétrico estimado dos solos.....	106
Figura 5.7 – Determinação das constantes da correlação de θ versus K_a	107
Figura 5.8 – Comparação entre teor de umidade volumétrico e teor de umidade volumétrico estimado dos solos.....	108
Figura 5.9 – Determinação das constantes a e b	110
Figura 5.10 – Determinação das constantes c e d	110
Figura 5.11 – Comparação entre teor de umidade gravimétrico e teor de umidade gravimétrico estimado dos solos.....	113
Figura 5.12 – Comparação entre massa específica seca e massa específica seca estimada dos solos.....	113
Figura 5.13 – Determinação das constantes a e b	115

Figura 5.14 – Determinação das constantes c e d .	115
Figura 5.15 – Comparação entre teor de umidade gravimétrico e teor de umidade gravimétrico estimado dos solos.	117
Figura 5.16 – Comparação entre massa específica seca e massa específica seca estimada dos solos.	117
Figura 5.17 – EESC-USP Campus I: Perfil do teor de umidade no Furo 1.	120
Figura 5.18 – EESC-USP Campus I: Perfil do teor de umidade no Furo 2.	120
Figura 5.19 – EESC-USP Campus I: Perfil do teor de umidade no Furo 3.	121
Figura 5.20 – EESC-USP Campus I: Perfil do teor de umidade no Furo 4.	121
Figura 5.21 – EESC-USP Campus II: Perfil do teor de umidade no Furo 1.	123
Figura 5.22 – EESC-USP Campus II: Perfil do teor de umidade no Furo 2.	123
Figura 5.23 – EESC-USP Campus II: Perfil do teor de umidade no Furo 3.	124
Figura 5.24 – EESC-USP Campus II: Perfil do teor de umidade no Furo 4.	124
Figura 5.25 – UFSCar-Bosque Paulistinha: Perfil do teor de umidade no Furo 1.	126
Figura 5.26 – UFSCar-Bosque Paulistinha: Perfil do teor de umidade no Furo 2.	126
Figura 5.27 – UFSCar-Bosque Paulistinha: Perfil do teor de umidade no Furo 3.	127
Figura 5.28 – UFSCar-Bosque Paulistinha: Perfil do teor de umidade no Furo 4.	127
Figura 5.29 – UFSCar-DECiv: Perfil do teor de umidade no Furo 1.	129
Figura 5.30 – UFSCar-DECiv: Perfil do teor de umidade no Furo 2.	129
Figura 5.31 – UFSCar-DECiv: Perfil do teor de umidade no Furo 3.	130
Figura 5.32 – UFSCar-DECiv: Perfil do teor de umidade no Furo 4.	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Coordenadas geográficas dos ensaios de campo realizados na EESC-USP.....	78
Tabela 3.2 – Coordenadas geográficas dos ensaios de campo realizados na UFSCar.....	78
Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de caracterização para o Solo 1 a 10.....	88
Tabela 4.2 - Resultados correspondentes ao Solo 1.....	89
Tabela 4.3 – Resultados correspondentes ao Solo 2.....	89
Tabela 4.4 – Resultados correspondentes ao Solo 3.....	90
Tabela 4.5 – Resultados correspondentes ao Solo 4.....	91
Tabela 4.6 – Resultados correspondentes ao Solo 5.....	92
Tabela 4.7 – Resultados correspondentes ao Solo 6.....	92
Tabela 4.8 - Resultados correspondentes ao Solo 7.....	93
Tabela 4.9 – Resultados correspondentes ao Solo 8 – Sonda 1.....	94
Tabela 4.10 – Resultados correspondentes ao Solo 8 – Sonda 2.....	94
Tabela 4.11 – Resultados correspondentes ao Solo 8 – Sonda 3.....	95
Tabela 4.12 - Resultados correspondentes ao Solo 9.....	95
Tabela 4.13 - Resultados correspondentes ao Solo 10.....	96
Tabela 4.14 – Leituras de constante dielétrica para análise do efeito de borda.....	96
Tabela 4.15 - Resultados correspondentes ao Campus I e II da EESC-USP.....	98
Tabela 4.16 - Resultados correspondentes à UFSCar.....	99
Tabela 5.1 – Constantes obtidas através da correlação w versus $\sqrt{K_a}$	104
Tabela 5.2 – Erros padrão encontrados para as estimativa de teor de umidade gravimétrico.	104
Tabela 5.3 – Constantes obtidas através da correlação de w versus K_a	106

Tabela 5.4 – Erros padrão encontrados para as estimativa de teor de umidade gravimétrico.	106
Tabela 5.5 – Constantes obtidas através da correlação de θ versus K_a	107
Tabela 5.6 – Erros padrão encontrados para as estimativa de teor de umidade volumétrico.	108
Tabela 5.7 – Constantes obtidas através da correlação proposta por Yu & Drnevich (2004).	112
Tabela 5.8 – Erros padrão encontrados para as estimativa de teor de umidade gravimétrico e massa específica seca.....	112
Tabela 5.9 – Constantes obtidas através da correlação proposta por Yu & Drnevich (2004).	116
Tabela 5.10 – Erros padrão encontrados para as estimativa de teor de umidade gravimétrico e massa específica seca.....	116
Tabela 5.11 – Resultados correspondentes ao Campus I da EESC-USP.....	119
Tabela 5.12 – Resultados correspondentes ao Campus II da EESC-USP.	122
Tabela 5.13 – Resultados correspondentes ao Bosque Paulistinha - UFSCar.	125
Tabela 5.14 – Resultados correspondentes ao DECiv - UFSCar.....	128

LISTA DE SÍMBOLOS

w	teor de umidade gravimétrico
w_{TDR}	teor de umidade gravimétrico estimado
θ	teor de umidade volumétrico
θ_{TDR}	teor de umidade volumétrico estimado
w_L	limite de liquidez
w_P	limite de plasticidade
IP	índice de plasticidade
TDR	reflectometria no domínio do tempo
FDR	reflectometria no domínio da frequência
GPR	radar de penetração no solo
ϵ_b	constante dielétrica
ϵ_0	constante dielétrica do vácuo
ϵ_w	constante dielétrica da água
ϵ_{ar}	constante dielétrica do ar
ϵ_s	constante dielétrica dos sólidos
K_a	constante dielétrica aparente
EC_b	condutividade elétrica volumétrica dos solos (S/m)
L	comprimento da sonda (m)
L_a	comprimento aparente da sonda (m)
v	velocidade de propagação do pulso eletromagnético (m/s)
c	velocidade da luz (3×10^8 m/s)
t	tempo de propagação do pulso eletromagnético (s)
C_m	constante de calibração do aparelho

V_p	relação entre velocidade de propagação e velocidade da luz
Z_0	impedância da sonda (Ω)
Z_c	impedância do cabo (50Ω)
V	pulso de voltagem
f_T	coeficiente de correção da temperatura
S_r	grau de saturação
e	índice de vazios
η	porosidade
ρ	massa específica do solo
ρ_d	massa específica seca do solo
ρ_w	massa específica da água
ρ_s	massa específica dos sólidos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
2 REVISÃO DA LITERATURA	27
2.1 Método Gravimétrico	27
2.2 Método da Sonda de Nêutrons	28
2.3 Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR)	30
2.4 Radar de Penetração no Solo (GPR).....	31
2.5 Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR)	33
2.5.1 Princípios	34
2.5.2 Equipamentos Utilizados.....	41
2.5.3 Calibração.....	43
2.5.4 Tipos de sondas	47
2.5.5 Fatores que afetam a determinação da constante dielétrica.....	51
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	55
3.1 Desenvolvimento da Sonda Helicoidal	55
3.2 Equipamentos Utilizados.....	58
3.3 Programa WinTDR.....	59
3.4 Amostragem	64
3.5 Ensaio de Laboratório.....	66
3.5.1 Calibração do equipamento	66
3.5.2 Ensaio de efeito de borda.....	72
3.6 Ensaio de Campo	73
3.6.1 Primeira Etapa	73

3.6.2 Segunda etapa	77
4 RESULTADOS	83
4.1 Caracterização das Amostras	83
4.2 Calibração do Equipamento	88
4.2.1 Resultados correspondentes ao Solo 1	88
4.2.2 Resultados correspondentes ao Solo 2	89
4.2.3 Resultados correspondentes ao Solo 3	90
4.2.4 Resultados correspondentes ao Solo 4	90
4.2.5 Resultados correspondentes ao Solo 5	91
4.2.6 Resultados correspondentes ao Solo 6	92
4.2.7 Resultados correspondentes ao Solo 7	93
4.2.8 Resultados correspondentes ao Solo 8	93
4.2.8.1 Resultados correspondentes à sonda 1	93
4.2.8.2 Resultados correspondentes à sonda 2	94
4.2.8.3 Resultados correspondentes à sonda 3	94
4.2.9 Resultado Solo 9	95
4.2.10 Resultado Solo 10	95
4.3 Efeito de Borda	96
4.4 Ensaio de Campo	97
4.4.1 Primeira etapa	97
4.4.2 Segunda etapa	98
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	101
5.1 Análise do Ensaio de Efeito de Borda	101
5.2 Análise do Comprimento do Cabo Coaxial	102
5.3 Análise das Correlações Alternativas	103

5.4 Análise das Correlações Propostas por Yu e Drnevich	109
5.5 Análise dos Resultados de Campo.....	118
6 CONCLUSÃO.....	131
REFERÊNCIAS	133
ANEXO A – CORRELAÇÕES ENTRE $W(\%)$ E $\sqrt{K_A}$	145
ANEXO B – CORRELAÇÕES ENTRE $W(\%)$ E K_A.....	151
ANEXO C – CORRELAÇÕES ENTRE $\theta(\%)$ E K_A.....	157
ANEXO D – CORRELAÇÕES YU E DRNEVICH (2004) NA CONDIÇÃO NÃO SATURADA.....	163
ANEXO E – CORRELAÇÕES DE YU E DRNEVICH (2004) NA CONDIÇÃO SATURADA.....	173

1 INTRODUÇÃO

O teor de umidade do solo é um parâmetro utilizado em estudos agrícolas, hidrológicos, meteorológicos, geotécnicos, dentre outros. Como parâmetro geotécnico, o teor de umidade é importante na elaboração de projetos e avaliação do desempenho de estruturas geotécnicas. Na Mecânica dos Solos, o teor de umidade influi em parâmetros, tais como, resistência ao cisalhamento, deformabilidade, compressibilidade e condutividade hidráulica.

A determinação do teor de umidade dos solos pode ser obtida em laboratório ou *in situ*. Dentre os métodos para determinação do teor de umidade pode-se destacar o método gravimétrico, que determina o teor de umidade através da pesagem em balança antes e depois da secagem de amostras em estufa. O método gravimétrico é considerado um método padrão, devido à sua precisão e simplicidade. No entanto, esta técnica torna-se insatisfatória em situações nas quais se necessita de rapidez na obtenção dos resultados e quando há um grande número de determinações a serem feitas. Um exemplo é o caso do monitoramento contínuo de um maciço em diversos locais e em diferentes profundidades.

Dentre os métodos para determinação do teor de umidade em campo, destacam-se as técnicas que utilizam a sonda de nêutrons, a reflectometria no domínio da frequência (FDR), o radar de penetração do solo (GPR) e a reflectometria no domínio do tempo (TDR). A técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR), apesar de ser relativamente nova, é promissora para a estimativa do teor de umidade em diferentes profundidades de um maciço de solo.

A técnica TDR utiliza um dispositivo que propaga ondas eletromagnéticas transversas para o solo, através de um cabo coaxial e uma sonda especial. Quando a onda encontra uma diferença de impedância, ou seja, no instante que a onda atinge a sonda, parte da onda é refletida de volta ao equipamento, registrando um pico inicial. Um segundo pico é registrado

quando a porção restante da onda atinge o final da sonda. A técnica permite então estimar a constante dielétrica aparente e a condutividade elétrica volumétrica do solo, baseando-se no tempo de propagação da onda. Para a estimativa do teor de umidade através dessa técnica são utilizadas calibrações que correlacionam a constante dielétrica aparente, a condutividade elétrica volumétrica e o teor de umidade.

A aplicação da técnica de reflectometria no domínio do tempo permite monitorar o avanço da infiltração de água no solo em seus diversos estágios, tanto ao longo do tempo quanto ao longo da profundidade. Essa técnica, robusta e não destrutiva, para medições do teor de umidade *in situ*, é essencial para o monitoramento e pesquisas em relação à resposta da dinâmica hidrológica (WEILLER *et al.* *Apud* DIENE, 2004).

Yu (1998) analisou a aplicação da técnica TDR no transporte experimental de solutos pro meio do solo. Shen (1999) utilizou o TDR para a determinação do teor de umidade e o monitoramento da concentração de efluentes durante o fluxo saturado e não saturado através do solo.

Drnevich (2005) apresenta novas aplicações da técnica TDR na engenharia geotécnica, como:

- controle de qualidade da compactação;
- investigação dos valores de aumento da umidade e decréscimo da densidade, com o fim da liquefação das areias;
- utilização para solos com modificados com cal, cimento, e outros agentes de estabilização, com a medida da condutividade elétrica volumétrica seguindo o processo de hidratação;
- avaliação do progresso e da eficácia do processo de estabilização do solo.

A aplicação da técnica TDR em solos tropicais foi feita por Silva *et al.* (1999), que determinaram o teor de umidade em diferentes camadas de um latossolo distrófico. Tommaselli *et al.* (2001) realizaram a calibração de cinco solos da região de Piracicaba-SP e analisaram a adequação da calibração obtida com as curvas genéricas de calibração para estimativa do teor de umidade.

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o desempenho de uma sonda TDR helicoidal na estimativa do teor de umidade dos solos em laboratório e em campo, estabelecendo diferentes correlações teor de umidade (gravimétrico ou volumétrico) e constante dielétrica aparente. Além disso, este trabalho busca adequar a utilização da sonda TDR helicoidal ao procedimento proposto por Yu e Drnevich (2004) para a estimativa do teor de umidade gravimétrico e da massa específica seca dos solos. O presente trabalho apresenta resultados de calibrações realizadas em laboratório e resultados de ensaios realizados em campo para validação dessas calibrações.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O teor de umidade do solo é um dos parâmetros mais importantes na geotecnia. Este parâmetro influencia características inerentes ao solo, como resistência, condutividade hidráulica, saturação, etc. São utilizados vários métodos para estimar o teor de umidade do solo, sendo o método gravimétrico o mais usual, devido à facilidade e confiabilidade de seus resultados. Dentre os métodos para determinação do teor de umidade em campo, destacam-se a sonda de nêutrons, reflectometria no domínio da frequência (FDR), radar de penetração do solo (GPR) e a reflectometria no domínio do tempo (TDR), já utilizados em atividade agrícolas.

Neste capítulo serão abordados alguns métodos para determinação do teor de umidade dos solos, sejam em laboratório ou campo.

2.1 Método Gravimétrico

O método gravimétrico é o mais tradicional e mais utilizado no âmbito da geotecnia para determinação do teor de umidade dos solos. Este método consiste na retirada de amostras do solo desejado que, após serem hermeticamente embaladas, são enviadas ao laboratório. As amostras são pesadas e postas para secar na estufa a uma temperatura de 105 °C. Após 24 horas, as amostras secas são pesadas novamente e obtém-se a massa de água através da diferença de massas. O teor de umidade gravimétrico (w) é definido como sendo a relação entre a massa de água e a massa de solo.

As principais vantagens desse método são:

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

Por outro lado, suas principais desvantagens são:

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

2.2 Método da Sonda de Nêutrons

O método da sonda de nêutrons utiliza uma técnica denominada moderação de nêutrons, inicialmente desenvolvida na década de 50 por Belcher *et al.* (1950), e que consiste na aplicação de uma fonte de nêutrons no solo. Por esse método uma sonda é introduzida no solo através de um tubo de acesso previamente cravado no solo. A sonda possui um detector de nêutrons localizado na sua extremidade, como representado na Figura 2.1.

Os nêutrons liberados pela fonte (*nêutrons rápidos*) colidem com elementos constituintes do solo. Como os *nêutrons rápidos* têm uma massa semelhante à massa dos átomos de hidrogênio, ao colidir, eles perdem velocidade. Se os nêutrons colidirem com elementos de massa superior, eles manterão a mesma velocidade. O detector de nêutrons é ajustado para quantificar somente esses nêutrons que perderam a velocidade (*nêutrons térmicos*). Assim, a quantidade de *nêutrons* lentos está diretamente relacionada com a quantidade de hidrogênio presente.

Como na maioria dos solos a principal fonte de hidrogênio são as moléculas de água presentes, pode-se de uma maneira eficaz determinar o teor de umidade do solo.

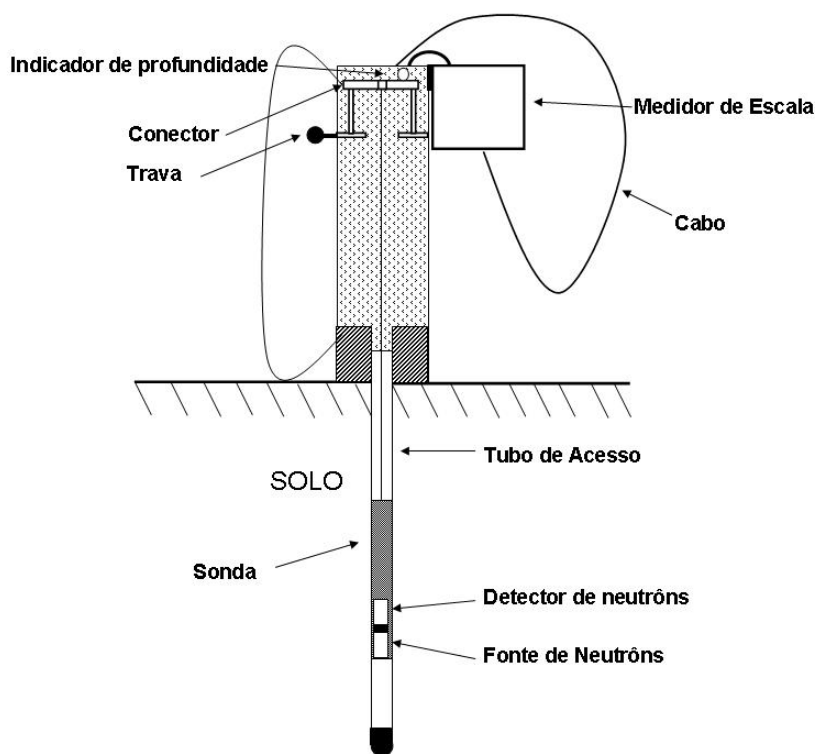


Figura 2.1 – Desenho esquemático de uma sonda de nêutrons inserida no solo (modificado de BELL, 1987).

O tubo de acesso se apresenta como um dos mais importantes componentes desse sistema, pois, embora seja uma peça externa, a sua correta instalação tem uma grande influência nos resultados. Geralmente de aço ou alumínio, o tubo de acesso é instalado após ser feito um pré-furo com o auxílio de um trado especial. O tubo de acesso deve ser instalado de forma que não fiquem vazios entre a parede do tubo e o solo, já que eventuais vazios se contiverem água ou ar, podem levar a falsos resultados.

A sonda de nêutrons apresenta como vantagem sua natureza não-destrutiva. Quando devidamente calibrada, apresenta resultados bastante precisos. Turatti (1990) afirma que, apesar da sonda já ser amplamente utilizada, ainda não foi possível estabelecer critérios adequados para sua calibração, o que pode acarretar erros que venham a ameaçar a confiabilidade dos dados.

Segundo Conciani *et al.* (1996), os dados obtidos com a sonda de nêutrons são afetados pela variação do peso específico e porosidade do solo. Como não é possível controlar a variação da porosidade ao longo de um perfil, as medidas de umidade realizadas com a sonda de nêutrons são questionáveis e freqüentemente imprecisas.

Medições realizadas com a sonda de nêutrons são menos precisas quando ocorrem próximo à superfície do terreno. Isso se deve ao fato de que os nêutrons térmicos, bem como aqueles com alta energia, podem se perder na atmosfera, resultando em uma baixa contagem. Esse é um problema porque é próximo à superfície do terreno que ocorrem as maiores variabilidades de teor de umidade e porque, em muitos casos, é justamente nessa área que as informações são de maior importância. Os erros associados com a realização de medidas próximo à superfície são de 1% a 20 cm para solo úmido e de 1% a 30 cm para solos secos (BELL, 1973). Uma forma de minimizar tal problema consiste em colocar uma “cesta” de solo sobre a entrada do tubo de acesso, de modo a evitar uma perda de nêutrons para a superfície.

A utilização da sonda de nêutrons em aplicações ambientais e de remediação requer uma freqüente recalibração no local estudado, devido às alterações da quantidade de hidrogênio proporcionada por fontes que não sejam a água. Mais um fator limitante é que a utilização da sonda de nêutrons requer treinamento especial por parte da equipe que a opera, além da necessidade do conhecimento de leis e normas que regulamentam e fiscalizam o uso desse equipamento.

2.3 Reflectometria no Domínio da Freqüência (FDR)

A medida da constante dielétrica dos solos através da técnica de Reflectometria no Domínio da Freqüência (FDR = Frequency Domain Reflectometry) é obtida inserindo-se no solo uma sonda que, ao contato com o solo, forma um capacitor. Quando a voltagem é aplicada na sonda, a freqüência pode ser medida e varia de acordo com a constante dielétrica

do solo (NAVARRO *et al.* 2006). A técnica FDR também mede de forma indireta o teor de umidade do solo, que pode ter sua variação detectada por intermédio da variação de frequência do circuito elétrico que é formado quando se conecta a sonda junto a um oscilador.

As principais vantagens desse método são:

- flexibilidade no design de sondas;
- poder ser conectado a conectores convencionais;
- baixo custo em relação a outros métodos (por exemplo, o TDR) para medições em vários locais;
- baixo consumo de energia.

Em contrapartida, as principais desvantagens desse método são:

- sensibilidade à variação de temperatura;
- necessidade de calibração específica para cada tipo de solo;
- necessidade de uma instalação cuidadosa para evitar lacunas de ar, pois a região de influência das sondas FDR é pequena;
- pesquisas têm mostrado a existência de uma grande dispersão nos resultados obtidos.

2.4 Radar de Penetração no Solo (GPR)

O radar de penetração do solo é uma ferramenta geofísica de grande funcionalidade. De acordo com Annan (2002) os estudos envolvendo pesquisa sobre a propagação de ondas de rádio ao longo da superfície iniciaram nos primeiros 50 anos do século 20. Após a década de 50 foram registradas as primeiras tentativas de caracterização da subsuperfície do solo. Durante a década de 80 as aplicações da técnica começaram a ter avanços significativos graças à disponibilidade da tecnologia e um melhor conhecimento da geologia. A *Geological Survey of Canada* explorou várias possibilidades de aplicação da técnica, e o GPR passou a ser uma ferramenta bastante promissora. Nesse período, o GPR passou a ser usado na investigação e mapeamento de estradas. Na década de 90 muitos pesquisadores e empresas se

interessaram pelo GPR, e tal interesse gerou um grande avanço da tecnologia. A partir desse ponto, ocorreu uma melhora na aquisição de dados, processamento de dados digitais e simulação numérica em duas dimensões.

Os fundamentos do método GPR estão embasados na teoria de propagação de ondas eletromagnéticas, proposta por Maxwell, que descreve o comportamento do campo eletromagnético em qualquer meio. O princípio do GPR consiste na emissão contínua de ondas eletromagnéticas de alta frequência, entre 10 e 2500 MHz, e recepção dos sinais refletidos nas estruturas ou interfaces em subsuperfície. A qualidade da velocidade de propagação do pulso eletromagnético influencia na qualidade da reflexão dos sinais. A propagação do sinal e o alcance das ondas eletromagnéticas dependem da frequência do sinal emitido e das propriedades elétricas dos materiais, incluindo a condutividade elétrica, a constante dielétrica e a permeabilidade magnética. Os sinais são emitidos e recebidos por meio de antenas dispostas na superfície do terreno (Figura 2.2). As medidas de tempo de percurso das ondas eletromagnéticas são efetuadas ao longo de uma linha e, quando justapostas lado a lado, fornecem uma imagem detalhada da subsuperfície ao longo do perfil estudado.

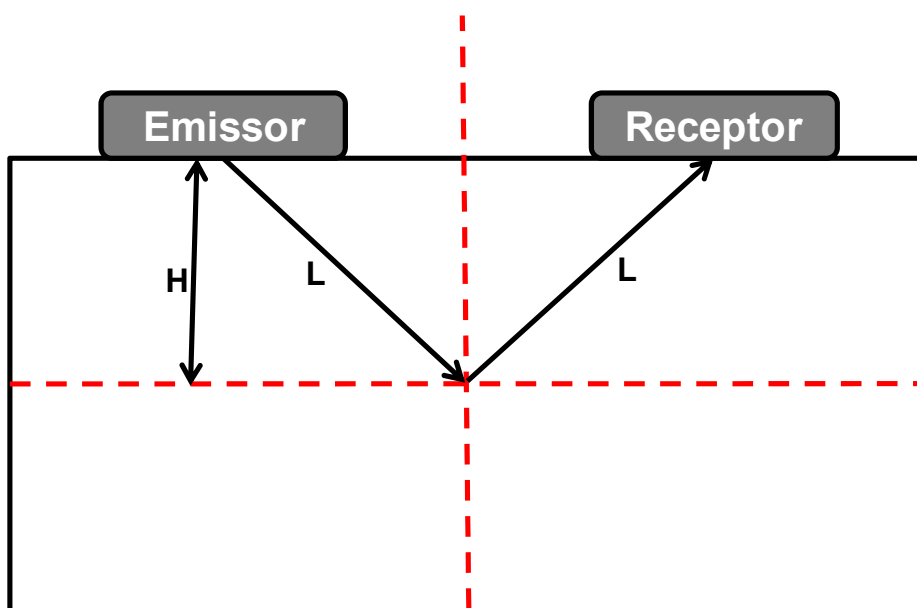


Figura 2.2 – Princípio de funcionamento do GPR.

Entre as muitas aplicações bem sucedidas do GPR pode-se destacar o mapeamento de plumas de contaminação, o monitoramento da frente de umedecimento de perfis de solo, a detecção de água subterrânea e a detecção de vazamentos de combustíveis.

Wollschläger e Roth (2005) utilizaram o GPR para monitorar a variações do teor de umidade de acordo com o tempo ao longo de um perfil de 1,5 m de profundidade e compararam os resultados obtidos com o GPR com aqueles determinados através da reflectometria no domínio do tempo (TDR). Wollschläger e Roth (2005) constataram que:

- o teor de umidade medido por meio da técnica TDR tem uma representatividade em termos de volume de material menor que o GPR;
- as técnicas não podem ser utilizadas concomitantemente no mesmo local, pois a sonda TDR interfere no sinal do GPR.

As principais vantagens de aplicação do GPR estão:

- na sua alta resolução espacial aos níveis de frequência em que trabalha;
- na possibilidade de analisar a subsuperfície em diferentes profundidades;
- no fato de se tratar de um método não-destrutivo.

2.5 Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR)

Desde há muito tempo, a técnica TDR (Time Domain Reflectometry = Reflectometria no Domínio de Tempo) é amplamente utilizada na identificação de discontinuidades em cabos usados em telecomunicações. Na década de 70 foram iniciadas pesquisas com intuito de adaptar essa técnica para estudos em solo, buscando a determinação do teor de umidade por meio da constante dielétrica do solo, sendo esta aplicação introduzida por Topp *et al.* (1980). Desde então, a aplicação da técnica TDR para esse requisito está sendo bastante difundida e utilizada, principalmente na agronomia. Para fins geotécnicos, a aplicação desta tecnologia foi primeiramente relatada por Kujala e Ravaska (1994). Benson *et al.* (1994) empregaram a técnica

TDR para monitorar a umidade de tapetes impermeabilizantes em aterros sanitários, Dowding e Huang (1994) aplicaram-na para estudar a evolução de discontinuidades em rochas e Conciani *et al.* (1996) utilizaram a técnica para medir a umidade e estimar a sucção do solo durante provas de carga.

De acordo com Or *et al.* (2004), as principais vantagens desse método são:

- grande exatidão de resultados entre 1 e 2% de teor de umidade;
- fácil calibração, ressaltando que em muitos solos a calibração não é necessária;
- diferentemente do método da moderação de nêutrons, não oferece riscos radioativos;
- resolução espacial e temporal satisfatória;
- medidas de simples obtenção, com possibilidade de coletá-las automaticamente.

2.5.1 Princípios

A técnica TDR determina a constante dielétrica, ϵ_b , medindo o tempo de propagação de uma onda eletromagnética, através de um cabo coaxial até a sonda (geralmente um conjunto de hastes feitas de aço inoxidável, latão ou cobre), imerso em um meio. A análise do tempo de propagação do pulso eletromagnético para a determinação da constante dielétrica (ϵ_b) é em função da velocidade de propagação representada pela Equação 1.

$$v = \frac{2 \cdot L}{t} \quad (1)$$

com isso tem-se que,

$$\epsilon_b = \left(\frac{c}{v}\right)^2 = \left(\frac{c \cdot t}{2 \cdot L}\right)^2 \quad (2)$$

onde c é a velocidade da luz ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$); t é o tempo de percurso do pulso eletromagnético pela sonda; e L é o comprimento da sonda. Nas Equações 1 e 2, observa-se que o valor do comprimento é dobrado, utilizado na determinação do ponto de ruptura de cabos, onde é medido o tempo de ida e volta de um pulso eletromagnético.

Na realidade a constante dielétrica é um número complexo, contendo tanto uma parte real como uma parte imaginária de uma perda elétrica. Entretanto, para frequências no intervalo de 1 MHz a 1 GHz, a parte real da constante dielétrica não exerce uma influência significativa. Para os solos usuais, a perda elétrica é pequena e não altera significativamente a medida da velocidade de propagação (KLEMUNES JR., 1998). Como consequência, a constante dielétrica determinada é referida como constante dielétrica aparente (K_a).

Como a constante dielétrica da água ($\epsilon_w = 81$) apresenta um valor bastante elevado quando comparado ao ar ($\epsilon_{ar} = 1$) e aos sólidos ($\epsilon_s = 3$ a 5), a quantidade de água presente na mistura sólidos-água-ar é que determina a constante dielétrica aparente (K_a) dessa mistura. Para um solo completamente seco, a sua constante dielétrica aparente é ligeiramente inferior àquela apresentada pelos seus sólidos. À medida que a umidade do solo aumenta, a sua constante dielétrica aparente também aumenta, devido ao elevado valor da constante dielétrica da água. A equação para determinação da constante dielétrica aparente quando se utiliza uma sonda de TDR tradicional com apenas um nível é apresentada na Equação 3.

$$K_a = \left(\frac{L_a C_m}{L V_p} \right)^2 \quad (3)$$

Onde,

L = comprimento da sonda

C_m = constante de calibração do aparelho

V_p = relação entre a velocidade real de propagação do pulso e a velocidade da luz

L_a = comprimento aparente da sonda (determinado no aparelho, conforme mostrado na

Figura 2.3).

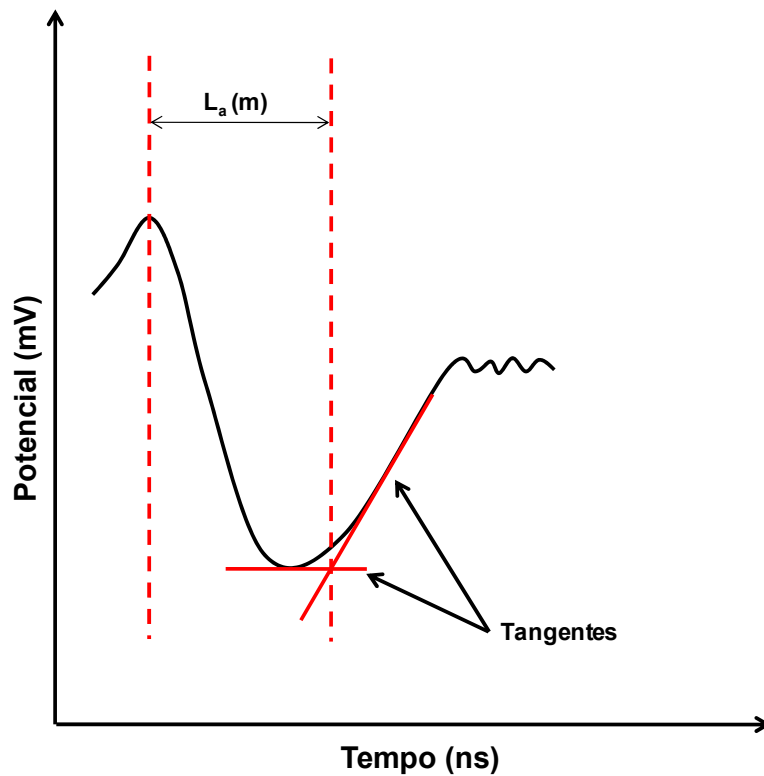


Figura 2.3 – Exemplo de trace.

Como a constante dielétrica aparente (K_a) é proporcional ao quadrado do comprimento aparente (L_a), qualquer erro ou diferença na determinação desse comprimento pode influenciar significativamente na determinação de ϵ_a do solo. Assim, existem procedimentos padrões para a determinação de L_a . Os métodos mais conhecidos são:

- método das tangentes;
- método dos picos;
- método das linhas divergentes;
- método das tangentes alternativo.

Cada método utiliza posições ligeiramente diferentes entre si para os pontos de inflexão iniciais e finais da curva (*trace*).

Na Figura 2.4 é representado o método das tangentes, cujo ponto de inflexão inicial (Ponto A) é dado pela interseção da tangente horizontal com a tangente com declividade negativa, no ponto de máximo valor da curva. O ponto de inflexão final é determinado pela interseção da tangente horizontal com a tangente com declividade positiva, no ponto de

mínimo valor da curva. Tal método é utilizado no presente durante as determinações das constantes dielétricas aparentes.

Pelo método dos picos, o ponto de inflexão inicial (Ponto A) é determinado pela interseção das tangentes traçadas em ambos os lados do ponto de máximo local. O ponto de inflexão final é dado pela interseção das tangentes traçadas em ambos os lados do ponto de mínimo local (Figura 2.5).

Na Figura 2.6, apresentada a seguir, é representado o método das linhas divergentes. Por esse método, o ponto de inflexão inicial (Ponto A) representa o local onde a curva diverge da tangente com declividade positiva pelo ponto de máximo local. O ponto de inflexão final é onde a curva diverge da tangente com declividade negativa pelo ponto de mínimo local.

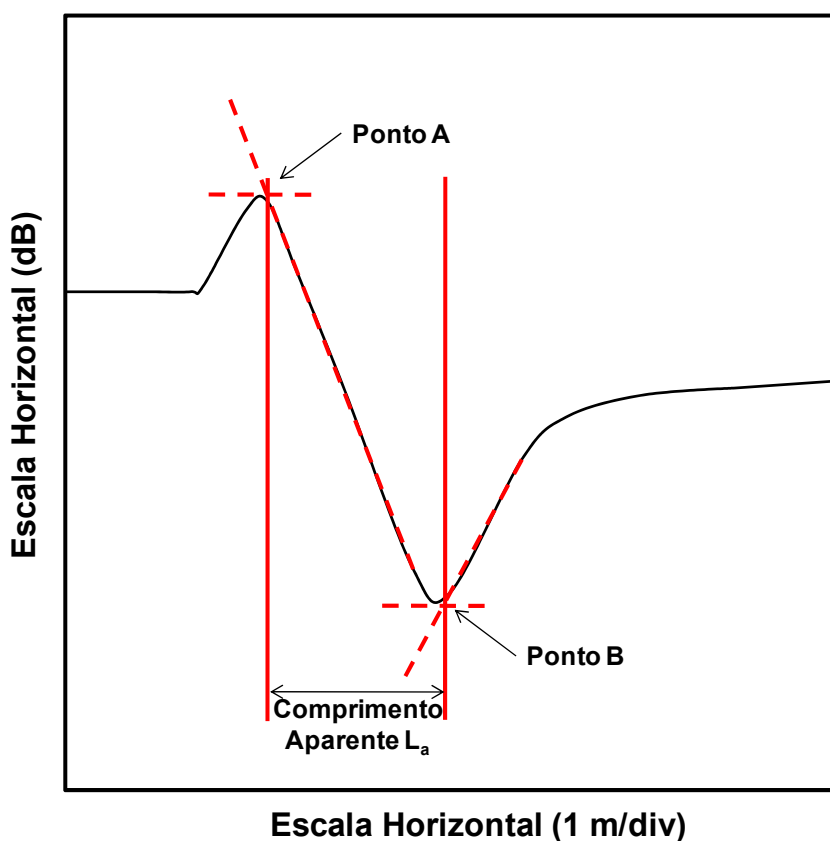
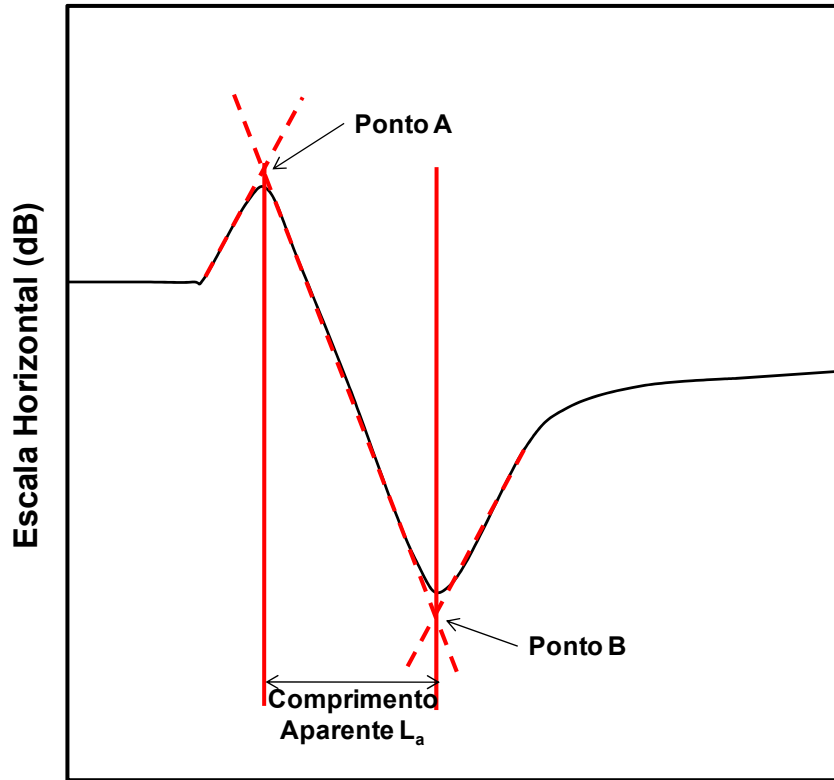
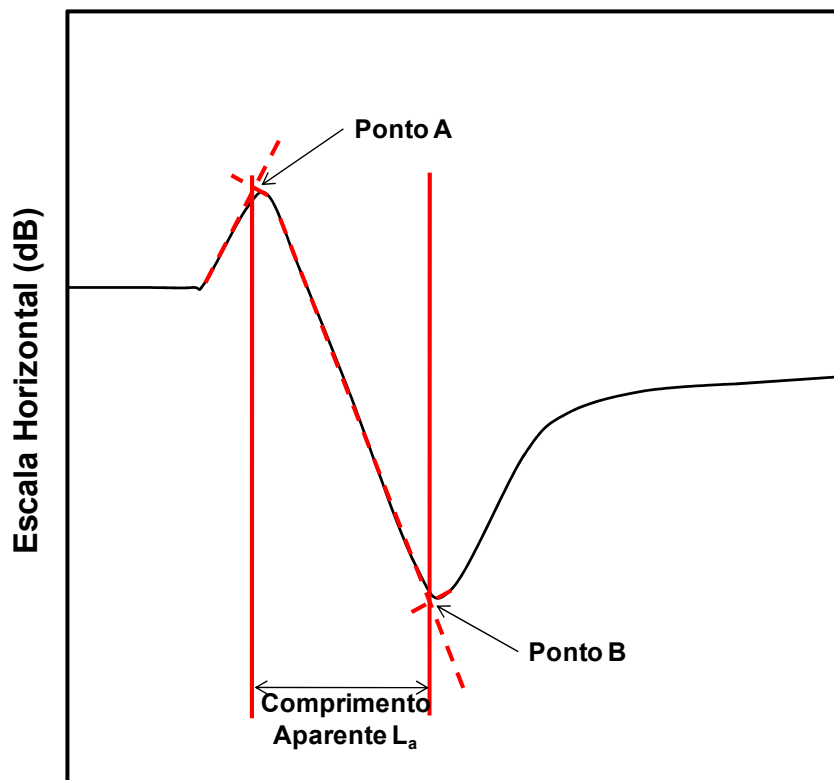


Figura 2.4 – Método das tangentes (KLEMUNES Jr., 1998)



Escala Horizontal (1 m/div)

Figura 2.5– Método dos picos (KLEMUNES Jr., 1998).



Escala Horizontal (1 m/div)

Figura 2.6 – Método das linhas divergentes (KLEMUNES Jr., 1998).

Pelo método das tangentes alternativo, o ponto de inflexão inicial (ponto A) é determinado pela interseção da tangente horizontal com a tangente com declividade positiva, no ponto de máximo valor da curva. O ponto de inflexão final é determinado pela interseção da tangente horizontal com a tangente com declividade negativa, no ponto de mínimo valor da curva, conforme representado na Figura 2.7.

Uma das grandes potencialidades da técnica TDR, além da medida da constante dielétrica, é a medida da condutividade elétrica volumétrica (DALTON *et al.*, 1984; TOPP *et al.*, 1988; NADLER *et al.*, 1991; DALTON, 1992; MOJID *et al.*, 1997). A reflectometria no domínio do tempo fornece a medida da condutividade elétrica volumétrica por meio da mudança da impedância demonstrada pela forma de onda. A impedância final é medida avaliando tempo de viagem ao longo do sinal, em que múltiplas reflexões são resultadas ao fim da sonda. Giese e Tiemann (1975) foram os primeiros a determinarem a condutividade elétrica volumétrica (EC_b) por meio da análise da forma de onda utilizando a técnica TDR. Daí, a Equação 4:

$$EC_b = \frac{\epsilon_0 c Z_0}{L Z_c f_T} \left(\frac{2V_0}{V_{máx}} - 1 \right) \quad (4)$$

onde ϵ_0 é a constante dielétrica no espaço livre ($8,854 \times 10^{-12} \text{Fm}^{-1}$), c é a velocidade da luz, L é o comprimento da sonda (m), Z_0 é a impedância característica da sonda (Ω), Z_c é a impedância do cabo (50Ω), V_0 é o pulso de voltagem incidente, $V_{máx}$ é o pulso de voltagem que retorna após múltiplas reflexões e f_T é o coeficiente de correção da temperatura.

Entretanto, como tal método refere-se à condutividade elétrica volumétrica em baixas frequências, Topp *et al.* (1988) propuseram um método alternativo para melhor calcular EC_b , através da Equação 5:

$$EC_b = \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{120\pi L} \ln \left[\frac{V_1(2V_0 - V_1)}{V_0(V_2 - V_1)} \right] \quad (5)$$

onde L é o comprimento da sonda (m). V_0 se refere à voltagem no cabo antes do pulso atingir a sonda, V_1 é voltagem correspondente ao primeiro pico de reflexão no início da sonda e V_2 é voltagem correspondente ao segundo pico de reflexão no final da sonda (Figura 2.8).

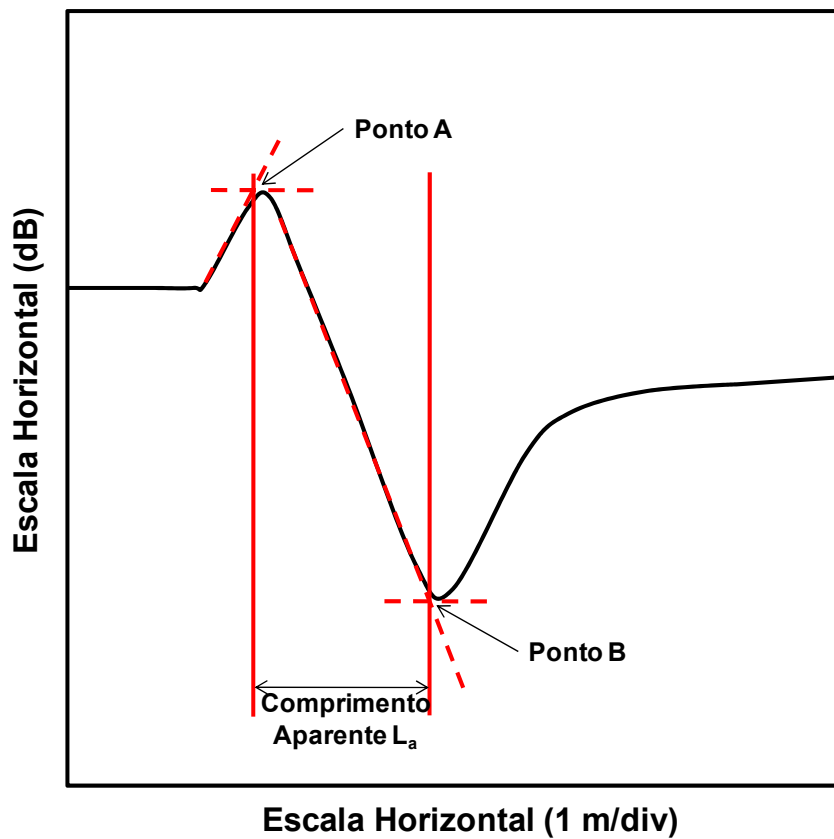


Figura 2.7 – Método das tangentes alternativo (KLEMUNES Jr., 1998).

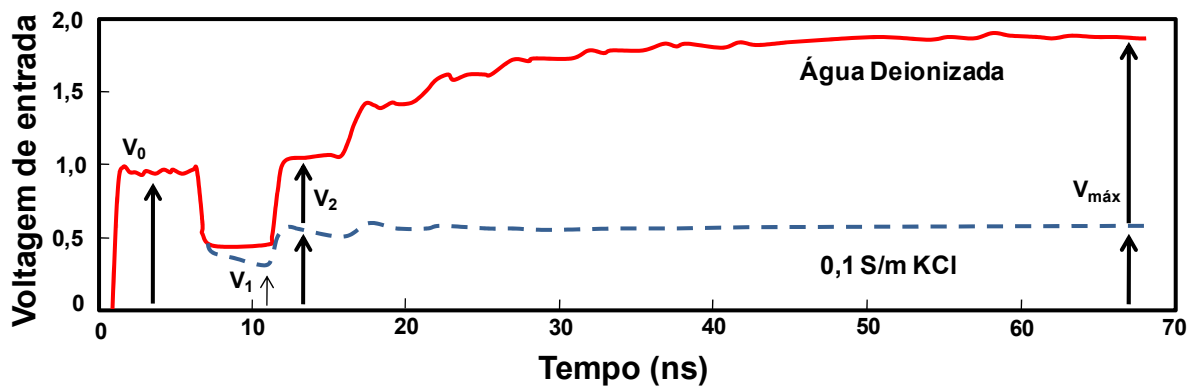


Figura 2.8 – Forma de onda de um pulso eletromagnético. (ROBINSON *et al.* 2003)

2.5.2 Equipamentos Utilizados

A técnica TDR utiliza como equipamento para emissão de pulsos eletromagnéticos um testador de cabos, que é composto basicamente por gerador de pulsos, amostrador, cabo coaxial e um osciloscópio, como apresentado na Figura 2.9.

O gerador de pulsos produz e emite pulsos eletromagnéticos. Os pulsos eletromagnéticos são formados por duas componentes: magnética e elétrica. A componente magnética do pulso não é influenciada pelo solo; porém, a componente elétrica é influenciada pelas propriedades físicas do solo e possui grande amplitude e altas frequências. (NISSEN E MOLDRUP, 1994).

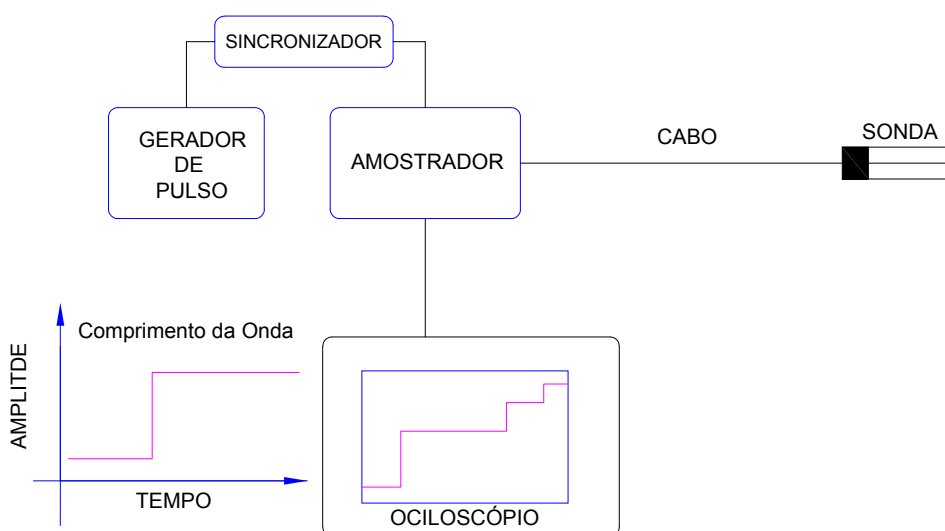


Figura 2.9: Esquema de aquisição de dados do TDR.

O gerador de pulso e o amostrador são conectados com a um cabo coaxial que por sua vez possui em sua ponta uma sonda metálica. Essa sonda é conectada ao solo, portanto tem um potencial de 0.0 V. Os pulsos eletromagnéticos produzidos pelo gerador de pulso são lançados pelo condutor do cabo coaxial, com uma voltagem de 0.225 V entre o fio condutor e a malha que o envolve (Figura 2.10).

A velocidade de percurso dessa onda varia de acordo com a conformação do cabo. Caso a onda seja transmitida pelo vácuo, sua velocidade é igual à velocidade da luz; caso seja transmitida por um material de polietileno, ela será 66% da velocidade da luz.

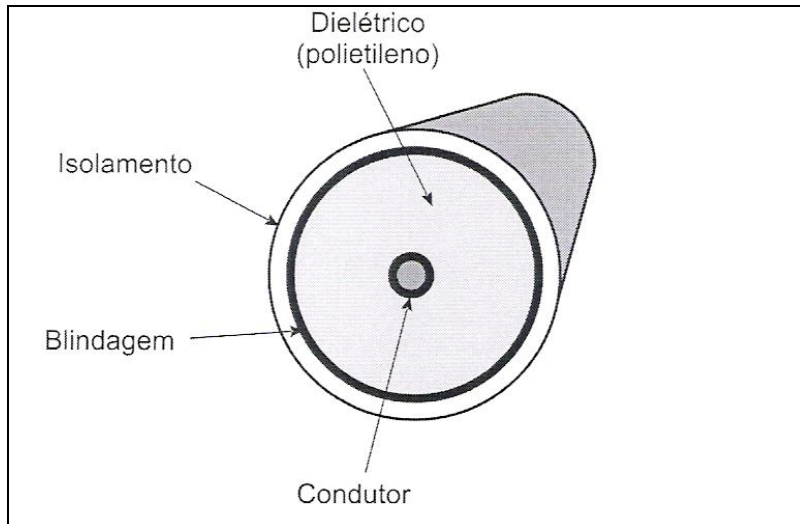


Figura 2.10 – Cabo Coaxial.

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

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

A Figura 2.11 mostra alguns modelos de equipamentos TDR encontrados no mercado.

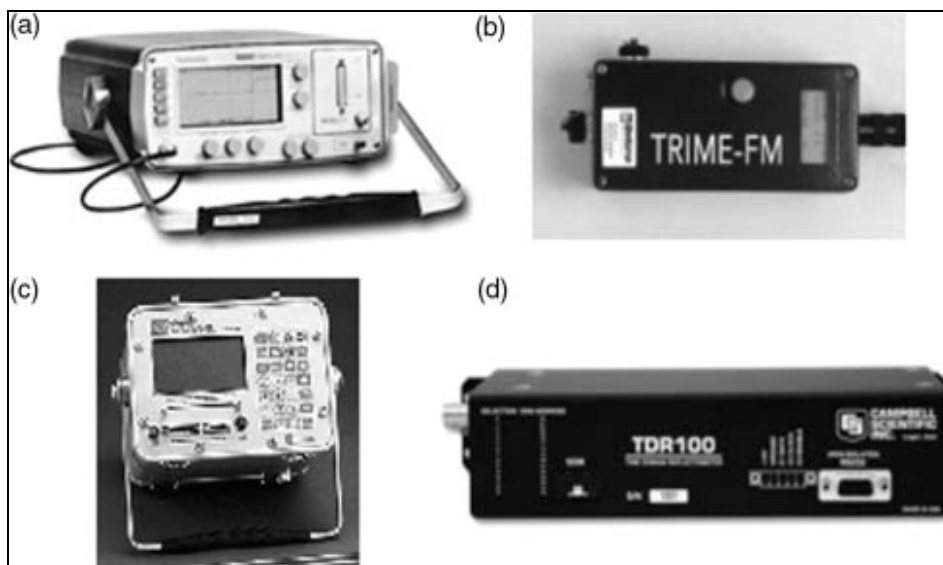


Figura 2.11 - Alguns modelos de equipamentos TDR comercializados (VAZ, 2001).

2.5.3 Calibração

Para a estimativa do teor de umidade dos solos, é necessária a realização de calibrações das sondas utilizadas. Essas calibrações são obtidas por meio de correlações entre a constante dielétrica e o teor de umidade, seja este gravimétrico ou volumétrico.

Topp *et al.* (1980) estabeleceram uma calibração por meio da correlação entre a constante dielétrica (ϵ_b) e o teor de umidade volumétrico (θ) para a estimativa do teor de umidade. Tal mecanismo ficou conhecido como relação universal, pois se acreditava que serviria para qualquer tipo de solo. A seguir, a Equação 6, representa a equação de calibração proposta por Topp *et al.* (1980).

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

Essa relação é precisamente adequada para teores de umidade inferiores a 0,5, com uma estimativa de erro de aproximadamente 0,013. No entanto, a Equação 6 demonstra falhas para as leituras de constante dielétricas com teores de umidade volumétrica superiores a 0,5, solos com alto teor de matéria orgânica e argilas.

Roth *et al.* (1990) apresentam uma curva de calibração do TDR, que é restringida às condições específicas do solo. A calibração é baseada no modelo das constantes dielétricas

mistas de Dobson *et al.* (1985), conforme mostrado na Equação 7, que relaciona a constante dielétrica com água pura a 20 °C:

$$\varepsilon_b = [\theta \cdot \varepsilon_w^\beta + (1-n) \cdot \varepsilon_s^\beta + (n-\theta) \cdot \varepsilon_a^\beta]^{1/\beta} \quad (7)$$

onde n é a porosidade do solo, $-1 < \beta < 1$ representa a relação geométrica do meio onde está inserida a sonda com a direção axial da haste da sonda ($\beta = 1$ para campo elétrico paralelo a camada de solo, $\beta = -1$ para campo elétrico perpendicular, e $\beta = 0.5$ para um meio bifásico e isotrópico); $1 - n$, θ e $n - \theta$ são as frações de volume e ε_s , ε_w e ε_a são as constantes dielétricas do solo, água e ar, respectivamente. Isolando o teor de umidade volumétrico θ , tem-se a Equação 8:

$$\theta = \frac{\varepsilon_b^\beta - (1-n)\varepsilon_s^\beta - n\varepsilon_a^\beta}{\varepsilon_w^\beta - \varepsilon_a^\beta} \quad (8)$$

Deve-se observar que, quando se utiliza o *modelo das constantes dielétricas mistas*, é necessário conhecer ou estimar a porosidade do solo. A Figura 2.13 mostra uma comparação entre as curvas determinadas pela Equação 6 e pela Equação 8 (com $n=0.5$ e $\beta=0.5$). Na Figura 2.12 também é mostrada uma curva correspondente a um solo orgânico, indicando que nesse caso é necessária uma calibração específica.

Comumente tem-se usado $\beta = 0.5$ para reprodução de uma curva de calibração semelhante a um polinômio de 3º grau, como proposto por Topp *et al.* (1980) para umidades com valores $0 < \theta < 0.5$. Ao introduzir na Equação 8 valores comuns para vários constituintes, tais como $\beta = 0.5$, $\varepsilon_w = 81$, $\varepsilon_s = 4$ e $\varepsilon_a = 1$, obtém-se a seguinte aproximação (Equação 9):

$$\theta = \frac{\sqrt{\varepsilon_b} - (2-n)}{8} \quad (9)$$

onde n representa a porosidade do solo.

Outro tipo de calibração (Equação 10) assume uma relação linear entre a raiz quadrada da constante dielétrica aparente e o teor de umidade volumétrico (HERKELRATH *et al.* 1991; FERRE *et al.* 1996; MALICKI *et al.* 1996; YU *et al.* 1997).

$$\theta = b\sqrt{K_a} + a \quad (10)$$

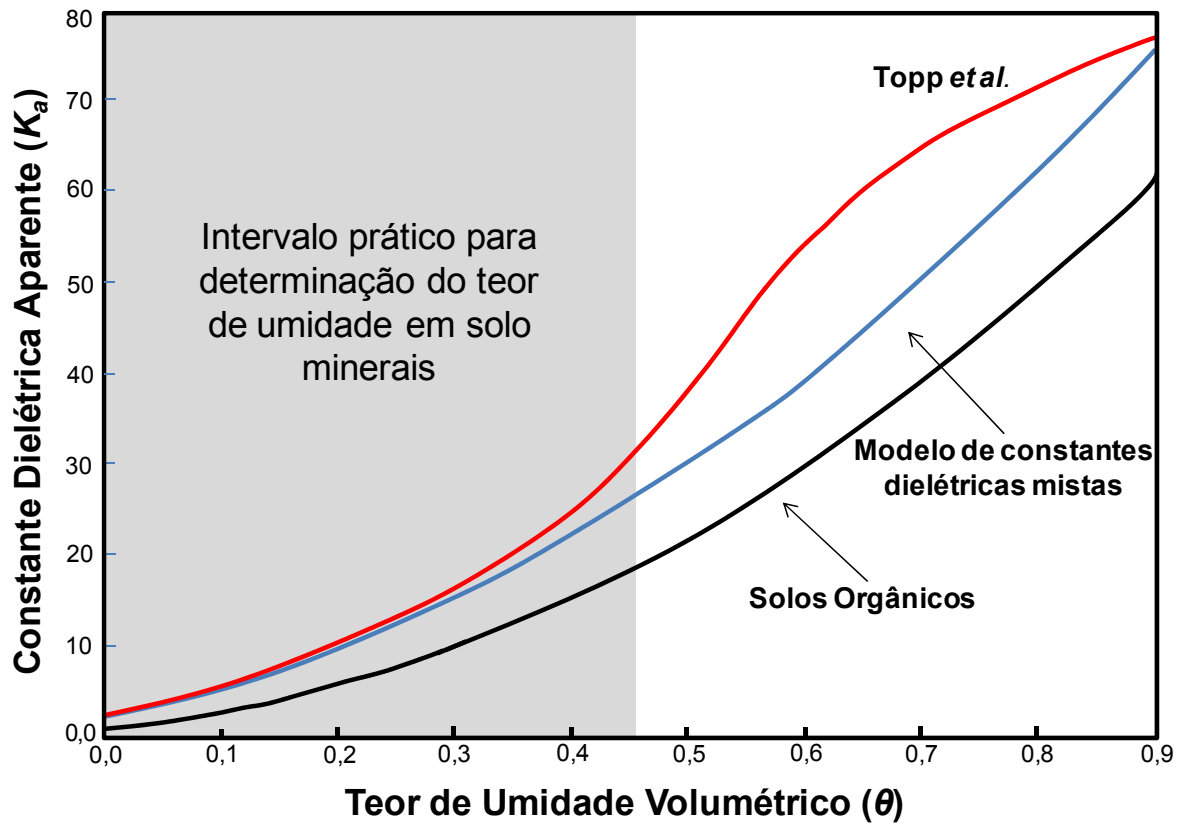


Figura 2.12 – Comparação entre as curvas determinadas pela Equação 11 e pela Equação 13, com $n=0.5$ e $\beta = 0.5$ (JONES et al. 2002).

A Equação 10, onde a e b são constantes obtidas por meio de regressão, não contabiliza os efeitos da massa específica no solo. Uma equação de calibração (Equação 11) que incorpora os efeitos da massa específica é proposta por Malicki *et al.* (1996):

$$\theta_v = \frac{K_a^{0.5} - 0.819 - 0.618\rho + 0.159\rho^2}{7.17 + 1.18\rho} \quad (11)$$

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

Dois fatores dificultam a aplicação das equações de calibração na prática geotécnica:

1. as calibrações estão expressas em termos de teor de umidade volumétrica, enquanto o conceito de teor de umidade gravimétrica é o utilizado na prática geotécnica;

2. o efeito da massa específica é de difícil contabilização, complexo e de difícil aplicação.

Yu e Drnevich (2004) elaboraram um novo método de determinação da umidade e da massa específica seca do solo. Esse método baseou-se na medida simultânea da constante dielétrica e da condutividade elétrica volumétrica da amostra de solo. As equações de calibração são correlacionadas com a umidade gravimétrica e a massa específica seca, determinadas após o ajuste simultâneo das medidas da condutividade elétrica volumétrica em campo com uma condutividade elétrica volumétrica padrão. Uma vantagem apresentada por esse método é o fato de os efeitos da temperatura serem desprezados.

A ASTM D6780 é uma norma de ensaios baseada no trabalho de Yu e Drnevich (2004), usada para determinar a umidade e a massa específica do solo *in situ* usando a técnica TDR e destina-se a ensaios referentes à obtenção de taxas de compactação de aterros. A equação 12 apresenta a equação de calibração proposta por Yu e Drnevich (2004).

$$\sqrt{K_a} \frac{\rho_w}{\rho_d} = a + b \cdot w \quad (12)$$

onde a e b representam constantes de calibração específicas do solo; ρ_d é a massa específica seca do solo; ρ_w é a massa específica da água; e w representa o teor de umidade gravimétrico.

A condutividade elétrica volumétrica dos solos geralmente é comandada pela condutividade elétrica volumétrica do líquido existente nos poros do solo, similar ao comportamento da constante dielétrica (Sihvola, 1999). Por essa analogia, Yu e Drnevich (2004) propõem que a condutividade elétrica volumétrica dos solos pode ser expressa pela Equação 13.

$$\sqrt{EC_b} \frac{\rho_w}{\rho_d} = c + d \cdot w \quad (13)$$

onde c e d são constantes de calibração específicas para o solo.

Resolvendo as Equações 12 e 13 é possível se obter os valores do teor de umidade e da massa específica seca através das Equações 14 e 15.

$$\rho_d = \frac{d\sqrt{K_a} - b\sqrt{EC_b}}{ad - cb} \rho_w \quad (14)$$

$$w = \frac{c\sqrt{K_a} - a\sqrt{EC_b}}{b\sqrt{EC_b} - d\sqrt{K_a}} \quad (15)$$

2.5.4 Tipos de sondas

O objetivo do projeto das sondas é obter o teor de umidade de uma amostra representativa de forma prática e com intuito de minimizar os efeitos da condutividade elétrica volumétrica por meio das hastes. No entanto, para que seja possível atingir tal objetivo, é necessário tomar certos cuidados. Espaçar as hastes mais do que o necessário, por exemplo, aumenta a facilidade com que elas podem ser introduzidas no solo e aumenta o valor da resistência medida por meio das hastes. Entretanto, isso conduz a um maior acúmulo de energia próximo à superfície das hastes, e que devido aos efeitos da compactação, o solo pode ser menos representativo do que o solo indeformado (ROTH *et al.*, 1990).

De acordo com Diene (2004), vários tipos de sondas (Figura 2.13) podem ser utilizados para efetivar a medida de teor de umidade dos solos pelo método TDR:

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

Com essas sondas, o volume de medida é perfeitamente definido.

Além das sondas tradicionais citadas por Diene (2004), inúmeros trabalhos relatam o desenvolvimento de diferentes modelos de sondas (TOPP; DAVIS (1980); ZEGELIN *et al.* (1989); CAMPBELL (1990); SELKER (1993); HEIMOVAARA (1994); NISSEN *et al.* (1998); VAZ; HOPMANS (2001); SOUZA; MATSURA (2002); ANDRADE *et al.* (2003); entre outros).

Com intuito de desenvolver sondas com características similares a cabos coaxiais, Zegelin *et al.* (1989) desenvolveram a idéia de sondas multi-hastes, dispostas de forma radial. Em torno de uma haste central, são colocadas mais três ou quatro hastes. A aplicação desse tipo de sonda dispensa a utilização de causadores de impedância, delimita melhor a região de medida e reduz os ruídos e reflexões nas medidas. O campo elétrico transversal em torno das sondas é mais próximo do coaxial no caso das sondas multi-hastes. As sondas paralelas, com duas hastes, geram um campo excêntrico, amplo e irregular, portanto uma medida menos confiável (CONCIANI *et al.*, 1996).

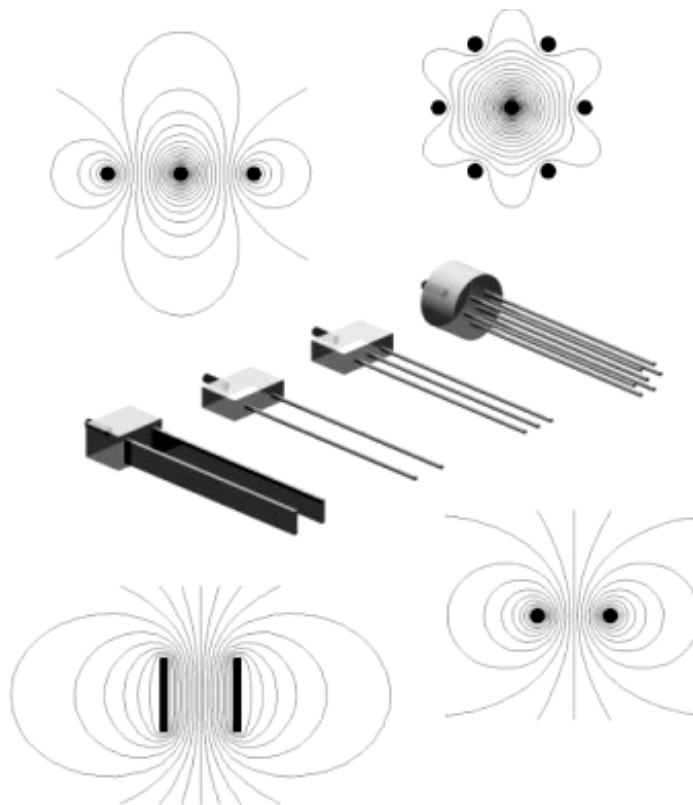


Figura 2.13 - Modelos de configurações de sondas (Fonte: Jones et al., 2002).

Após a criação do modelo coaxial, Campbell (1990) e Heimovaara (1994) usaram uma sonda com sete hastes para medir a constante dielétrica do solo e dos líquidos. Um número de configurações geométricas diferentes foi proposto, tendo um único condutor central e de uma a seis hastes exteriores, como mostrado na Figura 2.13. As sondas com três ou mais hastes fornecem um sinal equilibrado, dispensando a utilização de um transformador na cabeça da haste a fim de reduzir a perda de sinal e informações.

Conciani (1996) destaca a importância da sonda segmentada paralela de duas hastes, que consiste em uma sonda com trechos distintos de impedância que são facilmente obtidos pela variação dos diâmetros das hastes. Essa característica permite o emprego de uma única sonda para medir o teor de umidade em diversas profundidades de um perfil do solo. O sinal de um segmento qualquer da sonda é dado pela diferença entre o sinal medido no segmento considerado e o segmento anterior ($L_n - L_{n-1}$).

Ainda de acordo com Conciani (1996), os valores dos teores de umidade medidos por sondas lisas e segmentadas praticamente não apresentam diferenças. Isso foi verificado pelo emprego de sondas segmentadas e lisas em medidas realizadas em solo com umidade uniforme.

Nissen *et al.* (1998) desenvolveram uma sonda para ensaios em menores escalas (comprimento de 15 mm e diâmetro de 3,6 mm), aplicável a comuns aparelhos de TDR, de fácil produção e baixo custo. O tempo de percurso do pulso eletromagnético foi prolongado forçando-o a passar por quatro hastes dispostas de forma helicoidal como se fosse uma bobina.

Nissen *et al.* (1998) concluíram que a introdução de um princípio de sonda helicoidal poderia resolver o problema principal que restringe o comprimento físico menor de sondas de TDR e causa a falta de tempo suficiente para o curso das ondas eletromagnéticas na sonda para facilitar uma distinção no domínio do tempo entre as reflexões do início e do final da

sonda. Baseado na sensibilidade para mudanças da constante dielétrica, a sonda helicoidal se iguala à sonda comum, porém com um tempo de percurso cinco vezes maior. O volume do solo que sofre influência da sonda helicoidal é limitado e representa a medida de um ponto.

Baseado no conceito de se aumentar o tempo de percurso do pulso eletromagnético proposto pela sonda helicoidal de Nissen *et al.* (1998), Vaz e Hopmans (2001) buscaram projetar, construir e avaliar uma sonda helicoidal de TDR a ser usada combinada a um penetrômetro para determinar o teor de umidade e a resistência à penetração ao longo de um perfil de solo em campo.

A sonda em espiral (Figura 2.14) tem dois fios de cobre paralelos (um terra e um condutor), com 0.8 mm de diâmetro e 30 cm de comprimento disposto em espiral ao longo de um PVC por 5 cm, com uma distância de 3 mm entre os dois fios. Um cabo coaxial de 50 Ω com 2,5 m de comprimento é passado por meio do centro do penetrômetro até a sonda na ponta do penetrômetro e conectado a um testador de cabo (Tektronix 1502C).

Os fios de cobre são envolvidos por resina epóxi e possuem passo de 2 mm, a resina tem o objetivo de homogeneizar o corpo da sonda evitando surgimento de irregularidades entre os fios. Tais irregularidades podem causar danos no momento da inserção da sonda no solo. De acordo com Vaz e Hopmans (2001) as medidas do cone de penetração satisfazem aos padrões da Sociedade Americana de Engenharia de Agronomia.

Vaz e Hopmans (2001) concluíram que a sonda helicoidal acoplada ao penetrômetro fornece medidas satisfatórias de resistência à penetração e dos teores de umidade do solo. No entanto, mais investigações são necessárias a fim de se avaliar os efeitos da compactação e do atrito com o solo.



Figura 2.14 – Sonda Helicoidal (VAZ e HOPMANS, 2001).

2.5.5 Fatores que afetam a determinação da constante dielétrica

As experiências relatadas na literatura a respeito do uso da técnica TDR evidenciam a importância de se avaliar o efeito de algumas variáveis sobre a relação entre o teor de umidade um solo e o valor da constante dielétrica medida por meio da aplicação desta técnica.

Trintinalha *et al.* (2001) procuraram avaliar o efeito das condições de instalação e das características de cada sonda na correlação entre teor de umidade volumétrico e a constante dielétrica. Segundo estes autores, quando a umidade do solo atinge valores para os quais o solo começa a retrain ao secar, parte dos poros desse solo estará preenchida por ar e parte por água. Nessa condição, um melhor contato entre a matriz do solo e a sonda assegura um aumento da constante dielétrica do meio entre as hastes da sonda, fazendo com que, em uma determinada umidade do solo, os valores de K_a obtidos com as sondas instaladas após a saturação sejam maiores que os obtidos com as sondas instaladas antes da saturação.

Com base nos resultados obtidos por Trintinalha *et al.* (2001), verificou-se que a umidade do solo, no momento da instalação da sonda, pode influenciar na leitura realizada com a técnica TDR, uma vez que pode interferir no contato solo-sonda.

Vieira *et al.* (2005) também verificaram a interferência do contato sonda-solo nas medidas da constante dielétrica durante a instalação da sonda e afirmaram que a influência da massa específica é maior na medida em que o teor de umidade volumétrico diminui, pois a constante dielétrica aparente do solo dependerá em maior proporção da constante dielétrica das partículas sólidas.

Assim, os estudos realizados corroboram a necessidade de obter uma curva de calibração de um solo para a faixa de massa específica que se pretende trabalhar e nas condições dos experimentos a serem desenvolvidos.

De acordo com Topp *et al.* (1980), as variáveis que afetam a determinação da constante dielétrica são a textura, a estrutura, os sais solúveis, o conteúdo de água, a temperatura, a massa específica e a frequência de mensuração.

Vários autores (WANG; SCHMUGGE, 1978; TOPP *et al.*, 1980; HALLIKAINEN *et al.*, 1985) também relatam a dependência da textura do solo, que é presumível devido à interação entre as fases sólidas e líquidas. A água é imaginada como uma fina película em torno da fase sólida (WANG; SCHMUGGE (1978); DOBSON *et al.* (1985)). Devido à restrição da liberdade rotacional das moléculas de água nesta película, sua constante dielétrica é menor do que da constante dielétrica da água pura. O valor desse efeito depende da carga e da área de superfície do solo, geralmente para o mesmo teor de umidade a constante dielétrica é menor para solos de textura fina do que de textura grossa.

Por meio de ensaios realizados, com intervalo entre 4°C e 40°C, Drnevich *et al.* (2001a) concluíram que as constantes dielétricas aparentes dos solos dependem da temperatura do solo. Os autores verificaram que a constante dielétrica das areias tende a

diminuir com o aumento da temperatura, comportamento similar ao da água, porém menos acentuado. Em argilas, foi observada uma tendência oposta, com aumento da constante dielétrica relacionado diretamente com a temperatura crescente. A correção da constante dielétrica das argilas depende dos valores de umidade e do limite de plasticidade, que aumenta de acordo com o aumento da temperatura.

Assim, embora alguns autores afirmem que os efeitos da temperatura na determinação da constante dielétrica sejam pequenos e possam ser negligenciados em intervalos de temperatura entre 5 e 20°C, é recomendada a correção, com uso de sistemas lineares simples, dos valores da constante dielétrica para temperaturas de até 20°C.

Além dos efeitos das propriedades do solo sobre a constante dielétrica, existem fatores de ordem técnica que afetam as medidas, tais como: ruídos eletromagnéticos, comprimento e especificação do cabo coaxial e metodologia para obtenção do comprimento aparente.

Com relação ao efeito do comprimento do cabo de TDR na reflexão do sinal, Herkelrath *et al.* (1991) verificaram, em estudos realizados em laboratório, que os cabos longos tendem a atenuar o sinal. Os autores concluíram que cabos com comprimento de até 27m não causam problemas na reflexão do sinal.

A mudança de temperatura do cabo que está conectado ao testador de cabos também pode influir na forma de onda. Esse problema é bastante visível quando se utiliza cabos longos, pois, conforme o cabo aquece ou resfria, há uma variação na velocidade de propagação, ocasionando alteração na forma de onda, o que, além de dificultar sua interpretação, dificulta a obtenção da condutividade elétrica volumétrica e da constante dielétrica.

Em relação ao tipo de sonda, Zegelin *et al.* (1989) afirmam que sondas de três e quatro hastes são muito similares na determinação da constante dielétrica. Porém, o distúrbio

causado na introdução das sondas de quatro hastes, as tornam menos adequadas para aplicações no campo (JOAQUIM JR., 2003).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Desenvolvimento da Sonda Helicoidal

Baseado no conceito de sondas com eletrodos helicoidais (NISSEN et al., 1998; VAZ e HOPMANS, 2001; PERSSON e WRAITH, 2002; TOPP *et al.*, 2003) desenvolvidas para fins de agricultura, procurou-se projetar uma sonda para aplicações geotécnicas, que pudesse ser inserida no terreno e permitisse realizar leituras em diferentes profundidades (Figuras 3.1, 3.2 e 3.3).

O projeto da nova sonda idealizado por Esquivel e Giacheti (2007) tem formato similar a um piezocone. Assim poderá ser aproveitada toda a infra-estrutura necessária para uma campanha de investigação com um piezocone. Em relação às sondas utilizadas na agricultura, as principais diferenças da presente sonda estão em um diâmetro maior e em uma resistência mecânica maior, de forma que se possa utilizar o mesmo penetrômetro usado com o piezocone.

O corpo da sonda foi usinado em aço 1040. Os eletrodos foram fabricados a partir de uma chapa de cobre eletrolítico com 3 mm de espessura. Foram considerados diferentes comprimentos dos eletrodos de cobre da sonda, implicando em diferentes passos das hélices. De acordo com Vaz (2005), o comprimento mais adequado para os eletrodos foi de 280 mm, medida adotada baseada em sondas já desenvolvidas pelo setor de Instrumentação da Embrapa em São Carlos, implicando em um passo de 60 mm (informação verbal¹). O material utilizado para o elemento isolante foi o nylon. A sonda se conecta ao testador de cabos por meio de um cabo coaxial de 50 Ω .

¹ Vaz (2005), São Carlos-SP.

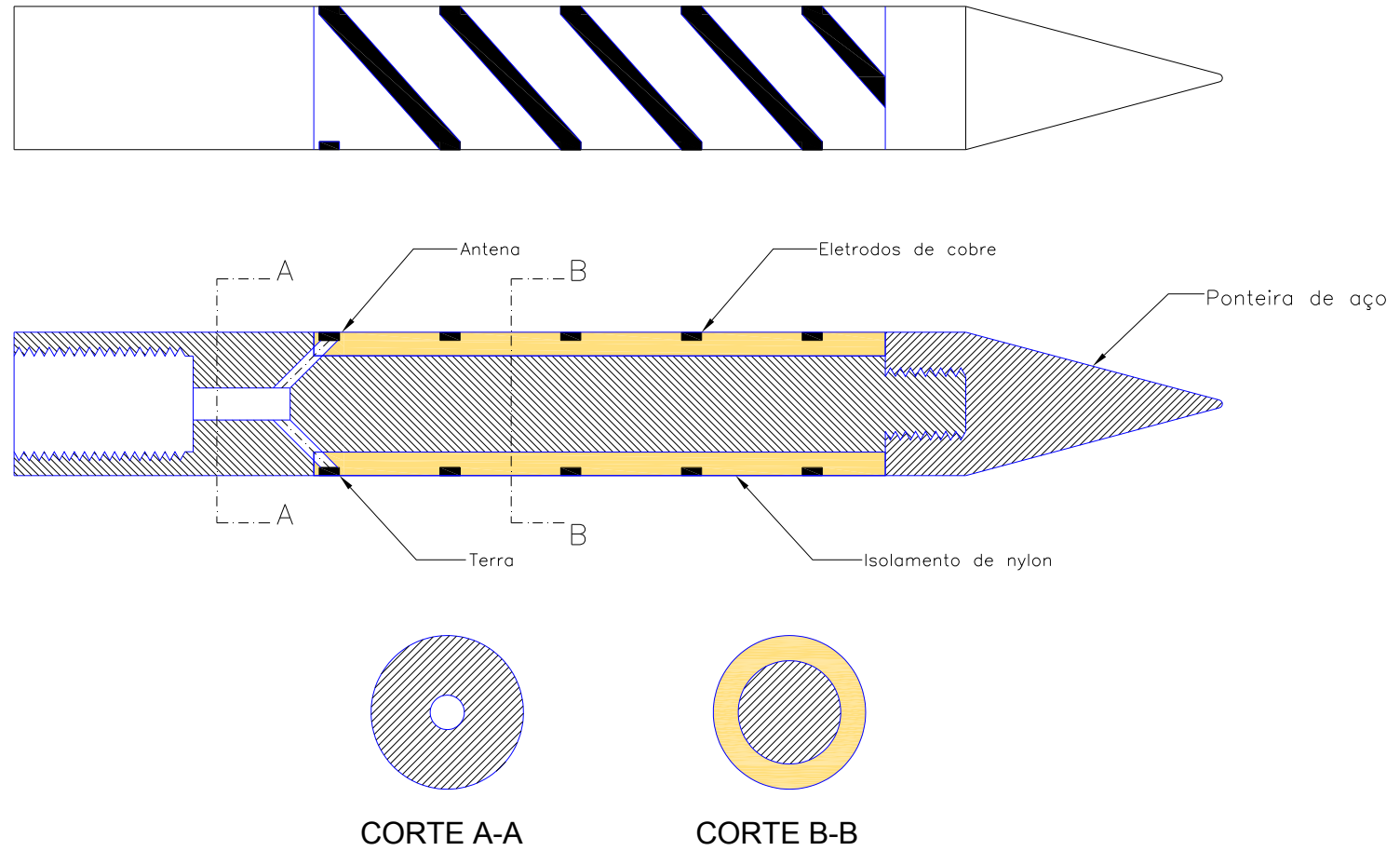
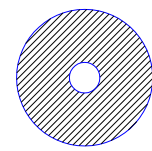
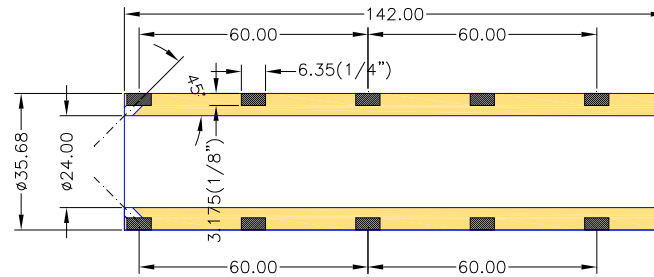
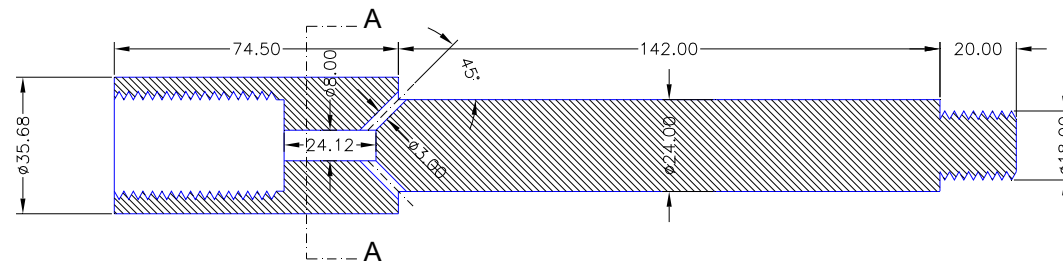
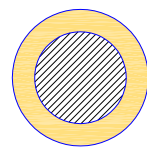


Figura 3.1 – Esquema geral da sonda projetada.



CORTE A-A



CORTE B-B

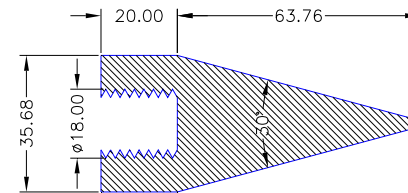


Figura 3.2 – Detalhes de projeto da sonda projetada.



Figura 3.3 – Protótipo da sonda

3.2 Equipamentos Utilizados

Neste projeto, utilizou-se um testador de cabos da marca Tektronix, modelo 1502C. Esse equipamento engloba em uma única peça o gerador de pulsos, o amostrador e o osciloscópio. Os controles presentes no painel frontal (Figura 3.4) são:

1. conector BNC fêmea, onde é conectado o cabo da sonda;
2. controle do filtro de ruídos;
3. ajuste da escala vertical;
4. ajuste da quantidade de metros por divisão do gráfico;
5. ajuste da velocidade relativa de propagação (V_p);
6. interruptor de força;
7. controle de posição vertical;
8. controle de posição horizontal;
9. acesso ao menu do aparelho;
10. visualização do *input*;

11. visualização do sinal armazenado;
12. visualização da diferença entre o sinal atual e o sinal armazenado;
13. salvar sinal corrente.

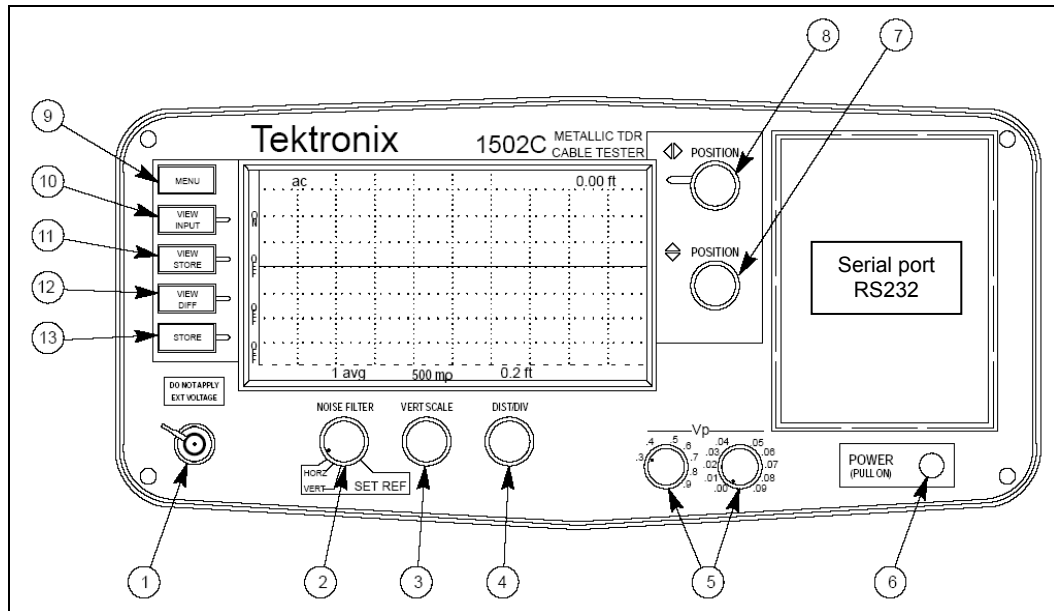


Figura 3.4 – Representação esquemática do painel frontal do Tektronix 1502C.

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

3.3 Programa WinTDR

O programa de interface WinTDR, versão 6.1, auxilia na comunicação entre o equipamento Tektronix 1502C e o computador, através da porta serial RS232 (OR *et al.*, 2004). Este programa foi desenvolvido pelo grupo de Física dos Solos da Utah State University. A intenção inicial dos autores do programa foi criar uma interface para Windows, de fácil utilização, para a realização de análises eficientes e precisas, sob diferentes condições. O WinTDR foi inicialmente escrito em 1993, para ser usado com o reflectômetro Tektronix, modelo 1502C, tendo como objetivo a determinação do teor de umidade dos solos. Entretanto, durante os últimos anos, foram introduzidas modificações para permitir também a determinação da condutividade elétrica volumétrica dos solos.

Utilizando a equação de Topp, o programa WinTDR correlaciona o teor a constante dielétrica com o teor de umidade volumétrica do solo. Este programa permite que os parâmetros da equação sejam adequadamente ajustados, comparando-se os teores de umidade obtidos com aqueles determinados pelo método gravimétrico.

O WinTDR possibilita o controle do testador de cabos, além de também permitir o controle e o armazenamento dos sinais provenientes do equipamento. Com algoritmos próprios, o software é capaz de determinar o comprimento L_a , calculando a constante dielétrica aparente (K_a) e a condutividade elétrica volumétrica (EC_b). Na utilização de sondas convencionais, é possível calibrar o comprimento efetivo da sonda e a sua impedância.

A Figura 3.5 mostra uma tela típica apresentada pelo programa WinTDR.

Os procedimentos de utilização do software utilizado nos ensaios são descritos a seguir:

- Iniciar o programa WinTDR versão 6.1;
- Carregar a calibração que será utilizada no ensaio;
- Através do comando Sweep o equipamento é preparado para adquirir um sinal novo (Figura 3.5);
- Para uma melhor visualização da onda e obtenção de melhores resultados é necessário ajustar a escala e o cursor (Figura 3.6);
- É realizado um ajuste manual inicial para o software encontrar o primeiro pico da onda (Figura 3.7);
- Após o ajuste inicial, o comando Auto Analyze determina automaticamente os dois picos da onda e realiza todos os cálculos necessários para a obtenção dos valores da constante dielétrica (K_a) e de EC_b (Figura 3.8);

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

A janela *Analysis Output Window* (Figura 3.9) apresenta os resultados dos cálculos efetuados e mostra os resultados das últimas cinquenta análises feitas.

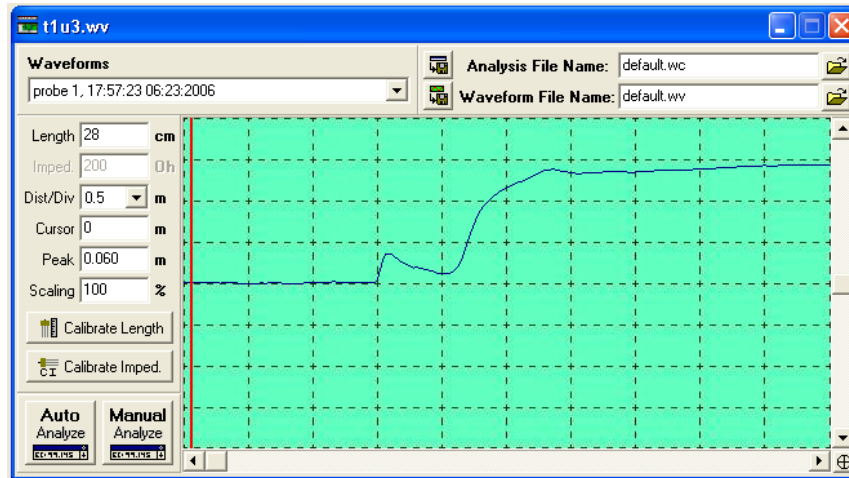


Figura 3.5 - Janela após a execução do comando *Sweep*.

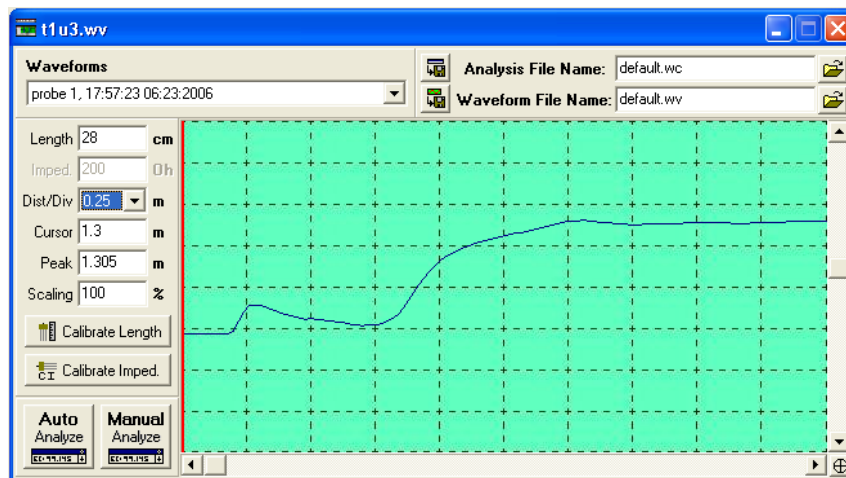


Figura 3.6 - Janela após o ajuste da escala.

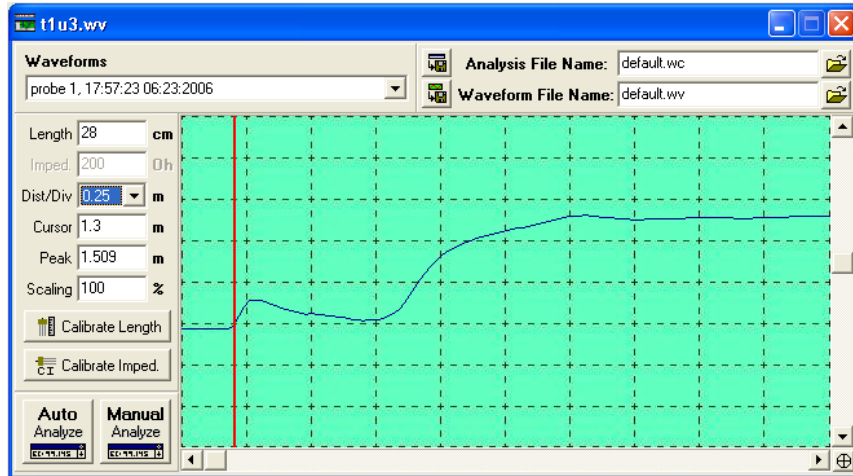


Figura 3.7 - Janela após o ajuste inicial da localização do primeiro pico.

A Figura 3.10 mostra a janela *Analysers Settings* onde é possível impor condições para a análise da onda. Dentre essas condições destaca-se o método de determinação da distância entre os picos e a imposição de constantes nas equações de calibração para determinação do valor de teor de umidade volumétrico.

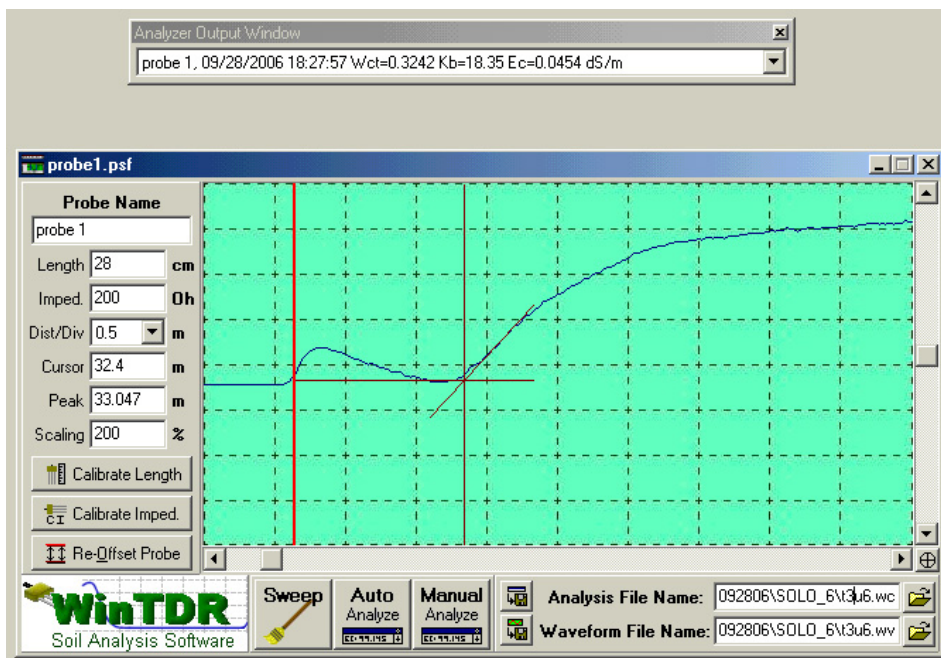


Figura 3.8 - Janela após o comando *Auto Analyze*.

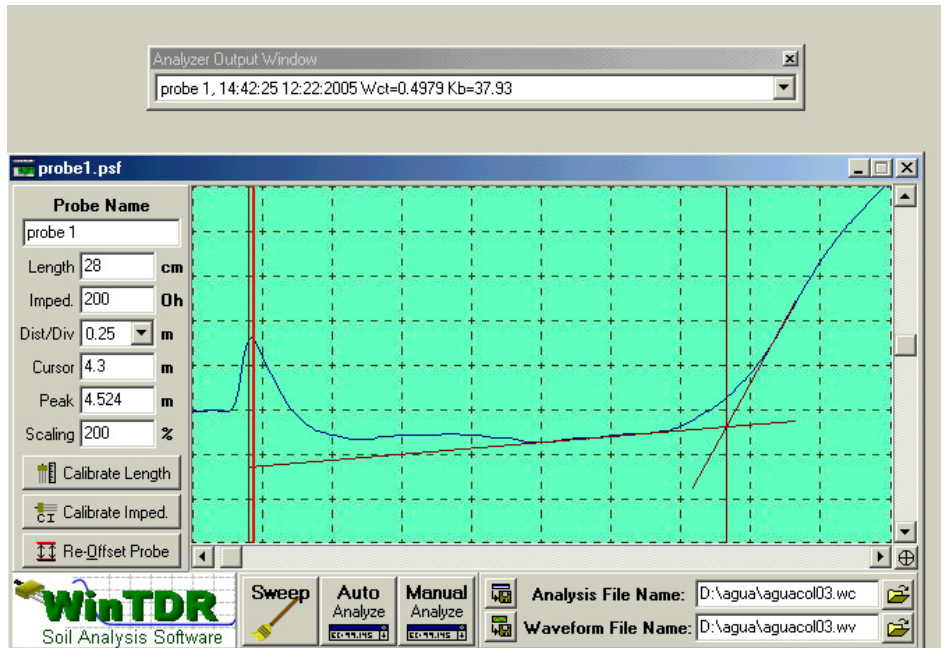


Figura 3.9 - Janela típica do software WinTDR.

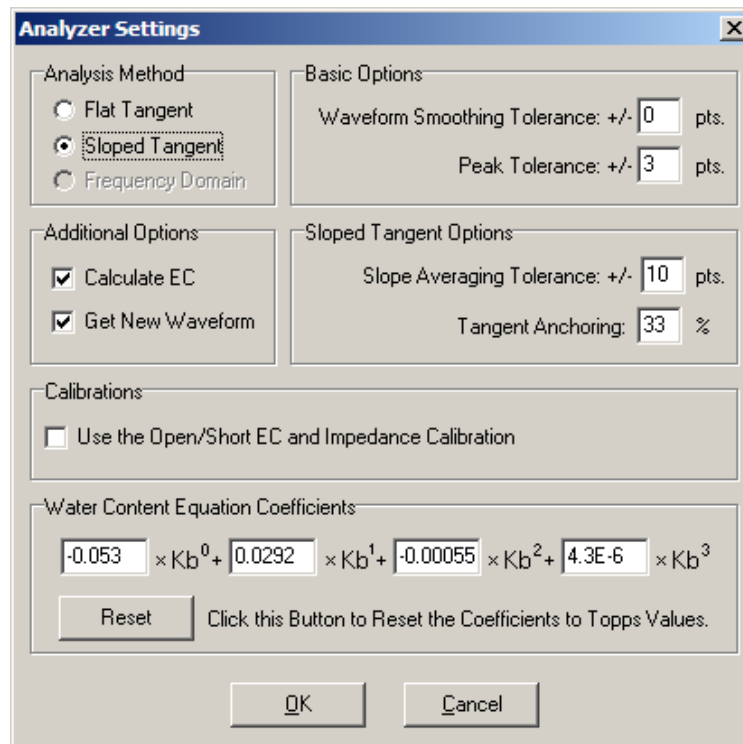


Figura 3.10 - Janela de ajuste de opções do software WinTDR.

3.4 Amostragem

Foram coletadas amostras deformadas de solo nas seguintes localidades:

- SP 191 – km 73 e 78 (Rodovia Estadual Wilson Finardi) nas proximidades do município de Rio Claro-SP
- distrito de Santa Eudóxia pertencente ao município de São Carlos-SP
- Conjunto Habitacional Carlos Lacerda de Chaves no município de Ribeirão Preto-SP
- barragem de rejeito de mineração em Paracatu-MG
- Campus I e II da Escola de Engenharia de São Carlos
- Campus da Universidade Federal de São Carlos.

A amostra retirada no km 78 da SP-191 (Solo 1) pertence à Formação Pirambóia, esta Formação estende-se de maneira contínua por todo estado de São Paulo, aflorando ao longo de toda Depressão Periférica Paulista. Com espessura variável, seus depósitos chegam a atingir 270 m em seções aflorantes na região de São Pedro-SP. (CAETANO-CHANG e WU, 2003).

Na região da coleta esta formação está representada por arenitos esbranquiçados, amarelados, avermelhados e róseos, médios a muito finos, ocasionalmente grossos, regularmente classificados, síltico-argilosos, quartzosos, com grãos sub-arredondados, e intercalações de siltitos e argilitos.

O material coletado no km 73 da SP-191, Solo 2 e 3, pertencem à Formação Corumbataí. A Formação Corumbataí é de origem marinha ou de planícies de maré, apresentando relações estratigráficas concordantes com a unidade Irati em seu contato basal, sendo constituída de argilitos, folhelhos e siltitos cinza, arroxeados ou avermelhados com intercalações de bancos carbonáticos, siléxitos e camadas de arenitos finos. A espessura da Formação Corumbataí é variável podendo atingir cerca de 200 metros.

As amostras coletadas no distrito de Santa Eudóxia (Solo 4) e no Conjunto Habitacional Carlos Lacerda em Ribeirão Preto (Solo 5) tratam-se de materiais argilosos originários da Formação Serra Geral. A Formação Serra Geral é constituída principalmente de basaltos toleíticos, formados por derrames em extenso vulcanismo de fissura e inclui pequenos corpos de arenitos intercalados. Os magmatitos apresentam textura afanítica à fanerítica, coloração cinza escura à negra, amígdalas na base e no topo em umidade definidas como derrames, assim como fraturamento vertical e horizontal.

O Solo 6 foi coletado na barragem de rejeito de mineração no Morro do Ouro localizada ao norte da cidade de Paracatu-MG. O depósito do Morro do Ouro está encaixado nos filitos carbonosos da base da Formação Paracatu (Membro Morro do Ouro). Regionalmente, o Membro Morro do Ouro inicia-se por filitos carbonosos, tendo em sua base um fino, mas persistente nível de quartzito (2 – 10 metros de espessura). Para o topo, os filitos carbonosos passam gradualmente aos sericitos-quartzito filitos do Membro Serra da Anta da mesma formação.

O município de São Carlos – SP, onde foram coletadas amostras nos Campus I (Solo 7) e Campus II (Solo 8) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) e na Universidade Federal de São Carlos (solos 9 e 10), está localizado na zona de transição das unidades geomorfológicas das cuestas basálticas e de arenitos, entre o Planalto Central e a Depressão Periférica Paulista. Situado a cerca de 900 m de altitude em relação ao nível do mar. Segundo Bortolucci (1983), o município de São Carlos assenta-se sobre as rochas do Grupo São Bento, compostas por arenitos da Formação Botucatu e Pirambóia e derrames de efusivas basálticas da Formação Serra Geral. Nessa região, originaram-se depósitos superficiais aluviais e coluviais graças ao intemperismo, com posterior retrabalhamento dos materiais do Grupo Bauru e das Formações Serra Geral e Botucatu. Esses depósitos são

chamados de Sedimentos Cenozóicos e estão separados do Grupo Bauru por uma linha de seixos situada entre cinco e sete metros de profundidade.

A caracterização geotécnica das amostras de solo foi realizada de acordo com os ensaios propostos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT): granulometria conjunta (NBR 7181/84), massa específica dos sólidos (NBR 6508/84), limites de liquidez (NBR 6459/84), limites de plasticidade (NBR 7180/84).

3.5 Ensaio de Laboratório

3.5.1 Calibração do equipamento

Na execução da calibração em laboratório, foram utilizados os seguintes equipamentos:

1. balança BG-4000 Gehaka (Mínimo = 0.50 g; Máximo = 4040 g; Erro \pm 0.1 g);
2. balança C&F (Mínimo = 250 g; Máximo = 30 kg; Erro \pm 10 g);
3. betoneira MetalPama 135 l;
4. cápsulas de alumínio para a determinação do teor de umidade;
5. compactador;
6. concha;
7. espátula;
8. martelo de borracha;
9. micro-computador;
10. recipiente de PVC com 202 mm de diâmetro e 285 mm de altura;
11. régua Biselada;
12. sonda helicoidal desenvolvida no trabalho;
13. testador de cabos Tektronix 1502C.

As Figuras 3.11 e a 3.12 mostram alguns dos equipamentos citados anteriormente.



Figura 3.11 – Materiais utilizados na execução do ensaio.

O ensaio de calibração consiste na determinação da constante dielétrica e da condutividade elétrica volumétrica em diferentes teores de umidade de uma mesma amostra de solo. O procedimento de realização do ensaio seguiu o roteiro que é descrito a seguir.

1. A amostra coletada do campo, em condição natural de teor de umidade, foi colocada em uma bandeja de aço e deixada secar a sombra em local com ventilação moderada até alcançar o teor de umidade higroscópico. Durante esse período, a amostra foi revolvida e desmanchados os torrões. Aqueles torrões que não desmancharam manualmente foram colocados em um britador e, posteriormente, em uma galga até que se desfizessem.
2. Após a amostra secar, foram separados 20 kg de material para a execução do ensaio.
3. A amostra de solo foi compactada em recipiente de PVC rígido, em três camadas com um soquete de massa de 4,95Kg. Aplicaram-se cinco golpes em cada camada (Figura 3.13).
4. Após executada a compactação, o solo no topo do recipiente foi nivelado utilizando uma régua biselada, conforme mostrado abaixo, na Figura 3.14.

5. O recipiente com o solo foi pesado em balança com capacidade de 30 kg, esse processo foi necessário para a determinação da massa específica do solo (Figura 3.15).
6. Realizou-se um pré-furo no solo com um tubo de PVC de 20 mm, com intuito de facilitar a penetração da sonda.



Figura 3.12 –Micro-Computador usado na aquisição de dados.

7. Executado o pré-furo, inseriu-se a sonda helicoidal.
8. Com a sonda inserida no solo, foram realizadas as medidas da constante dielétrica e condutividade elétrica volumétrica do solo por meio da técnica TDR, utilizando como interface de visualização o programa WinTDR 6.1.
9. No programa, marcou-se o primeiro ponto de inflexão. Depois disso, o programa calculou o segundo ponto e forneceu os valores de constante dielétrica e condutividade elétrica volumétrica.
10. Depois de feitas as medidas, foram retiradas as amostras de solo do recipiente, colocadas em cápsulas e depositadas em estufa a 105°C para a determinação do teor de umidade gravimétrico.



Figura 3.13 – Compactação do solo.

11. Após executado esse processo, o material foi retirado do recipiente e adicionou-se água no solo, com intuito de aumentar o teor de umidade e homogeneizado em uma betoneira por 15 minutos, a Figura 3.16 mostra o solo com um alto teor de umidade, após ter sido retirado da betoneira.
12. Após esse tempo, o material foi retirado da betoneira, ensacado, lacrado, para não perder umidade, e deixado descansar por um período que variou de duas a 48 horas dependendo do material utilizado. Para solos arenosos, o tempo de descanso foi de duas horas; para os solos argilosos, o tempo chegou até 48 horas de descanso.
13. Depois do descanso, o processo do ensaio era repetido, até chegar aos teores de umidades desejados.

Os resultados obtidos com o procedimento descrito anteriormente são os seguintes:

1. K_a = constante dielétrica aparente;
2. EC_b = condutividade elétrica volumétrica;

3. w = teor de umidade gravimétrico;
4. ρ = massa específica do solo.



Figura 3.14 – Nivelamento do topo do molde.



Figura 3.15 – Pesagem do conjunto molde mais solo.



Figura 3.16 – Material após ter sido homogeneizado na betoneira.

Por meio dos dados obtidos, foram calculados a massa específica seca do solo (ρ_d), o índice de vazios (e), o grau de saturação (S_r) e o teor de umidade volumétrico (θ). Tais parâmetros foram calculados por meio das Equações 16, 17, 18 e 19.

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w} \quad (16)$$

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (17)$$

$$S_r = \rho_s \cdot \frac{w}{e} \quad (18)$$

$$\theta = w \cdot \rho_d \quad (19)$$

A calibração da sonda foi baseada no trabalho de Yu e Drnevich (2004), que estabeleceu uma relação linear para a determinação da equação de calibração da constante dielétrica aparente (K_a) e da condutividade elétrica volumétrica do solo (EC_b), com a massa específica seca (ρ_d), massa específica da água (ρ_w) e o teor de umidade gravimétrica (w).

As equações de calibração para a constante dielétrica e para a condutividade elétrica volumétrica estão representadas por meio das Equações 12 e 13 apresentadas na revisão bibliográfica, onde a , b , c e d são constantes de calibração específicas do solo. A estimativa do teor de umidade gravimétrico e da massa específica seca dos solos é obtida através das Equações 14 e 15.

$$\sqrt{K_a} \frac{\rho_w}{\rho_d} = a + b \cdot w \quad (12)$$

$$\sqrt{EC_b} \frac{\rho_w}{\rho_d} = c + d \cdot w \quad (13)$$

$$\rho_d = \frac{d\sqrt{K_a} - b\sqrt{EC_b}}{ad - cb} \rho_w \quad (14)$$

$$w = \frac{c\sqrt{K_a} - a\sqrt{EC_b}}{b\sqrt{EC_b} - d\sqrt{K_a}} \quad (15)$$

3.5.2 Ensaio de efeito de borda

Para verificar a influência do tamanho e do material dos recipientes usados nas calibrações, foram realizadas leituras da constante dielétrica da água em três diferentes recipientes. Primeiramente, foram realizadas leituras no cilindro de PVC (202 mm de diâmetro e 285 mm de altura) utilizado no ensaio de calibração. Posteriormente, foram executadas leituras em recipiente plástico (275 mm de diâmetro e 320 mm de altura). E por fim, realizaram-se leituras em um recipiente metálico (320 mm de diâmetro e 320 mm de altura).

Depois de realizadas as determinações das constantes dielétricas em cada recipiente, foram comparados os resultados e verificados o desvio e o coeficiente de variação em cada recipiente.

3.6 Ensaio de Campo

Os ensaios de campo foram realizados em duas etapas. Na primeira, foram realizados furos de sondagem utilizando trado mecânico acoplado a um caminhão. Nessa etapa, foi utilizada a sonda TDR com 21 m de cabo coaxial. Esse ensaio ocorreu no campo experimental da Escola de Engenharia de São Carlos (CCE – EESC/USP). Já na segunda etapa, os furos foram realizados com auxílio de trado manual limitados a uma profundidade máxima de 4,5 m. Nessa etapa, foi utilizada a sonda TDR com cabo coaxial de 10 m de comprimento. Nesta etapa, foram realizados ensaios no Campus I e II da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) e no Campus da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). As áreas onde ocorreram os ensaios estão mostradas na Figura 3.17.

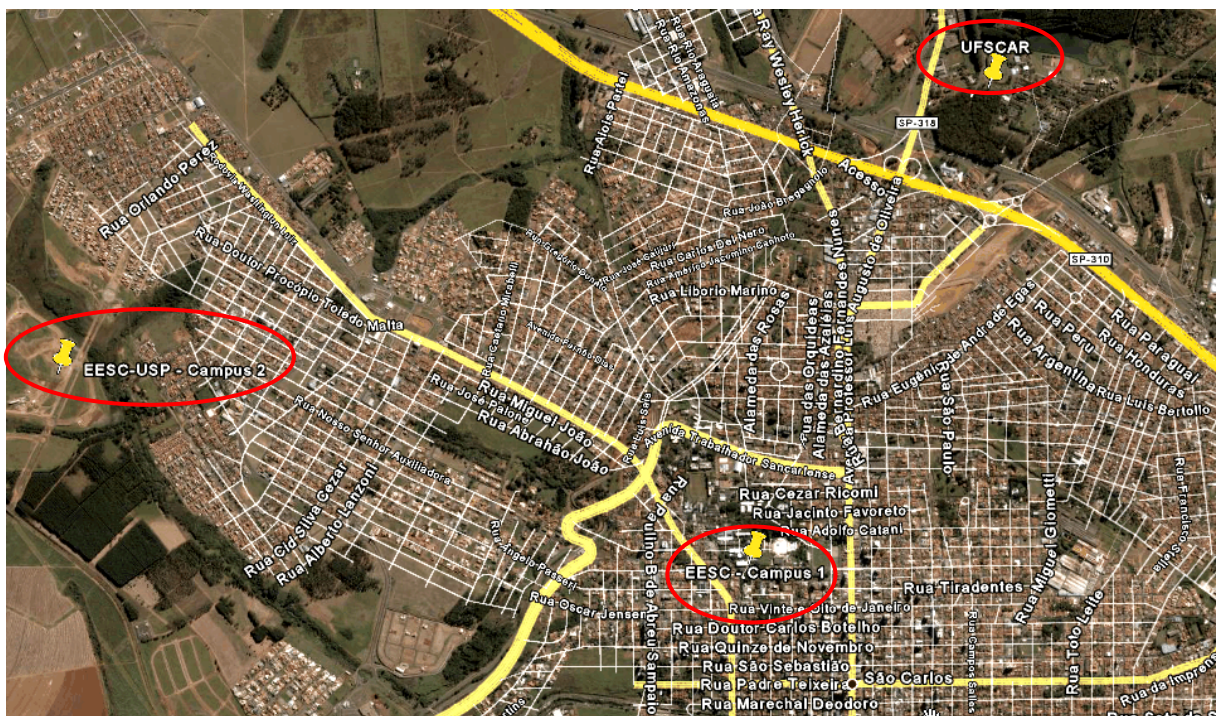


Figura 3.17 – Locais onde foram realizados os ensaios de campo.

3.6.1 Primeira Etapa

Para o ensaio de campo, foram utilizados os seguintes materiais:

1. amostrador bipartido;
2. balança BG-4000 Gehaka (Mínimo = 0.50 g; Máximo = 4040 g; Erro \pm 0.1 g);

3. caixa de isopor;
4. caminhão equipado para realização de simples reconhecimento com medida de SPT;
5. cápsula metálica para determinação do teor de umidade gravimétrico;
6. compactador;
7. concha;
8. espátula;
9. extensão de energia com 30 m de comprimento;
10. filtro de linha;
11. hastes metálicas para cravação da sonda;
12. martelo de borracha;
13. micro-computador;
14. saco plástico com capacidade de 0,5 kg;
15. saco plástico capacidade 2,5 kg;
16. sonda TDR helicoidal;
17. testador de cabos Tektronix 1502C.

Para a execução do ensaio de campo, inicialmente pensou-se em utilizar o mesmo penetrômetro usado nos ensaios CPTU para cravar a sonda. Porém, devido à escassez de tais equipamentos no Brasil, durante a realização dos ensaios de campo, não foi encontrada nenhuma empresa que pudesse alugá-los a custo viável para esse projeto de pesquisa. Por estes motivos, adaptou-se um equipamento que é utilizado em ensaios SPT mecanizado (Figura 3.18).

Para poder utilizar as hastes do ensaio SPT foi preciso a fabricação de uma luva adaptadora para ligar a sonda TDR às hastes. Além disso, precisou-se construir outro adaptador que admitisse o levantamento do solo do conjunto de hastes e sonda sem intervir com o cabo coaxial da sonda (Figura 3.19).

Para realizar os ensaios de campo foram seguidas as seguintes etapas abaixo:

1. Depois de determinar o ponto onde seria cravada a sonda TDR era preciso posicionar e nivelar o caminhão.



Figura 3.18 - Aparelhamento para realização de ensaios SPT mecanizados, adaptado para a cravação da sonda TDR.

2. Foram feitos pré-furos até a profundidade desejada com a ajuda de um trado mecânico de 75 mm de diâmetro para evitar esforços mecânicos excessivos na sonda. Feito isso, o trado era retirado.
3. Em seguida, com a ajuda das hastes do equipamento, era cravado um amostrador bipartido para determinação posterior do teor de umidade gravimétrico das amostras de solo (Figura 3.20). Além disso, com a mesma finalidade dos pré-furos do trado feitos inicialmente, a cravação do amostrador tinha a mesma intenção: a de evitar esforços mecânicos excessivos na sonda e realizar um furo inicial para a cravação da sonda TDR.
4. Retirado o amostrador do furo, ele era aberto e colocada a amostra de solo em embalagens herméticas, para determinação do teor de umidade gravimétrico.

5. Em seguida, o conjunto era desmontado para a colocação do cabo coaxial do testador de cabos e depois montado novamente. A sonda era então roscada ao conjunto de haste que era em seguida içado por meio da torre.
6. O conjunto hastes e sonda eram colocados no furo feito inicialmente e baixado até a sonda chegar ao fundo do furo.
7. Com a ajuda de um macaco hidráulico de capacidade para 50 kN, a sonda era então cravada no solo.
8. A sonda era conectada ao testador de cabos através do cabo coaxial.
9. Com o testador de cabos devidamente preparado, eram então realizadas cinco leituras diferentes, gravando-se tanto os resultados numéricos como o trace de cada leitura. O programa *WordPad* auxiliou neste processo. Tal procedimento é o mesmo utilizado para ensaios em laboratório.
10. Com as leituras feitas, o conjunto era levantado e retirado para a desmontagem.
11. Por fim, o trado mecânico era colocado novamente no furo e penetrado até a nova cota desejada. Assim, repetiram-se os passos anteriormente descritos.



Figura 3.19 - Adaptador usado para o levantamento do conjunto de hastes e sonda, sem intervir com o cabo da sonda TDR.



Figura 3.20 - Coleta de amostra de solo com amostrador bipartido.

3.6.2 Segunda etapa

Foram utilizados os seguintes materiais para a execução da segunda etapa do ensaio de campo:

1. balança BG-4000 Gehaka (Mínimo = 0.50 g; Máximo = 4040 g; Erro \pm 0.1 g);
2. bateria de motocicleta com 12 V;
3. caixa de isopor;
4. cápsula metálica para determinação do teor de umidade gravimétrico;
5. concha;
6. conversor de voltagem;
7. espátula;
8. extensão de energia com 30 m de comprimento;
9. giz;
10. hastes metálicas para cravação da sonda;
11. marreta de 5 kg;
12. martelo de borracha;
13. micro-computador;

14. sacos plástico com capacidades de 0,5 kg e 2,5 kg;
15. sonda Helicoidal com cabo coaxial de 10 m de comprimento desenvolvida no trabalho;
16. testador de cabos Tektronix 1502C;
17. trado com 10 cm de diâmetro;
18. trena.

A segunda etapa do ensaio de campo foi realizada no Campus I e II da Escola de Engenharia de São Carlos e no Campus da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

As Tabelas 3.1 e 3.2 mostram as coordenadas geográficas dos locais onde foi executada esta etapa do ensaio de campo. As coordenadas foram obtidas através de aparelho GPS Garmin, e foi usado o Datum WGS 84.

A necessidade de se realizar uma segunda etapa de ensaios de campo ocorreu devido a problemas durante a realização da primeira etapa, na qual não foi possível a determinação da constante dielétrica devido ao excesso de ruídos.

Tabela 3.1 – Coordenadas geográficas dos ensaios de campo realizados na EESC-USP.

<i>Furo</i>	Campus I Coordenadas		Campus II Coordenadas	
	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>
1	22°00'35,7" S	47°53'46,6" W	22°00'04" S	47°55'49,9" W
2	22°00'36,1" S	47°53'46,8" W	22°00'04" S	47°55'49,3" W
3	22°00'36,3" S	47°53'46,5" W	22°00'02" S	47°55'51,6" W
4	22°00'36,5" S	47°53'46,7" W	22°00'03" S	47°55'53,0" W

Tabela 3.2 – Coordenadas geográficas dos ensaios de campo realizados na UFSCar.

<i>Furo</i>	UFSCar Bosque Paulistinha Coordenadas		UFSCar DECiv Coordenadas	
	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>
1	21°59'16,9" S	47°53'3,84" W	21°58'53,9" S	47°52'45,8" W
2	21°59'16,6" S	47°53'3,60" W	21°58'54,0" S	47°52'45,6" W
3	21°59'15,8" S	47°53'3,10" W	21°58'54,2" S	47°52'45,7" W
4	21°59'16,0" S	47°53'3,38" W	21°58'54,2" S	47°52'45,9" W

Para essa segunda etapa dos ensaios de campo foram utilizados procedimentos diferentes, já que os furos foram feitos manualmente e não com o auxílio de um caminhão com trado mecânico. Os itens de 1 a 9 mostram as etapas para o ensaio.

1. Depois de determinar o ponto onde seria cravada a sonda TDR era realizado um pré-furo, com trado manual de 10 cm de diâmetro, até a profundidade de 1,5m, para evitar um esforço mecânico excessivo (Figura 3.21).
2. A sonda era então roscada ao conjunto de hastes, que era em seguida colocado no pré-furo e penetrada 30 cm (Figura 3.22).
3. A penetração era feita com o auxílio de uma marreta de 5 kg e um pedaço de madeira que era colocado sobre a haste. Isto ajudava a não danificar o cabo coaxial e o a haste.
4. Em seguida a sonda era conectada ao testador de cabos através do cabo coaxial (Figura 3.23).



Figura 3.21 - Detalhe do trado manual.

5. Com o testador de cabos devidamente preparado, eram então realizadas cinco leituras diferentes, gravando-se tanto os resultados numéricos (extensão 'wc' e

‘wv’) como o trace de cada leitura. O programa *WordPad* auxiliou neste processo. Tal procedimento é o mesmo utilizado para ensaios em laboratório.



Figura 3.22 - Conjunto sonda-haste cravado no solo.



Figura 3.23 - Detalhe do computador portátil e do equipamento TDR.



Figura 3.24 - Coleta amostra de solo para determinação do teor de umidade gravimétrico.

6. Com as leituras feitas, o conjunto era levantado para a retirada de material (Figura 3.24) para a determinação do teor de umidade através do método gravimétrico.
7. Por fim, o trado manual era colocado novamente no furo e escavado até a nova cota desejada. Assim, repetiram-se os passos anteriormente descritos.
8. Os ensaios foram realizados para profundidades entre 1,5 m e 5,2 m.
9. A distância média entre os locais de ensaio variou de 4 a 10 metros.

4 RESULTADOS

Para os ensaios de laboratório foram utilizados dez solos de diversas regiões dos estados de São Paulo e Minas Gerais. Os resultados destes ensaios estão relacionados abaixo com o resultado da caracterização de cada solo.

4.1 Caracterização das Amostras

As Figuras 4.1 a 4.10 mostram as curvas granulométricas das amostras de solos. A Tabela 4.1 mostra uma síntese da caracterização dos solos.

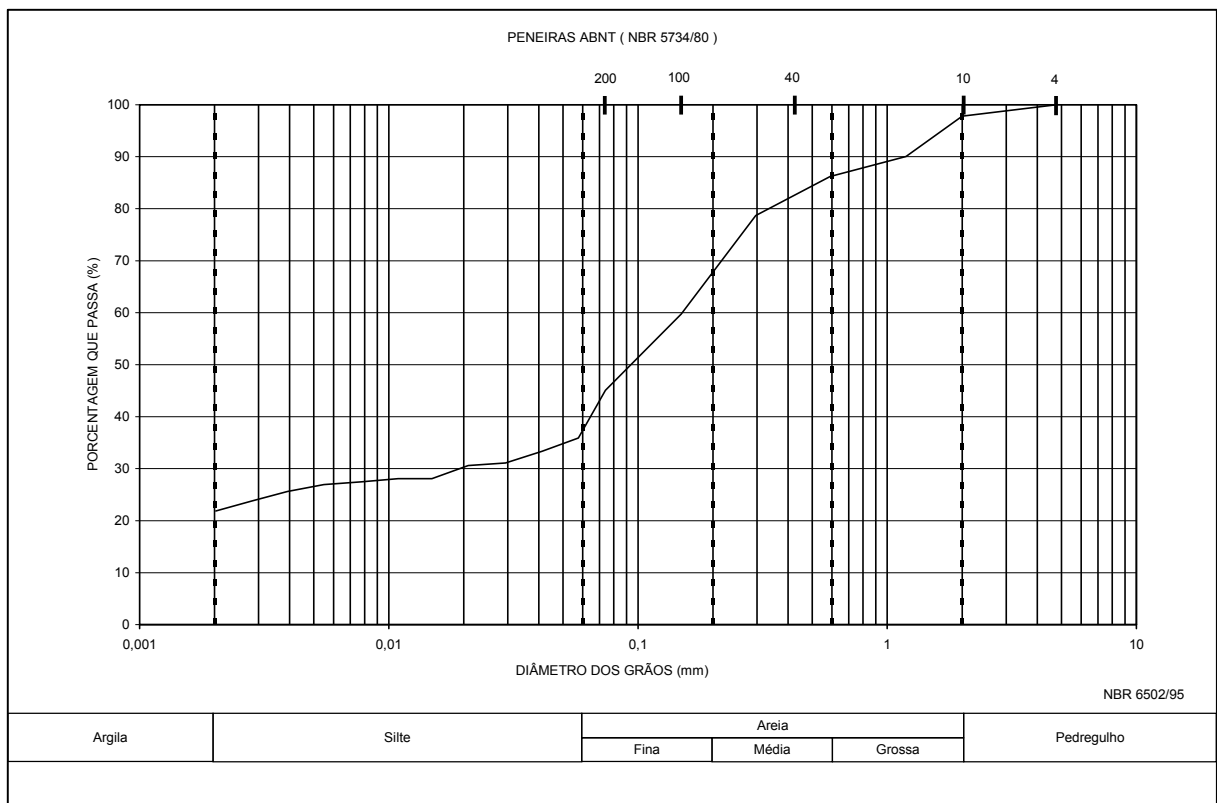


Figura 4.1 – Curva Granulométrica do Solo 1

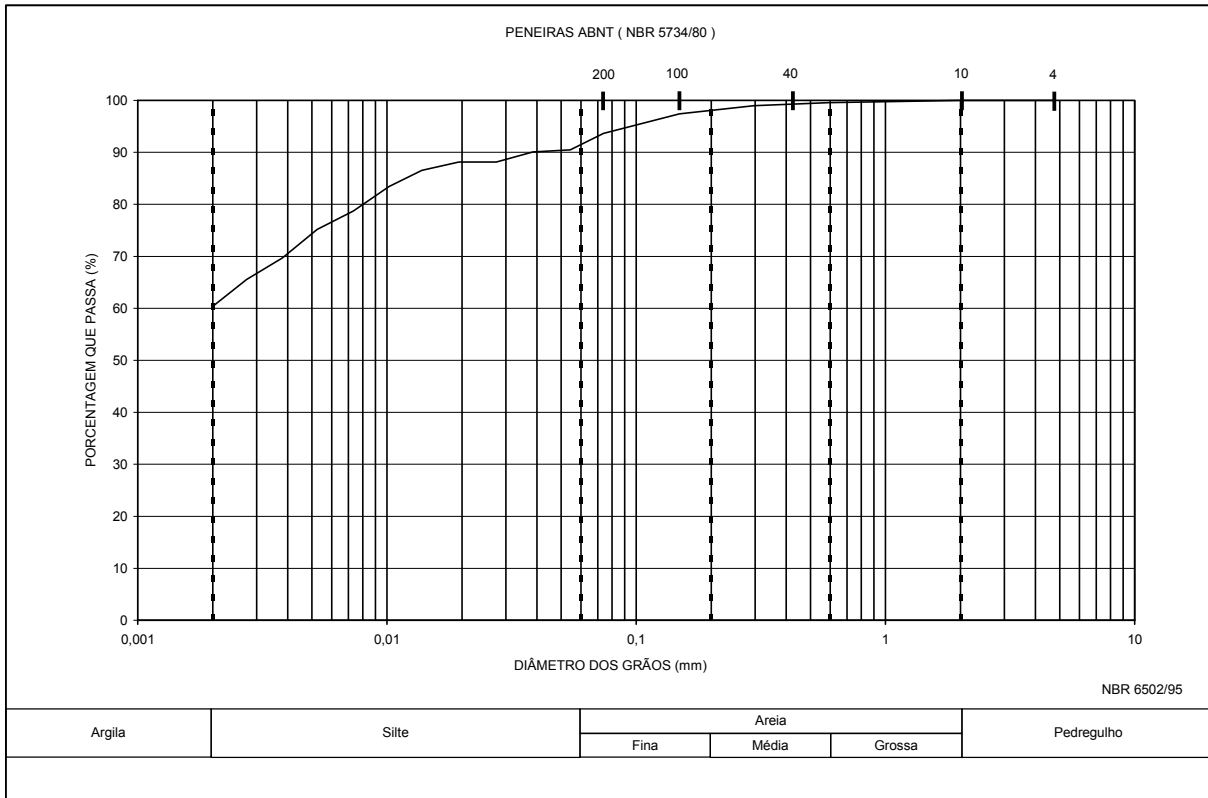


Figura 4.2 – Curva Granulométrica do Solo 2

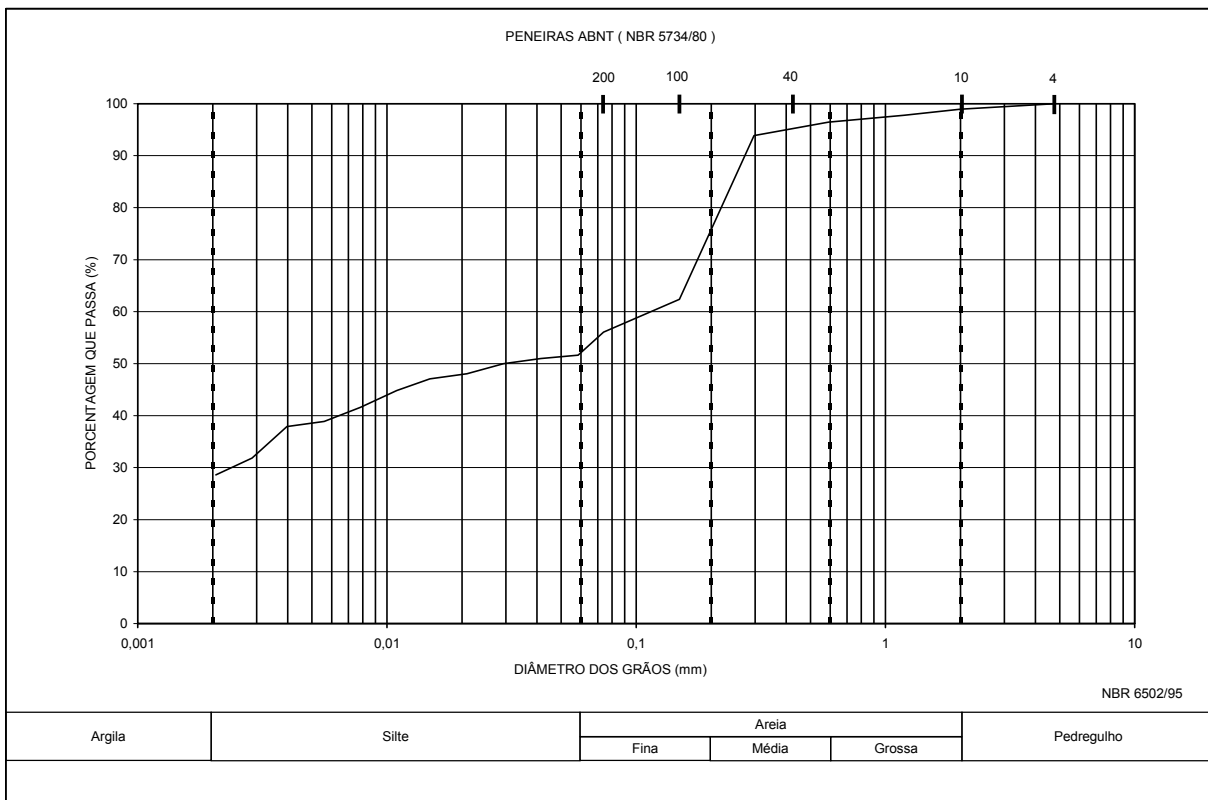


Figura 4.3 – Curva Granulométrica do Solo 3

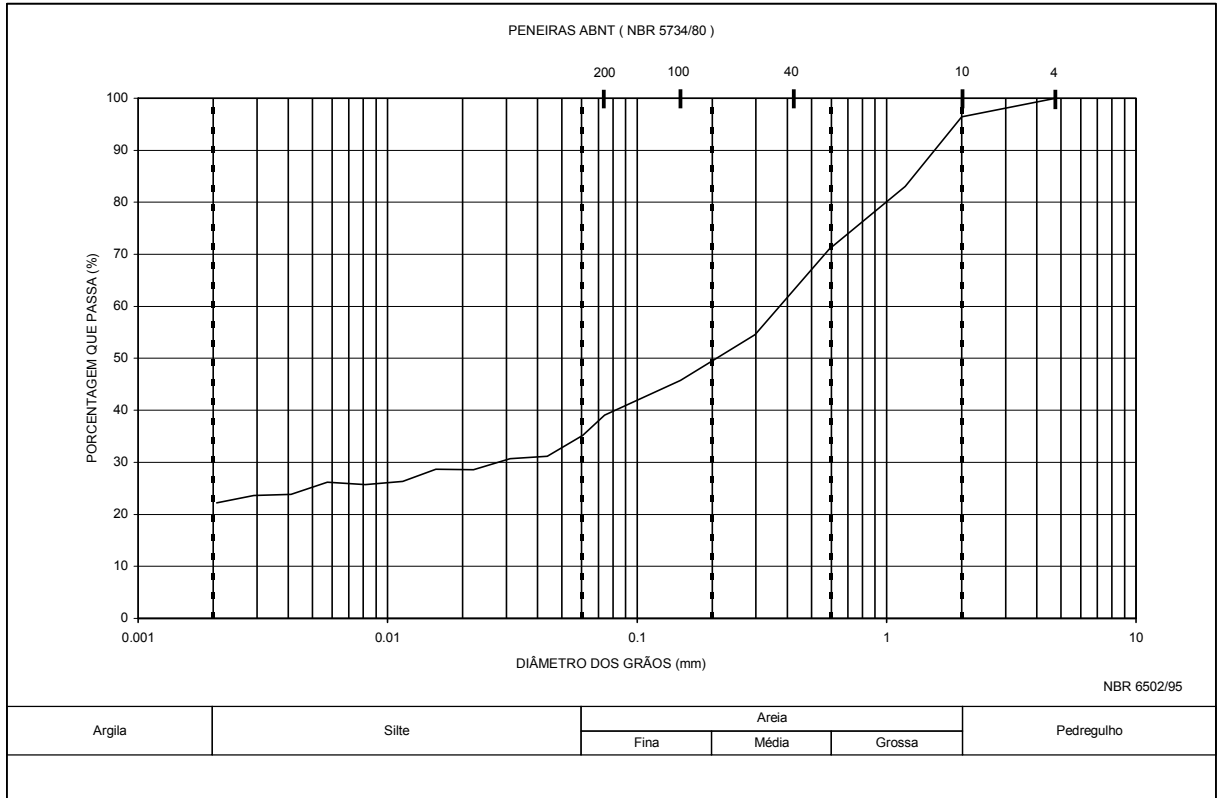


Figura 4.4 – Curva granulométrica do Solo 4.

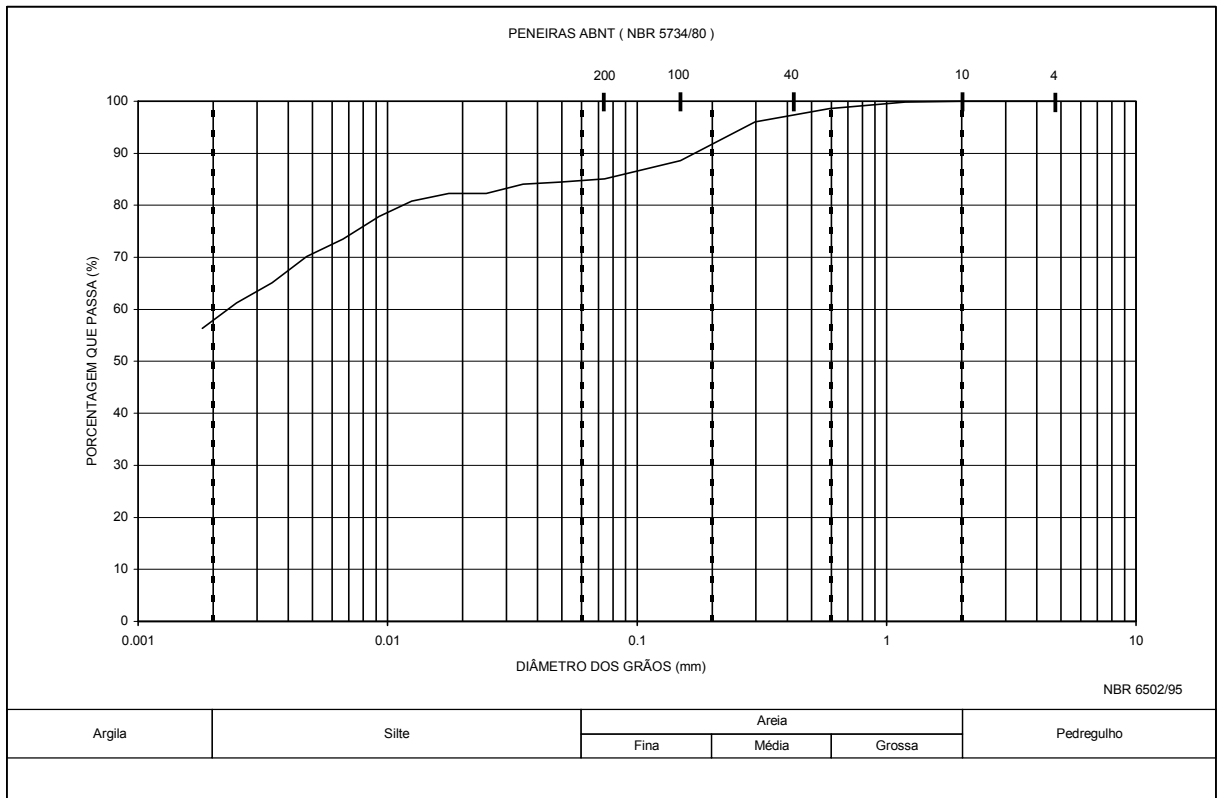


Figura 4.5 – Curva granulométrica do Solo 5.

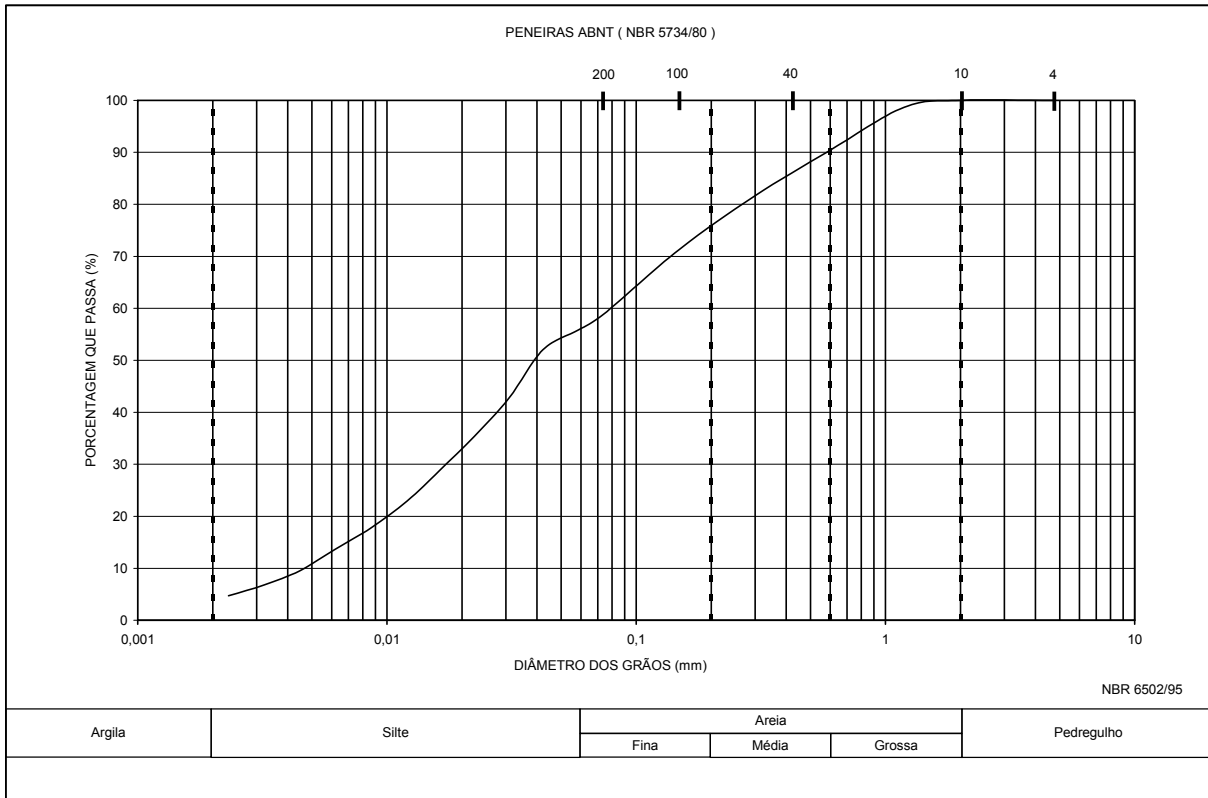


Figura 4.6 – Curva granulométrica do Solo 6.

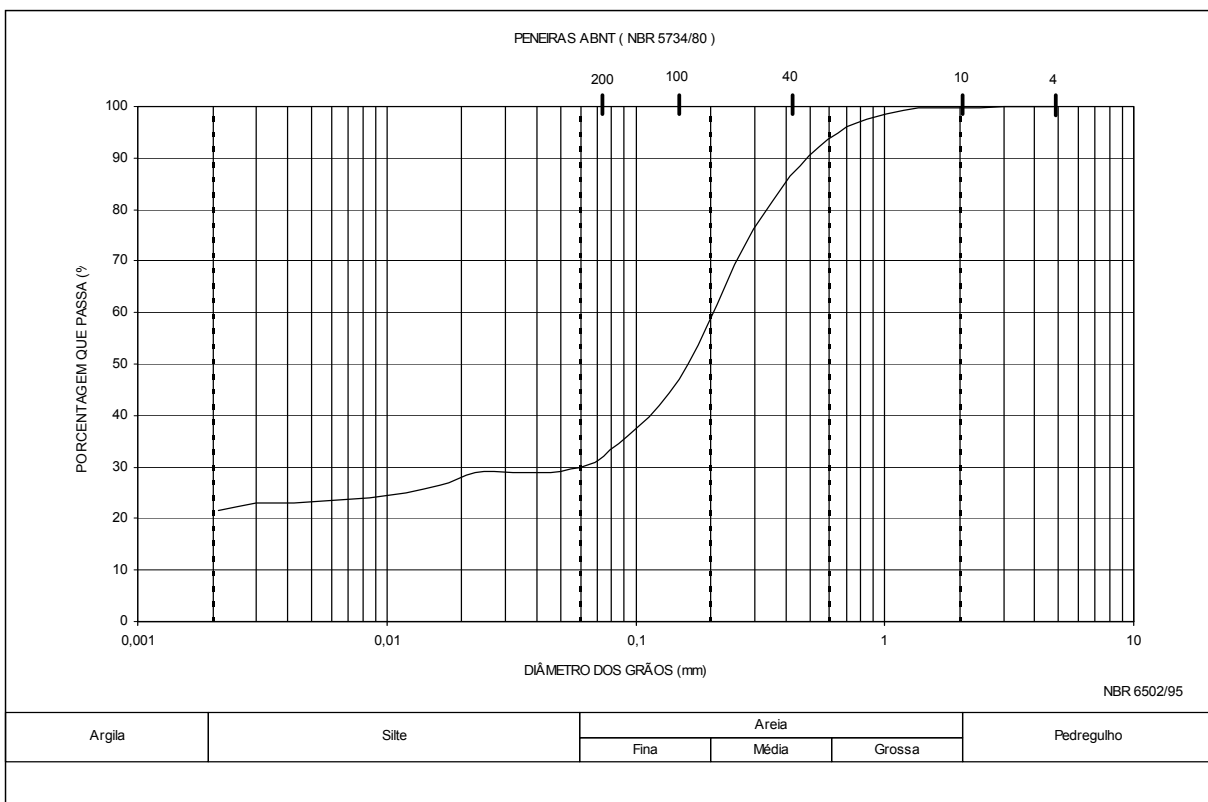


Figura 4.7 – Curva granulométrica do Solo 7.

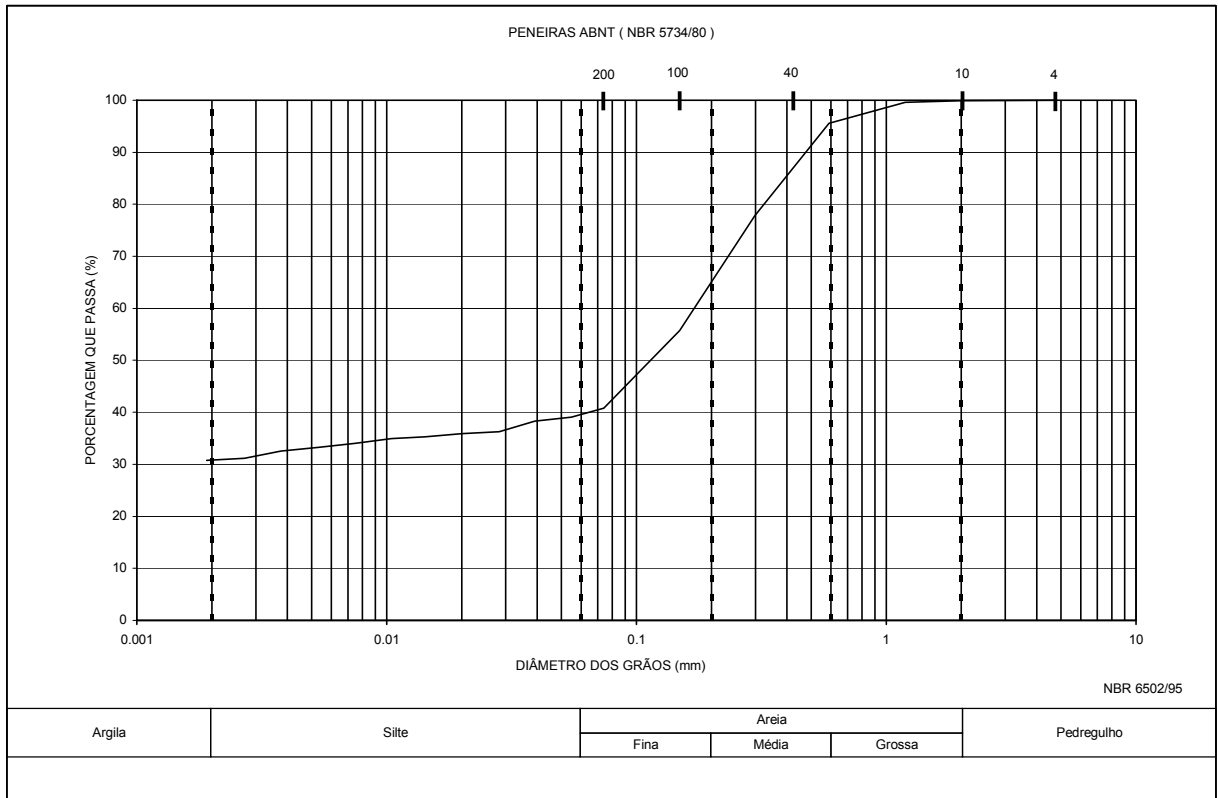


Figura 4.8 – Curva granulométrica do Solo 8.

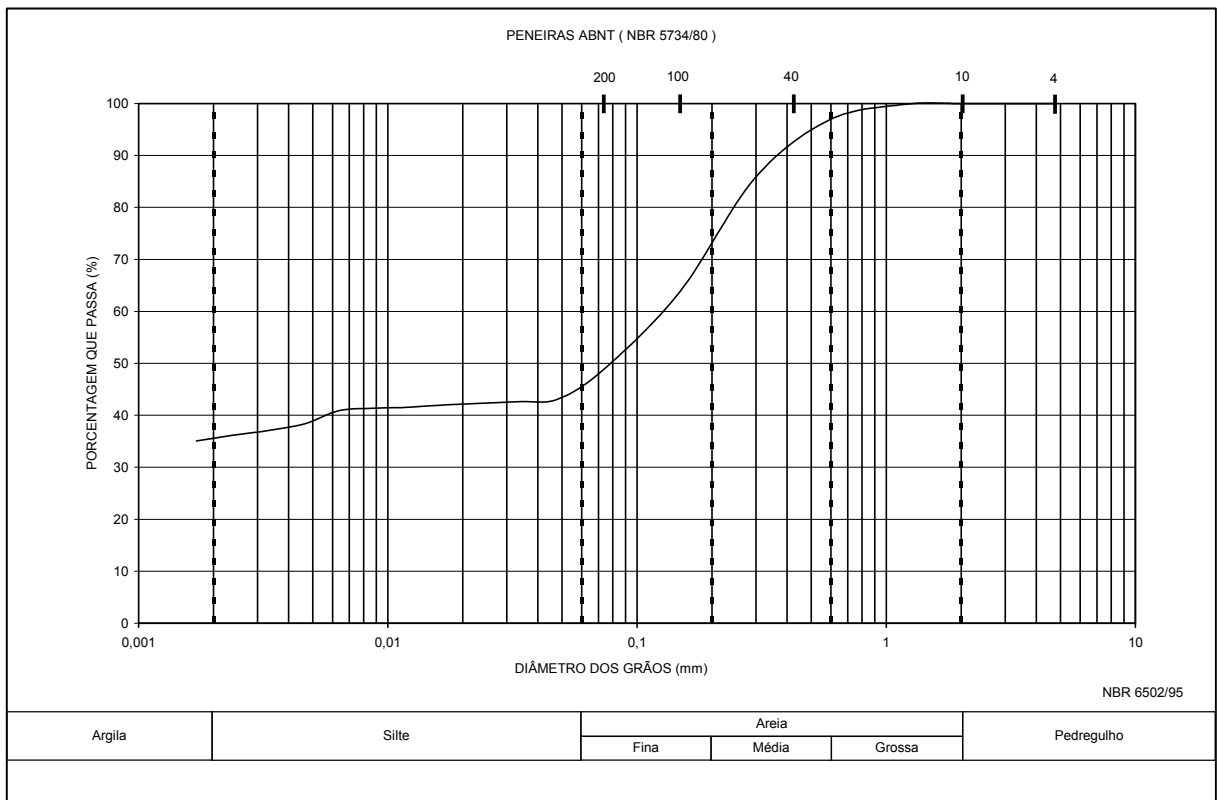


Figura 4.9 – Curva granulométrica do Solo 9.

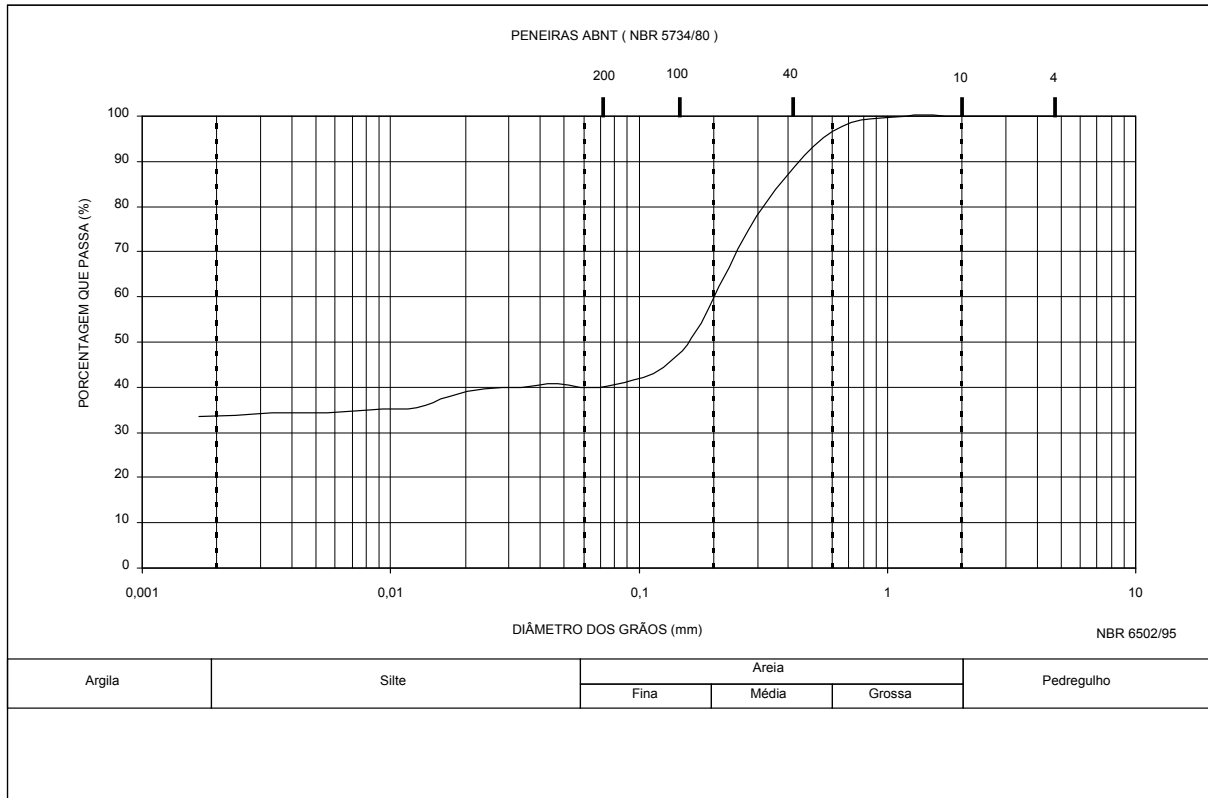


Figura 4.10 – Curva granulométrica do Solo 10.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de caracterização para o Solo 1 a 10.

Amostras	ρ_d (g/cm^3)	Limites de Consistência			Classificação Unificada
		w_L (%)	w_P (%)	IP (%)	
Solo 1	2,59	32	22	13	SC
Solo 2	2,67	115	79	39	MH
Solo 3	2,86	53	28	25	CH
Solo 4	2,91	25	15	10	SC
Solo 5	3,09	43	26	17	CL
Solo 6	2,72	52	33	19	MH
Solo 7	2,70	25	16	9	SC
Solo 8	2,66	35	21	14	SC
Solo 9	2,93	36	22	14	SC
Solo 10	2,69	28	20	8	SC

4.2 Calibração do Equipamento

4.2.1 Resultados correspondentes ao Solo 1

O Solo 1 é uma areia-argilosa, coletada no km 78 da Rodovia Wilson Finardi (SP-191) entre os municípios de Araras e Ipeúna. A Tabela 4.2 mostra as leituras de constantes

dielétricas (K_a), condutividade elétrica volumétrica (EC_b) e as determinações da massa específica seca (ρ_d) e do teor de umidade gravimétrico (w) para o Solo 1.

Tabela 4.2 - Resultados correspondentes ao Solo 1.

ρ (g/cm^3)	w (%)	K_a	ρ_d (g/cm^3)	S_r (%)	θ (%)	EC_b (S/m)	$\sqrt{K_a \rho_w / \rho_d}$	$\sqrt{EC_b \rho_w / \rho_d}$
1,326	12.87	2.69	1,174	27,69	15,12	0.00153	1,396	0,033326
1,383	18.31	3.51	1,169	39,04	21,40	0.00170	1,603	0,035251
1,431	24.92	4.42	1,145	51,19	28,54	0.00176	1,837	0,036654
1,580	31.45	4.42	1,202	70,56	37,79	0.00176	1,750	0,034926
1,715	36.47	12.05	1,257	89,09	45,83	0.00347	2,762	0,046849
1,699	44.15	15.92	1,178	95,53	52,03	0.00413	3,385	0,054562
1,652	47.69	17.74	1,119	93,97	53,35	0.00423	3,765	0,058135
1,595	60.97	19.49	0,991	97,89	60,41	0.00394	4,456	0,063384
1,566	64.42	21.70	0,952	97,06	61,34	0.00378	4,891	0,064561
1,550	73.04	23.79	0,895	100,00	65,40	0.00366	5,446	0,067597
1,529	77.44	26.12	0,861	100,00	66,71	0.00328	5,932	0,066501
1,499	84.29	25.88	0,813	100,00	68,57	0.00327	6,253	0,070255
1,467	92.83	27.64	0,761	100,00	70,61	0.00315	6,912	0,073836
1,441	100.38	26.78	0,719	100,00	72,21	0.00298	7,194	0,075865
1,409	111.36	26.78	0,667	100,00	74,24	0.00304	7,762	0,082677
1,384	120.95	28.21	0,627	100,00	75,79	0.00321	8,477	0,090474
1,362	130.80	29.38	0,590	100,00	77,20	0.00287	9,184	0,090711
1,304	163.33	30.44	0,495	100,00	80,87	0.00271	11,144	0,105103

4.2.2 Resultados correspondentes ao Solo 2

O Solo 2 é um silte com alta compressibilidade, coletado no km 73 da Rodovia Wilson Finardi (SP-191) entre os municípios de Araras e Ipeúna. A Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos no ensaio com a técnica TDR.

Tabela 4.3 – Resultados correspondentes ao Solo 2.

ρ (g/cm^3)	w (%)	K_a	ρ_d (g/cm^3)	S_r (%)	θ (%)	EC_b (S/m)	$\sqrt{K_a \rho_w / \rho_d}$	$\sqrt{EC_b \rho_w / \rho_d}$
1,259	7.37	2.56	1,172	15,43	8,64	0.00110	1,365	0,028319
1,247	18.63	3.18	1,051	32,32	19,58	0.00131	1,697	0,034464
1,220	27.69	3.52	0,955	41,23	26,45	0.00143	1,964	0,039534
1,199	30.69	6.13	0,918	42,95	28,16	0.00168	2,699	0,044697
1,273	42.63	7.74	0,892	57,19	38,04	0.00179	3,117	0,047361
1,493	52.08	12.35	0,982	80,98	51,14	0.00182	3,579	0,043401
1,520	65.42	16.99	0,919	91,78	60,13	0.00240	4,485	0,053327
1,466	79.06	19.48	0,819	93,45	64,74	0.00315	5,390	0,068539
1,444	95.29	22.83	0,739	97,47	71,75	0.00348	6,464	0,079853
1,402	115.43	23.09	0,651	99,44	75,47	0.00338	7,382	0,089278
1,395	120.59	24.74	0,632	100,00	76,27	0.00328	7,865	0,090525
1,360	136.24	25.05	0,575	100,00	78,41	0.00328	8,697	0,099517
1,325	154.68	26.38	0,520	100,00	80,48	0.00340	9,872	0,112108
1,302	169.60	26.53	0,483	100,00	81,88	0.00318	10,668	0,116801
1,284	182.10	26.88	0,455	100,00	82,92	0.00318	11,387	0,123771

4.2.3 Resultados correspondentes ao Solo 3

O Solo 3 é uma argila com alta compressibilidade, também coletada no km 73 da Rodovia Wilson Finardi (SP-191) entre os municípios de Araras e Ipeúna. A Tabela 4.4 mostra os resultados obtidos no ensaio com uso da técnica TDR.

Tabela 4.4 – Resultados correspondentes ao Solo 3.

ρ (g/cm ³)	W (%)	K _a	ρ_d (g/cm ³)	S _r (%)	θ (%)	EC _b (S/m)	$\sqrt{K_a \rho_w / \rho_d}$	$\sqrt{EC_b \rho_w / \rho_d}$
1,214	4.74	3.43	1,159	9,25	5,50	0.000682	1,597	0,022526
1,238	10.27	3.55	1,123	19,00	11,53	0.000728	1,679	0,024031
1,231	14.73	3.75	1,073	25,30	15,80	0.000856	1,806	0,027278
1,232	19.20	4.13	1,033	31,09	19,84	0.00094	1,968	0,029674
1,216	23.22	4.08	0,987	35,04	22,93	0.000888	2,046	0,030185
1,209	26.97	3.86	0,952	38,52	25,68	0.000884	2,062	0,031227
1,301	30.66	4.69	0,996	46,86	30,53	0.00108	2,176	0,033010
1,378	34.03	5.24	1,028	54,65	34,98	0.001208	2,228	0,033816
1,422	36.48	9.98	1,042	59,83	38,00	0.00216	3,032	0,044607
1,491	41.22	9.01	1,056	69,05	43,52	0.00204	2,843	0,042775
1,561	48.62	14.37	1,051	80,80	51,08	0.002458	3,608	0,047189
1,604	56.15	16.29	1,027	90,04	57,66	0.002544	3,930	0,049113
1,564	61.03	16.99	0,971	89,78	59,26	0.002746	4,245	0,053968
1,629	68.21	18.33	0,968	100,00	66,06	0.002706	4,421	0,053715
1,594	74.33	20.00	0,914	100,00	67,97	0.002878	4,892	0,058673
1,522	89.58	22.26	0,803	100,00	71,92	0.003022	5,877	0,068474
1,473	102.24	23.39	0,728	100,00	74,47	0.00289	6,640	0,073810
1,432	115.42	24.85	0,665	100,00	76,72	0.002656	7,498	0,077527

4.2.4 Resultados correspondentes ao Solo 4

O Solo 4 foi caracterizado como sendo uma areia argilosa, coletada na Chácara Recanto das Orquídeas, no município de Santa Eudóxia – SP. O material coletado possuía matéria orgânica, devido a isso foi seco em estufa com temperatura máxima de 60°C. A Tabela 4.5 mostra os resultados obtidos no ensaio com uso da técnica TDR.

Tabela 4.5 – Resultados correspondentes ao Solo 4.

ρ (g/cm ³)	W (%)	K _a	ρ_d (g/cm ³)	S _r (%)	θ (%)	EC _b (S/m)	$\sqrt{K_a \rho_w / \rho_d}$	$\sqrt{EC_b \rho_w / \rho_d}$
1,565	1.70	3.81	1,539	5,56	2,62	0.00072	1,269	0,05508
1,506	5.39	4.05	1,429	15,15	7,70	0.00077	1,409	0,06124
1,335	9.50	4.18	1,220	19,96	11,59	0.00079	1,675	0,07288
1,440	13.63	4.02	1,268	30,63	17,28	0.00083	1,582	0,07187
1,613	18.53	5.68	1,361	47,43	25,22	0.00184	1,751	0,09955
1,824	22.16	9.04	1,493	68,04	33,09	0.00288	2,013	0,11365
1,917	23.01	10.21	1,559	77,31	35,86	0.00321	2,050	0,11496
1,854	24.34	10.25	1,491	74,55	36,30	0.00312	2,146	0,11839
1,886	26.39	10.94	1,492	80,90	39,38	0.00305	2,216	0,11705
1,852	27.70	10.91	1,451	80,19	40,18	0.00298	2,278	0,11909
1,818	30.12	11.71	1,397	81,00	42,08	0.00294	2,449	0,12266
1,795	31.98	11.97	1,360	81,73	43,49	0.00300	2,544	0,12740
1,801	34.24	12.52	1,342	85,35	45,95	0.00292	2,636	0,12733
1,780	38.33	14.10	1,287	88,48	49,32	0.00289	2,918	0,13208
1,764	42.28	15.08	1,240	91,37	52,41	0.00281	3,133	0,13524
1,704	45.06	16.46	1,175	88,82	52,93	0.00276	3,453	0,14142
1,704	50.13	16.93	1,135	93,34	56,89	0.00294	3,625	0,15101
1,66	56.89	18.16	1,058	94,64	60,20	0.00366	4,027	0,18082
1,672	63.19	19.28	1,025	100,00	64,74	0.00272	4,286	0,16085
1,634	69.13	18.90	0,966	100,00	66,79	0.00265	4,500	0,16849
1,601	74.73	20.21	0,916	100,00	68,48	0.00263	4,906	0,17713
1,548	85.21	22.09	0,836	100,00	71,22	0.00243	5,623	0,18636

4.2.5 Resultados correspondentes ao Solo 5

O Solo 5 de acordo com a classificação unificada é uma argila com baixa plasticidade, coletada no Conjunto Habitacional Carlos Lacerda em Ribeirão Preto - SP. Na Tabela 4.6 estão os resultados obtidos através da técnica de reflectometria no domínio do tempo.

Tabela 4.6 – Resultados correspondentes ao Solo 5.

ρ (g/cm ³)	W (%)	K _a	ρ_d (g/cm ³)	S _r (%)	θ (%)	EC _b (S/m)	$\sqrt{K_a \rho_w / \rho_d}$	$\sqrt{EC_b \rho_w / \rho_d}$
1,343	2.39	2.65	1,312	5,46	3,14	0.00101	1,240	0,02421
1,311	9.83	3.27	1,193	19,12	11,73	0.00107	1,515	0,02736
1,308	14.25	3.86	1,145	25,95	16,32	0.00100	1,716	0,02767
1,422	19.54	3.57	1,128	46,39	29,44	0.00109	2,027	0,03616
1,59	26.11	5.22	1,205	63,03	38,41	0.00166	3,108	0,04880
1,706	34.29	17.62	1,271	74,06	43,57	0.00406	3,304	0,05017
1,74	39.66	24.48	1,282	78,00	45,60	0.00621	3,395	0,05303
1,836	45.44	22.61	1,262	97,07	57,36	0.00623	3,766	0,06251
1,727	53.90	23.73	1,122	95,04	60,48	0.00570	4,342	0,06730
1,673	65.53	24.52	1,011	98,47	66,22	0.00553	4,900	0,07360
1,647	72.08	25.08	0,957	100,00	68,98	0.00559	5,233	0,07813
1,581	83.86	24.64	0,860	100,00	72,13	0.00495	5,771	0,08178
1,498	103.36	26.60	0,737	100,00	76,13	0.00479	7,003	0,09398
1,449	118.19	28.25	0,664	100,00	78,48	0.00476	8,004	0,10386
1,404	135.04	27.97	0,597	100,00	80,65	0.00449	8,856	0,11222
1,364	153.46	29.03	0,538	100,00	82,57	0.00426	10,014	0,12137
1,347	162.59	28.74	0,513	100,00	83,38	0.00404	10,454	0,12391
1,319	179.65	29.47	0,472	100,00	84,72	0.00391	11,511	0,13267
1,296	196.25	31.06	0,437	100,00	85,83	0.00408	12,744	0,14598

4.2.6 Resultados correspondentes ao Solo 6

O Solo 6 é um silte arenoso com baixa plasticidade, oriundo de rejeito de mineração de ouro da cidade de Paracatu – MG. A Tabela 4.7 os resultados obtidos no ensaio com uso da técnica TDR.

Tabela 4.7 – Resultados correspondentes ao Solo 6.

ρ (g/cm ³)	W (%)	K _a	ρ_d (g/cm ³)	S _r (%)	θ (%)	EC _b (S/m)	$\sqrt{K_a \rho_w / \rho_d}$	$\sqrt{EC_b \rho_w / \rho_d}$
1,094	5,30	2,08	1,039	8,91	5,50	0,00110	1,386	0,031942
1,125	11,72	2,65	1,007	18,75	11,80	0,00131	1,616	0,035985
1,185	15,82	3,26	1,023	25,98	16,19	0,00143	1,766	0,036905
1,244	20,83	4,17	1,029	34,52	21,44	0,00168	1,984	0,039852
1,318	24,77	4,76	1,056	42,83	26,17	0,00179	2,064	0,040004
1,370	28,31	5,38	1,068	49,81	30,22	0,00182	2,173	0,039910
1,537	32,89	9,39	1,156	66,22	38,03	0,00240	2,650	0,042387
1,696	37,04	14,11	1,237	84,16	45,82	0,00315	3,036	0,045362
1,739	44,20	17,11	1,206	95,84	53,29	0,00348	3,430	0,048950
1,699	50,27	17,55	1,130	97,34	56,83	0,00338	3,706	0,051412
1,647	56,92	19,68	1,049	97,35	59,73	0,00328	4,227	0,054554
1,603	64,37	20,18	0,975	97,90	62,76	0,00328	4,607	0,058745
1,583	69,15	22,01	0,936	98,74	64,72	0,00340	5,013	0,062323
1,558	76,33	22,20	0,884	100,00	67,46	0,00318	5,332	0,063807
1,532	81,90	23,74	0,842	100,00	68,99	0,00318	5,784	0,066908
1,507	87,82	24,09	0,802	100,00	70,46	0,00330	6,118	0,071580
1,482	94,36	24,39	0,762	100,00	71,93	0,00307	6,478	0,072705
1,456	101,71	25,22	0,722	100,00	73,42	0,00312	6,957	0,077375
1,432	109,37	25,30	0,684	100,00	74,81	0,00314	7,353	0,081915
1,415	115,55	25,73	0,656	100,00	75,84	0,00320	7,728	0,086247

4.2.7 Resultados correspondentes ao Solo 7

O Solo 7 é uma areia argilosa, coletada no Campus I da Escola de Engenharia de São Carlos. A Tabela 4.8 mostra os resultados obtidos no ensaio com uso da técnica de reflectometria no domínio do tempo.

Tabela 4.8 - Resultados correspondentes ao Solo 7.

ρ (g/cm ³)	W (%)	K _a	ρ_d (g/cm ³)	S _r (%)	θ (%)	EC _b (S/m)	$\sqrt{K_a \rho_w / \rho_d}$	$\sqrt{EC_b \rho_w / \rho_d}$
1,398	10,65	5,00	1,264	25,33	13,46	0,00139	1,770	0,029507
1,425	13,16	6,03	1,259	31,10	16,58	0,00166	1,949	0,032390
1,822	16,50	7,74	1,564	61,41	25,80	0,00275	1,779	0,033529
1,989	18,86	9,73	1,673	83,11	31,56	0,00366	1,864	0,036182
1,997	20,69	10,73	1,655	88,61	34,24	0,00348	1,979	0,035670
1,928	24,29	12,90	1,551	88,69	37,68	0,00368	2,315	0,039097
1,904	26,01	13,10	1,511	89,39	39,30	0,00353	2,395	0,039317
1,879	28,76	14,47	1,460	91,49	41,98	0,00367	2,606	0,041518
1,848	34,47	14,34	1,374	96,58	47,37	0,00316	2,756	0,040878
1,817	39,92	16,56	1,299	100,00	51,62	0,00297	3,133	0,041968
1,765	45,17	18,14	1,216	100,00	54,81	0,00302	3,503	0,045229
1,718	50,60	19,23	1,141	100,00	57,71	0,00281	3,844	0,046437
1,650	59,63	20,41	1,034	100,00	61,66	0,00273	4,371	0,050550
1,612	65,68	21,17	0,973	100,00	63,92	0,00265	4,729	0,052870
1,577	71,93	22,15	0,917	100,00	65,99	0,00256	5,131	0,055162
1,551	77,08	23,08	0,876	100,00	67,52	0,00256	5,485	0,057811

4.2.8 Resultados correspondentes ao Solo 8

O Solo 8 é uma areia argilosa, coletada no Campus II da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP). Foram realizadas leituras com 3 sondas diferentes com diferentes comprimentos de cabo coaxial, com objetivo de analisar a precisão das sondas.

4.2.8.1 Resultados correspondentes à sonda 1

A sonda 1 possui um comprimento de cabo coaxial de 10 m. A Tabela 4.9 mostra os resultados do ensaio feito com uso da técnica TDR.

Tabela 4.9 – Resultados correspondentes ao Solo 8 – Sonda 1.

ρ (g/cm ³)	W (%)	K _a	ρ_d (g/cm ³)	S _r (%)	θ (%)	EC _b (S/m)	$\sqrt{K_a \rho_w / \rho_d}$	$\sqrt{EC_b \rho_w / \rho_d}$
1,346	12.80	2.35	1,193	27,54	15,28	0.00050	1,286	0,01866
1,510	17.95	3.79	1,280	43,95	22,97	0.00072	1,520	0,02102
1,834	21.82	9.56	1,505	74,91	32,85	0.00198	2,054	0,02957
1,849	30.52	14.04	1,417	91,68	43,23	0.00239	2,645	0,03452
1,708	29.87	11.02	1,316	77,15	39,29	0.00201	2,523	0,03405
1,793	37.09	15.48	1,308	94,70	48,51	0.00261	3,009	0,03904
1,771	37.35	14.33	1,290	92,80	48,17	0.00270	2,935	0,04028
1,753	44.30	16.75	1,215	98,39	53,81	0.00272	3,369	0,04295
1,740	46.38	16.47	1,189	99,04	55,13	0.00292	3,414	0,04543
1,616	64.48	19.70	0,982	100,00	63,35	0.00267	4,518	0,05259
1,626	62.84	20.13	0,999	100,00	62,75	0.00316	4,492	0,05633
1,535	79.97	20.64	0,853	100,00	68,19	0.00268	5,328	0,06075
1,532	80.65	21.20	0,848	100,00	68,38	0.00307	5,431	0,06533
1,438	105.76	23.51	0,699	100,00	73,93	0.00274	6,936	0,07486
1,403	118.35	23.97	0,642	100,00	76,04	0.00257	7,621	0,07891

4.2.8.2 Resultados correspondentes à sonda 2

A sonda 2 possui um comprimento de cabo coaxial de 21 m. A Tabela 4.10 mostra os resultados do ensaio feito com uso da técnica TDR.

Tabela 4.10 – Resultados correspondentes ao Solo 8 – Sonda 2.

ρ (g/cm ³)	W (%)	K _a	ρ_d (g/cm ³)	S _r (%)	θ (%)	EC _b (S/m)	$\sqrt{K_a \rho_w / \rho_d}$	$\sqrt{EC_b \rho_w / \rho_d}$
1,346	12.80	2.85	1,193	27,54	15,28	0.00107	1,413	0,02738
1,510	17.95	4.15	1,280	43,95	22,97	0.00132	1,591	0,02833
1,834	21.82	8.84	1,505	74,91	32,85	0.00195	1,975	0,02935
1,849	30.52	14.13	1,417	91,68	43,23	0.00260	2,654	0,03596
1,708	29.87	12.32	1,316	77,15	39,29	0.00222	2,669	0,03582
1,793	37.09	17.26	1,308	94,70	48,51	0.00288	3,177	0,04102
1,771	37.35	12.80	1,290	92,80	48,17	0.00294	2,774	0,04206
1,753	44.30	18.16	1,215	98,39	53,81	0.00286	3,508	0,04406
1,740	46.38	16.51	1,189	99,04	55,13	0.00302	3,418	0,04626
1,616	64.48	20.47	0,982	100,00	63,35	0.00292	4,605	0,05498
1,626	62.84	20.17	0,999	100,00	62,75	0.00333	4,498	0,05780
1,535	79.97	20.69	0,853	100,00	68,19	0.00287	5,333	0,06278
1,532	80.65	22.20	0,848	100,00	68,38	0.00333	5,558	0,06804
1,438	105.76	23.56	0,699	100,00	73,93	0.00307	6,944	0,07922
1,403	118.35	24.61	0,642	100,00	76,04	0.00284	7,721	0,08292

4.2.8.3 Resultados correspondentes à sonda 3

A sonda 3 possui um comprimento de cabo coaxial de 3 m. A Tabela 4.11 mostra os resultados do ensaio feito com uso da técnica TDR.

Tabela 4.11 – Resultados correspondentes ao Solo 8 – Sonda 3.

ρ (g/cm ³)	W (%)	K _a	ρ_d (g/cm ³)	S _r (%)	θ (%)	EC _b (S/m)	$\sqrt{K_a \rho_w / \rho_d}$	$\sqrt{EC_b \rho_w / \rho_d}$
1,834	21.82	11.13	1,505	74,91	32,85	0.00273	2,216	0,03472
1,849	30.52	13.08	1,417	91,68	43,23	0.00299	2,553	0,03857
1,708	29.87	12.02	1,316	77,15	39,29	0.00259	2,635	0,03869
1,793	37.09	13.75	1,308	94,70	48,51	0.00321	2,835	0,04331
1,771	37.35	14.37	1,290	92,80	48,17	0.00356	2,939	0,04628
1,753	44.30	15.96	1,215	98,39	53,81	0.00372	3,289	0,05018
1,740	46.38	16.08	1,189	99,04	55,13	0.00371	3,374	0,05121
1,616	64.48	19.80	0,982	100,00	63,35	0.00367	4,529	0,06166
1,626	62.84	19.69	0,999	100,00	62,75	0.00407	4,443	0,06387
1,535	79.97	20.04	0,853	100,00	68,19	0.00349	5,249	0,06932
1,532	80.65	20.50	0,848	100,00	68,38	0.00394	5,341	0,07400
1,438	105.76	22.76	0,699	100,00	73,93	0.00368	6,825	0,08683
1,403	118.35	23.24	0,642	100,00	76,04	0.00345	7,503	0,09137

4.2.9 Resultado Solo 9

O Solo 9 é uma areia argilosa, coletada no Bosque Paulistinha na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). A Tabela 4.12 mostra os resultados obtidos no ensaio com uso da técnica TDR.

Tabela 4.12 - Resultados correspondentes ao Solo 9.

ρ (g/cm ³)	W (%)	K _a	ρ_d (g/cm ³)	S _r (%)	θ (%)	EC _b (S/m)	$\sqrt{K_a \rho_w / \rho_d}$	$\sqrt{EC_b \rho_w / \rho_d}$
1,310	9,70	6,24	1,194	20,79	11,58	0,00095	2,092	0,025865
1,335	12,57	6,07	1,186	26,61	14,91	0,00093	2,077	0,025659
1,442	15,83	6,74	1,245	36,60	19,71	0,00094	2,085	0,024680
1,572	18,69	6,41	1,324	48,64	24,75	0,00093	1,912	0,022976
1,834	21,90	9,72	1,505	74,52	32,95	0,00120	2,072	0,023025
1,787	24,19	13,83	1,439	74,62	34,81	0,00126	2,584	0,024669
1,740	27,14	14,43	1,369	75,41	37,14	0,00154	2,776	0,028656
1,714	30,43	15,53	1,314	77,99	39,99	0,00137	2,999	0,028207
1,734	32,08	16,58	1,313	82,06	42,12	0,00150	3,102	0,029481
1,779	35,91	18,16	1,309	91,33	47,00	0,00140	3,255	0,028585
1,763	40,16	19,38	1,258	94,67	50,52	0,00146	3,500	0,030336
1,731	47,65	21,80	1,172	98,82	55,86	0,00140	3,983	0,031893

4.2.10 Resultado Solo 10

O Solo 9 é uma areia argilosa, coletada no Bosque Paulistinha na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). A Tabela 4.13 apresenta os resultados obtidos no ensaio com uso da técnica TDR.

Tabela 4.13 - Resultados correspondentes ao Solo 10.

ρ (g/cm ³)	W (%)	K _a	ρ_d (g/cm ³)	S _r (%)	θ (%)	EC _b (S/m)	$\sqrt{K_a \rho_w / \rho_d}$	$\sqrt{EC_b \rho_w / \rho_d}$
1,309	6,56	5,74	1,229	14,77	8,06	0,00093	1,950	0,024790
1,270	8,68	5,34	1,169	17,85	10,14	0,00102	1,978	0,027330
1,251	10,13	5,67	1,136	19,83	11,51	0,00090	2,097	0,026438
1,364	13,36	5,68	1,203	28,93	16,07	0,00102	1,981	0,026526
1,516	16,98	7,03	1,296	42,25	22,00	0,00117	2,046	0,026348
1,585	19,33	8,36	1,328	50,47	25,68	0,00115	2,177	0,025505
1,774	22,22	11,18	1,452	69,69	32,26	0,00135	2,303	0,025326
1,883	26,37	13,73	1,490	87,54	39,29	0,00131	2,488	0,024333
1,858	29,35	15,04	1,436	89,93	42,15	0,00138	2,700	0,025847
1,840	33,33	15,30	1,380	93,99	46,01	0,00153	2,834	0,028338
1,823	36,51	16,82	1,336	96,34	48,76	0,00156	3,071	0,029612
1,782	42,51	18,19	1,250	98,85	53,15	0,00159	3,410	0,031888
1,728	48,38	19,35	1,164	98,90	56,34	0,00157	3,777	0,033983
1,681	55,74	20,17	1,079	100,00	60,16	0,00158	4,161	0,036849
1,583	71,38	22,54	0,924	100,00	65,93	0,00170	5,141	0,044640
1,454	102,24	25,05	0,719	100,00	73,53	0,00160	6,959	0,055621

4.3 Efeito de Borda

Os resultados do ensaio de efeito de borda estão representados na Tabela 4.14 abaixo. O Recipiente 1 é de PVC com 202 mm de diâmetro e 285 mm de altura; o Recipiente 2 de plástico com 275 mm de diâmetro e 315 mm de altura e o Recipiente 3 metálico com 320 mm de diâmetro e 320 mm de altura.

Tabela 4.14 – Leituras de constante dielétrica para análise do efeito de borda.

	Recipiente 1	Recipiente 2	Recipiente 3
Leitura 1	34,75	34,73	35,02
Leitura 2	34,41	34,74	35,25
Leitura 3	34,52	34,42	34,36
Leitura 4	34,88	34,82	34,71
Leitura 5	35,02	34,74	35,04
Leitura 6	35,00	35,53	34,78
Leitura 7	35,79	35,57	34,41
Leitura 8	34,65	34,35	35,02
Leitura 9	35,41	34,63	35,00
Leitura 10	33,8	34,85	34,45
Leitura 11	34,57	35,44	34,98
Leitura 12	34,40	35,19	34,98
Leitura 13	34,39	34,60	34,86
Leitura 14	35,22	35,14	34,42
Leitura 15	34,55	35,01	34,63
Leitura 16	35,16	34,75	34,49
Leitura 17	34,91	33,97	34,72
Leitura 18	34,94	34,97	34,80
Leitura 19	35,18	35,11	35,03
Leitura 20	34,75	34,73	35,02
Média	34,80	34,86	34,77
Desvio Padrão	0,447	0,404	0,266

4.4 Ensaio de Campo

4.4.1 Primeira etapa

Não foi possível a determinação da constante dielétrica e da condutividade elétrica volumétrica dos solos na primeira etapa do ensaio de campo. Isso ocorreu devido ao excesso de ruídos no sistema.

Dentre as principais causas para o excesso de ruídos, podemos destacar:

- constante variação de temperatura no cabo;
- ruídos causados pelo sistema de cravação;
- interferência de aterramento das edificações próximas ao local do ensaio;
- problemas com os equipamento emissor de pulsos.

As Figuras 4.11 e 4.12 mostram a forma de onda obtida neste ensaio.

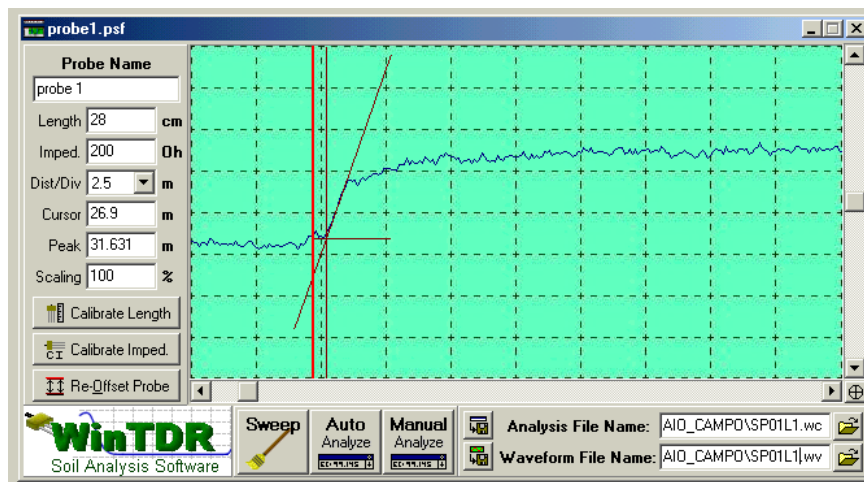


Figura 4.11 – Forma de onda obtida a 2,0 m de profundidade.

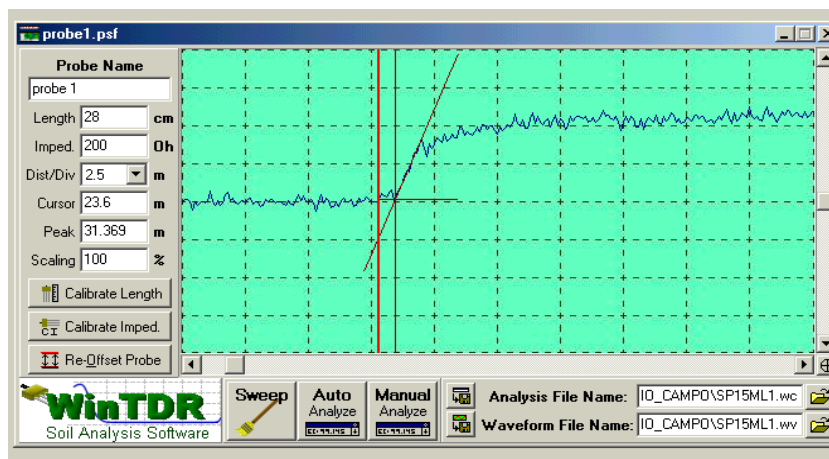


Figura 4.12 – Forma de onda obtida a 5,0 m de profundidade.

4.4.2 Segunda etapa

As Tabelas 4.15 e 4.16 mostram os valores de constante dielétrica, condutividade elétrica volumétrica e teor de umidade gravimétrico obtidos nos ensaios realizados em campo.

Tabela 4.15 - Resultados correspondentes ao Campus I e II da EESC-USP.

Campus I					Campus II				
Furo	Prof. (m)	w (%)	K_a	EC_b (Sm)	Furo	Prof. (m)	w (%)	K_a	EC_b (Sm)
1	1,60	16,93	8,43	0,02238	1	1,50	21,41	8,18	0,00175
	2,60	14,87	6,92	0,00239		2,00	21,57	7,64	0,00107
	3,10	15,83	8,32	0,00293		2,50	23,14	11,41	0,00139
	3,60	16,10	8,32	0,00293		3,00	28,27	13,15	0,00216
	4,20	15,80	7,17	0,00313		3,50	30,52	14,07	0,00319
	4,70	15,99	8,73	0,00320		4,00	-	-	-
	5,20	16,16	9,35	0,00339		4,50	-	-	-
2	1,50	13,82	4,99	0,00160	2	1,50	18,95	8,36	0,00166
	2,00	13,43	5,42	0,00159		2,00	19,82	7,52	0,00156
	2,50	12,40	5,52	0,00156		2,50	22,35	10,12	0,00212
	3,00	12,38	5,52	0,00156		3,00	25,88	12,51	0,00287
	3,50	11,82	4,78	0,00141		3,50	-	-	-
	4,00	11,87	5,32	0,00164		4,00	-	-	-
	4,50	11,75	6,70	0,00180		4,50	-	-	-
3	1,50	14,02	5,28	0,00188	3	1,50	20,76	7,71	0,00140
	2,00	14,18	6,82	0,00223		2,00	19,73	9,52	0,00154
	2,50	13,41	6,29	0,00159		2,50	20,39	9,87	0,00136
	3,00	14,25	6,29	0,00159		3,00	22,15	10,99	0,00143
	3,50	14,07	6,55	0,00148		3,50	22,02	11,67	0,00176
	4,00	15,49	8,58	0,00157		4,00	21,83	11,03	0,00152
	4,50	14,49	7,25	0,00155		4,50	22,43	12,05	0,00282
4	1,50	12,80	5,19	0,00144	4	1,50	21,41	9,26	0,00180
	2,00	13,71	6,30	0,00144		2,00	21,59	10,34	0,00149
	2,50	13,92	6,51	0,00140		2,50	22,13	11,10	0,00185
	3,00	13,73	5,97	0,00138		3,00	23,06	10,58	0,00200
	3,50	14,41	7,75	0,00152		3,50	23,37	11,00	0,00268
	4,00	15,07	8,71	0,00169		4,00	23,46	11,67	0,00290
	4,50	15,49	8,57	0,00168		4,50	22,91	12,31	0,00319

Tabela 4.16 - Resultados correspondentes à UFSCar.

<i>Bosque Paulistinha</i>					<i>DECiv</i>				
Furo	Prof. (m)	w (%)	K_a	EC_b (Sm)	Furo	Prof. (m)	w (%)	K_a	EC_b (Sm)
1	1.50	19,14	6,58	0,00119	1	1.50	20,58	9,15	0,00188
	2.00	19,88	8,97	0,00134		2.00	19,32	9,69	0,00163
	2.50	20,43	6,93	0,00121		2.50	19,26	9,12	0,00178
	3.00	21,60	9,49	0,00144		3.00	20,29	8,83	0,00164
	3.50	21,09	10,96	0,00146		3.50	19,68	8,53	0,00137
	4.00	20,75	9,85	0,00169		4.00	-	-	-
	4.50	20,68	12,00	0,00168		4.50	-	-	-
2	1.50	16,32	5,18	0,00112	2	1.50	23,40	11,56	0,00177
	2.00	17,64	7,04	0,00092		2.00	24,31	10,51	0,00210
	2.50	18,85	9,86	0,00144		2.50	23,60	11,45	0,00196
	3.00	20,22	10,57	0,00140		3.00	22,86	9,23	0,00186
	3.50	20,49	9,71	0,00127		3.50	20,12	9,70	0,00177
	4.00	19,63	11,52	0,00148		4.00	-	-	-
	4.50	20,18	11,62	0,00152		4.50	-	-	-
3	1.50	16,59	4,59	0,00116	3	1.50	22,29	9,50	0,00183
	2.00	17,23	5,63	0,00116		2.00	22,55	11,36	0,00199
	2.50	19,52	10,08	0,00137		2.50	22,22	9,41	0,00220
	3.00	20,94	8,37	0,00128		3.00	20,33	8,88	0,00269
	3.50	20,14	9,29	0,00133		3.50	21,06	10,32	0,00176
	4.00	19,86	7,85	0,00127		4.00	20,55	9,73	0,00145
	4.50	20,04	11,19	0,00150		4.50	20,07	10,44	0,00165
4	1.50	16,90	4,99	0,00114	4	1.50	21,90	6,58	0,00119
	2.00	16,51	6,74	0,00134		2.00	22,92	8,97	0,00134
	2.50	20,36	9,93	0,00165		2.50	18,89	6,93	0,00121
	3.00	20,15	10,53	0,00150		3.00	20,72	9,49	0,00144
	3.50	18,90	9,45	0,00143		3.50	20,62	10,96	0,00146
	4.00	18,54	10,21	0,00139		4.00	21,56	9,85	0,00169
	4.50	-	-	-		4.50	19,06	12,00	0,00168

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Análise do Ensaio de Efeito de Borda

De acordo com os resultados do ensaio de efeito de borda (Tabela 4.23), nota-se que a distância da borda e o tipo de material que é fabricado o recipiente também não altera os valores de constante dielétrica do solo a ser obtido com a sonda.. A Figura 5.1 mostra as leituras de constante dielétrica realizadas para cada recipiente e as médias de cada recipiente.

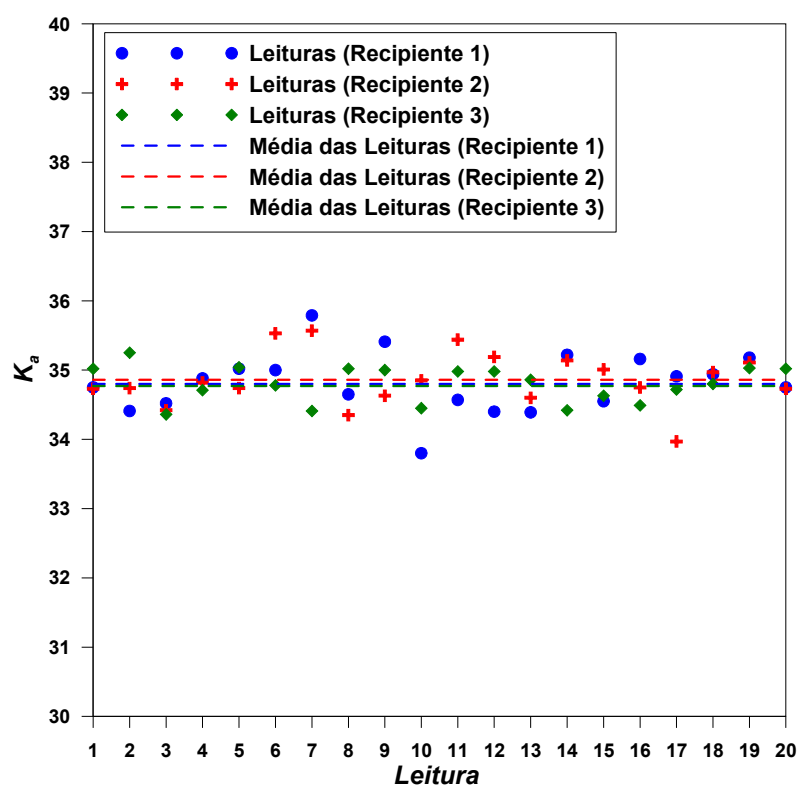


Figura 5.1 – Comparação entre as constantes dielétricas determinadas em diferentes recipientes.

No ensaio foi encontrada uma variação máxima entre as médias das leituras de aproximadamente 0,26%. Com isso pode-se afirmar que o campo de ação da técnica é restrita ao solo em contato com a sonda, necessitando de cuidados especiais durante a inserção da sonda no solo.

5.2 Análise do Comprimento do Cabo Coaxial

Para o Solo 8 foram realizados ensaios de laboratório com 3 sondas de diferentes comprimentos de cabo coaxial. O objetivo foi averiguar a influência do comprimento do cabo nos resultados dos ensaios. Apesar dos cabos mais longos causarem certa atenuação no sinal, os *traces* ainda continuam bem definidos, conforme mostrado na Figura 5.2. Os *traces* mostrados nesta figura correspondem ao Solo 8 com teor de umidade gravimétrico (w) e teor de umidade volumétrica (θ) igual a 62,8%.

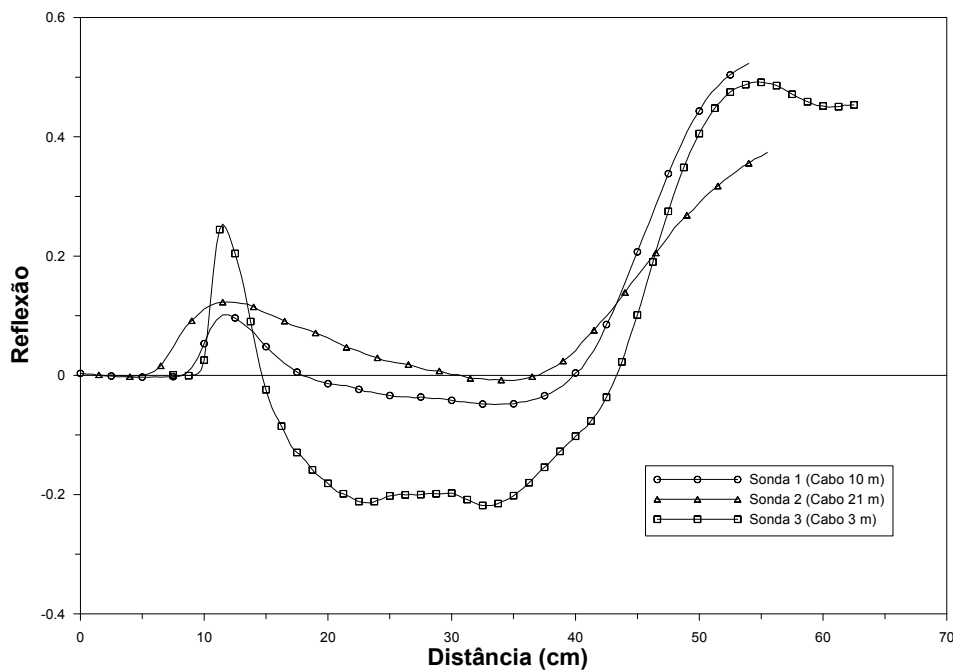


Figura 5.2 – Comparação entre os traces obtidos com diferentes sondas com diferentes comprimentos de cabo (Solo 8, com $w = 62.8\%$).

O ensaio mostrou que a constante dielétrica não sofre uma alteração significativa ao aumentar o comprimento do cabo coaxial, porém o valor da condutividade elétrica volumétrica varia significativamente com o comprimento do cabo, quanto maior o comprimento menor será o valor da condutividade elétrica volumétrica.

5.3 Análise das Correlações Alternativas

Em busca de resultados satisfatórios na utilização da técnica TDR foram pesquisadas algumas correlações alternativas, sendo estas w versus $\sqrt{K_a}$, w versus K_a e θ versus K_a . A Figura 5.3 apresenta o gráfico w versus $\sqrt{K_a}$. Para determinação das correlações dos solos 1 a 10 foram utilizados os gráficos apresentados no ANEXO A. Através de regressão pelo método dos mínimos quadrados, as funções matemáticas que melhor se adequaram à estas correlações foram polinômios do 3º grau (Equação 20).

$$w(\%) = a \cdot \sqrt{K_a}^3 + b \cdot \sqrt{K_a}^2 + c \cdot \sqrt{K_a} + d \quad (20)$$

A Tabela 5.1 mostra os valores das constantes das correlações entre w e $\sqrt{K_a}$ para os solos 1 a 10. A Tabela 5.2 mostra os valores de erro padrão obtidos na estimativa dos teores de umidade gravimétrico de cada solo. A Figura 5.4 mostra uma comparação entre teor de umidade gravimétrico (w) e teor de umidade gravimétrico estimado (w_{TDR}).

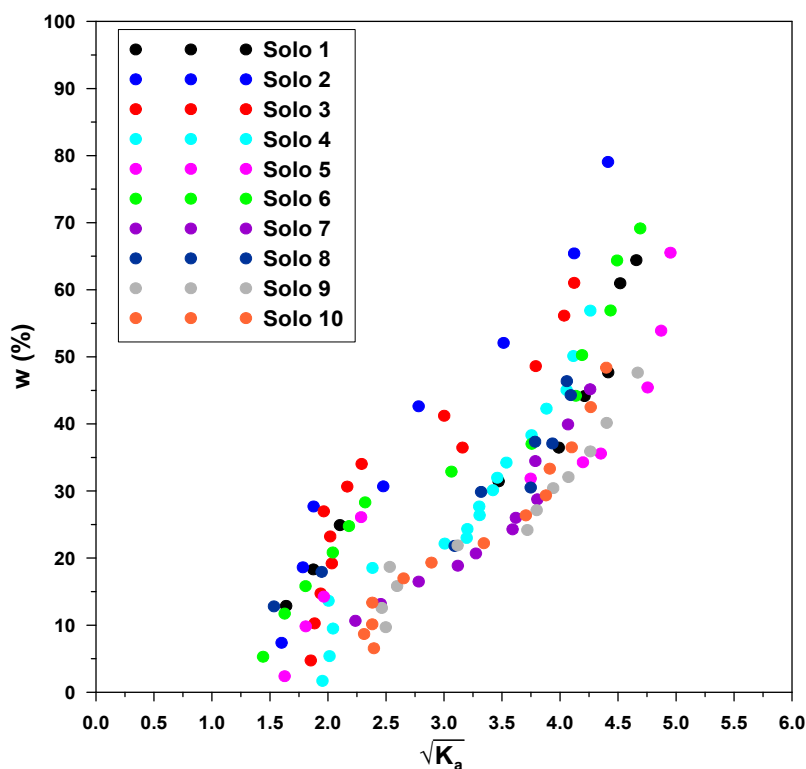


Figura 5.3 – Gráfico de w versus $\sqrt{K_a}$.

Tabela 5.1 – Constantes obtidas para as correlações w versus $\sqrt{K_a}$.

Solo	a	b	c	d
1	7,423	-66,179	196,621	165,198
2	6,17	-55,089	176	-155,34
3	22,817	-208,39	628,45	-585,415
4	7,177	-61,732	188,22	-179,3
5	7,497	-73,949	240,36	-226,94
6	5,691	-50,11	152,16	-127,8
7	4,327	-34,371	99,25	-87,517
8	4,809	-36,485	95,824	-65,757
9	5,693	-56,24	192,995	-206,206
10	9,679	-92,376	301,812	-315,305

Tabela 5.2 – Erros padrão encontrados para as estimativa de teor de umidade gravimétrico.

Solo	Erro Padrão w (%)
1	2,34
2	3,75
3	3,56
4	2,64
5	2,88
6	1,93
7	1,73
8	2,63
9	2,11
10	1,77

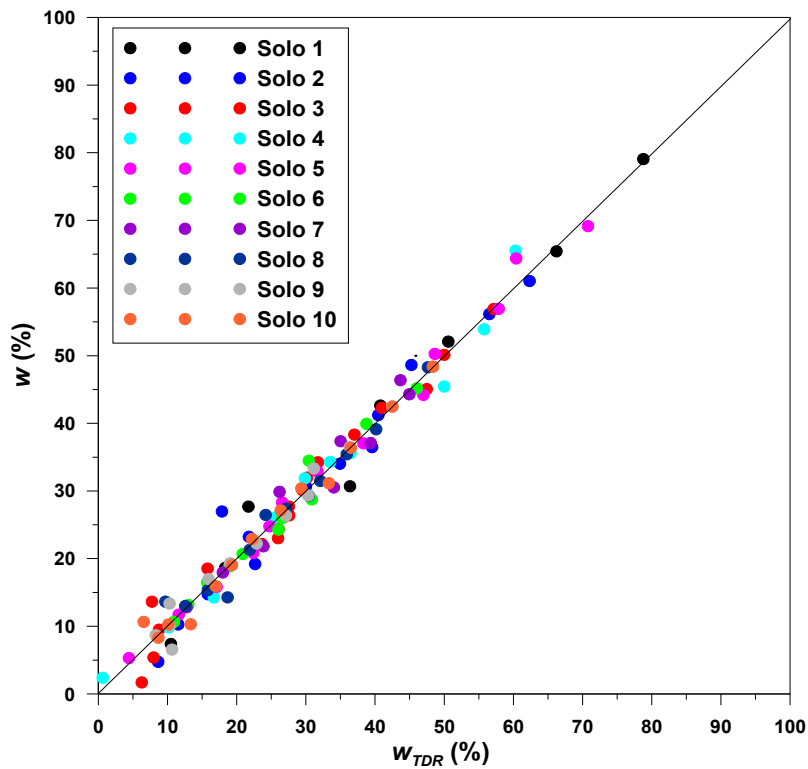


Figura 5.4 – Comparação entre teor de umidade gravimétrico e teor de umidade gravimétrico estimado dos solos

A Figura 5.5 mostra o gráfico de w versus K_a . No ANEXO B estão apresentadas as correlações entre w e K_a dos solos 1 a 10 separadamente. Assim como encontrado nas correlações entre w e $\sqrt{K_a}$ também foram encontrados através de regressão, funções matemáticas polinomiais do 3º grau conforme apresentado na Equação 21.

$$w(\%) = a \cdot K_a^3 + b \cdot K_a^2 + c \cdot K_a + d \quad (21)$$

A tabela 5.3 mostra os valores das constantes das correlações entre w e K_a para os solos 1 a 10 e a Tabela 5.4 mostra os valores de erro padrão das estimativas dos teores de umidade gravimétrico. A Figura 5.6 mostra uma comparação entre teor de umidade gravimétrico (w) e teor de umidade gravimétrico estimado (w_{TDR}).

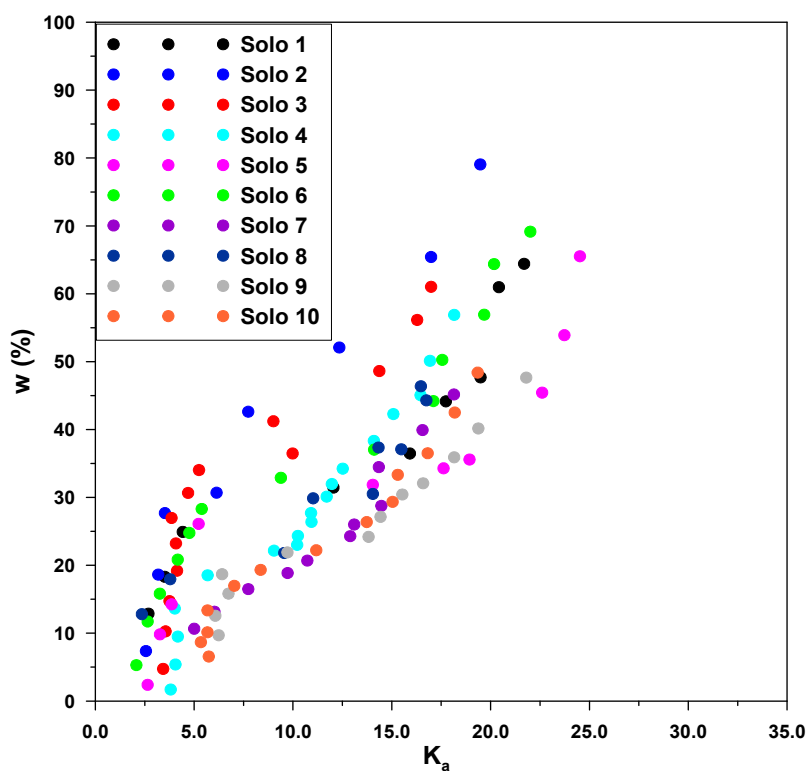


Figura 5.5 – Gráfico de w versus K_a para o Solo 1.

Tabela 5.3 – Constantes obtidas para as correlações w versus K_a .

Solo	a	b	c	d
1	0,0256	-0,8540	9,847	-6,552
2	0,0270	-0,9680	13,140	15,200
3	0,1070	-3,3620	34,065	-69,720
4	0,0176	-0,5010	7,185	-13,872
5	0,0320	-1,3400	17,297	-33,872
6	0,0234	-0,8230	10,534	-10,855
7	0,0067	-0,0996	1,944	3,224
8	0,0166	-0,4000	4,349	5,201
9	0,0102	-0,3610	5,700	-10,134
10	0,0274	-0,9380	12,163	-33,488

Tabela 5.4 – Erros padrão encontrados para as estimativa de teor de umidade gravimétrico.

Solo	Erro Padrão w (%)
1	2,59
2	5,25
3	4,71
4	2,83
5	4,54
6	2,65
7	1,78
8	2,78
9	2,22
10	1,89

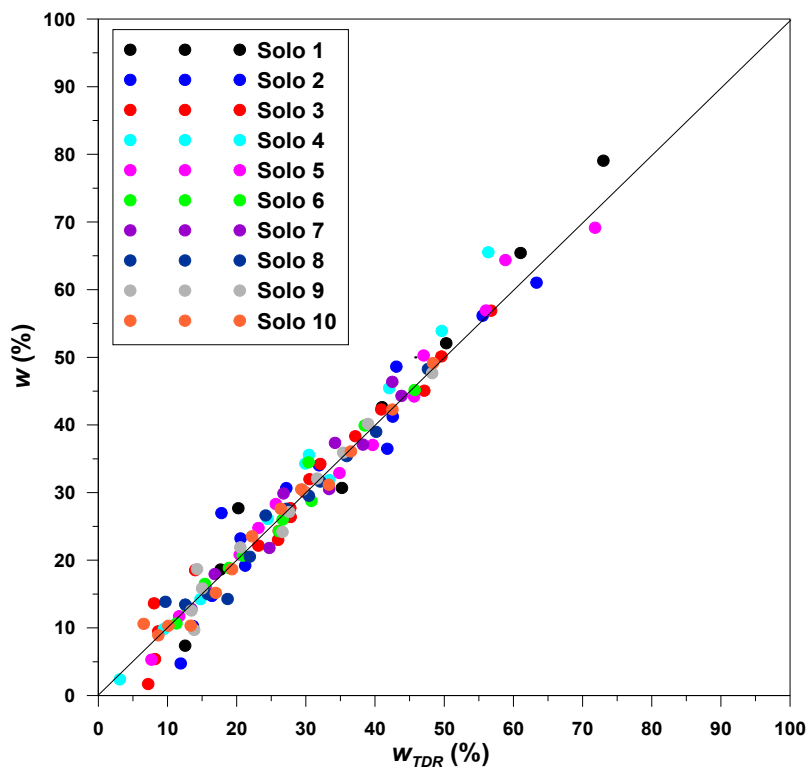


Figura 5.6 – Comparação entre teor de umidade gravimétrico e teor de umidade gravimétrico estimado dos solos

Outra correlação analisada neste trabalho é a que envolve o teor de umidade volumétrico (θ) e a constante dielétrica aparente (K_a). A Figura 5.7 mostra o gráfico de teor de umidade volumétrico (θ) versus constante dielétrica aparente (K_a).

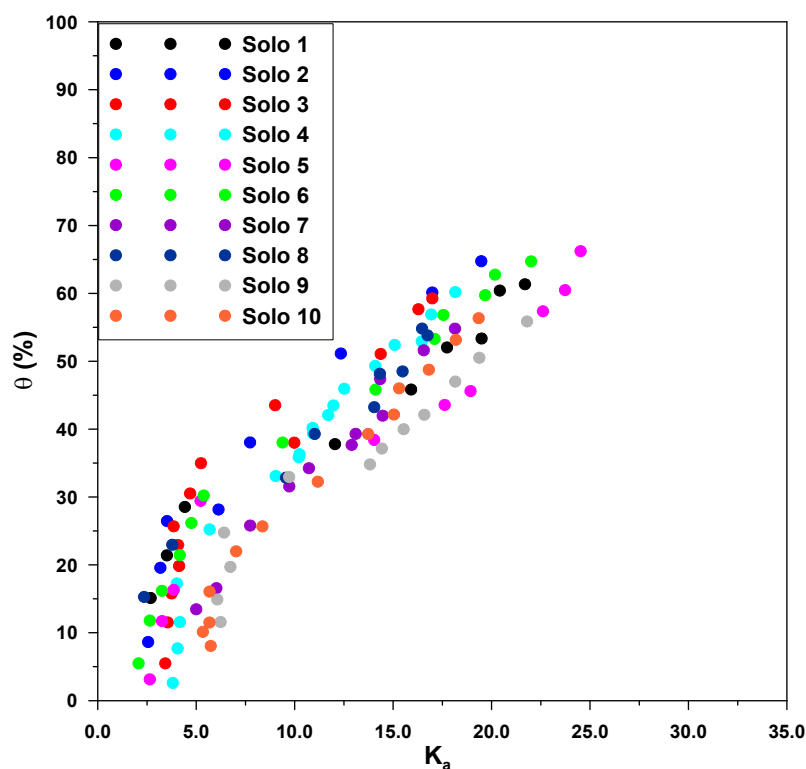


Figura 5.7 – Gráfico de θ versus K_a .

Analisando as correlações apresentadas no ANEXO C, através de regressão encontra-se uma função polinomial do 3º grau, apresentada na Equação 22, para a correlação entre o teor de umidade volumétrico (θ) e a constante dielétrica aparente (K_a). A Tabela 5.5 mostra os valores das constantes obtidas para a correlação entre θ e K_a .

$$\theta(\%) = a \cdot K_a^3 + b \cdot K_a^2 + c \cdot K_a + d \quad (22)$$

A Tabela 5.6 apresenta os valores do erro padrão de estimativa de cada solo. A Figura 5.8 mostra uma comparação entre os valores de teor de umidade volumétrico (θ) e teor de umidade volumétrico estimado (θ_{TDR}).

Tabela 5.5 – Constantes obtidas para as correlações θ versus K_a .

Solo	a	b	c	d
1	0,0127	-0,468	6,993	1,969
2	0,0071	-0,345	7,509	-2,837
3	0,0930	-2,987	31,341	63,598
4	0,0176	-0,687	11,423	-25,601
5	0,0252	-1,080	15,190	-27,619
6	0,0140	-0,589	9,680	-9,868
7	0,0122	-0,469	8,652	-19,959
8	0,0170	-0,476	6,260	3,798
9	0,0187	-0,798	12,810	-36,143
10	0,0192	-0,744	12,753	-38,641

Tabela 5.6 – Erros padrão encontrados para as estimativa de teor de umidade volumétrico.

Solo	Erro Padrão θ (%)
1	2,52
2	3,99
3	4,46
4	2,99
5	2,41
6	2,13
7	1,82
8	1,81
9	3,29
10	6,86

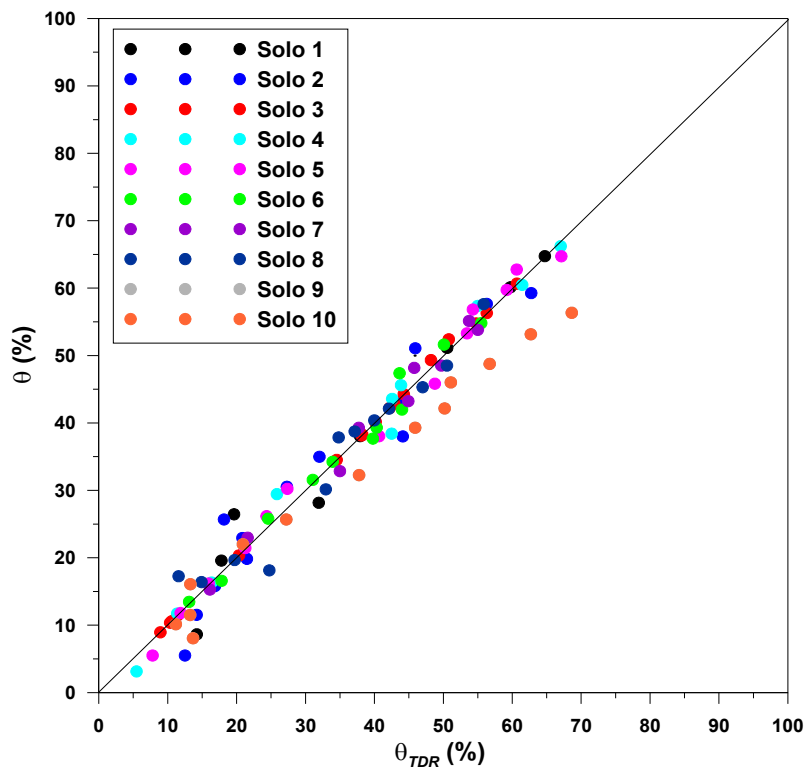


Figura 5.8 – Comparação entre teor de umidade volumétrico e teor de umidade volumétrico estimado dos solos

5.4 Análise das Correlações Propostas por Yu e Drnevich

Na calibração proposta por Yu e Drnevich (2004) é necessário determinar através de um regressão linear, as constantes a e b da correlação entre o teor de umidade gravimétrico (w) e $\sqrt{K_a}(\rho_w/\rho_d)$, conforme mostra na Equação 12. Da mesma forma são determinados os parâmetros c e d (Equação 13) da correlação entre o teor de umidade gravimétrico (w) e $\sqrt{EC_b}(\rho_w/\rho_d)$. Através das Equações 14 e 15, torna-se possível a determinação do teor de umidade gravimétrica e da massa específica seca dos solos.

$$\sqrt{K_a} \frac{\rho_w}{\rho_d} = a + b \cdot w \quad (12 \text{ bis})$$

$$\sqrt{EC_b} \frac{\rho_w}{\rho_d} = c + d \cdot w \quad (13 \text{ bis})$$

$$\rho_d = \frac{d\sqrt{K_a} - b\sqrt{EC_b}}{ad - cb} \rho_w \quad (14 \text{ bis})$$

$$w = \frac{c\sqrt{K_a} - a\sqrt{EC_b}}{b\sqrt{EC_b} - d\sqrt{K_a}} \quad (15 \text{ bis})$$

As Figuras 5.9 e 5.10 apresentam os gráficos de $\sqrt{K_a}(\rho_w/\rho_d)$ versus w e $\sqrt{EC_b}(\rho_w/\rho_d)$ versus w , respectivamente. No ANEXO D estão apresentados gráficos de correlação para a determinação das constantes de calibração a , b , c e d . Nestas figuras estão plotados os teores de umidade com grau de saturação inferior a 100%, pelo fato de que os ensaios de campo foram realizados em condição não saturada.

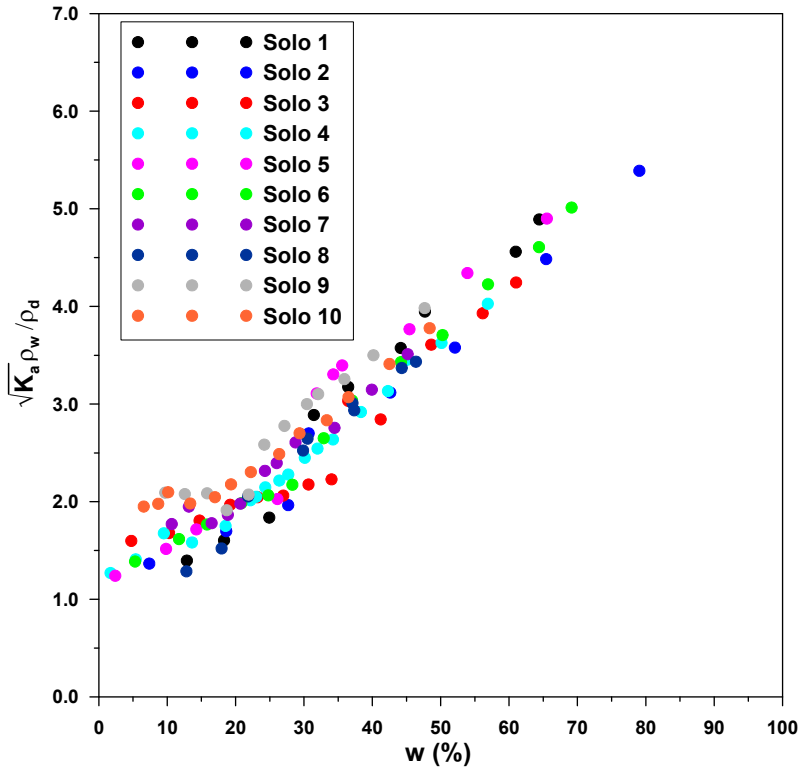


Figura 5.9 – Gráfico de $\sqrt{K_a(\rho_w/\rho_d)}$ versus w .

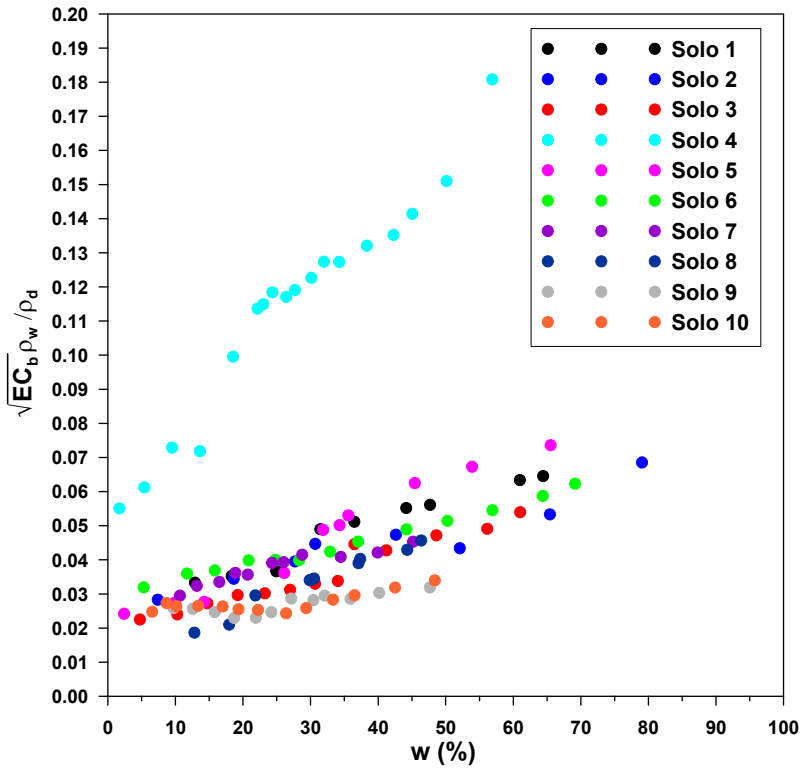


Figura 5.10 – Gráfico de $\sqrt{EC_b(\rho_w/\rho_d)}$ versus w .

No entanto, observando-se as Figuras 5.9 e 5.10 verifica-se que em alguns casos, os pontos correspondentes aos teores de umidade gravimétricos inferiores a 30%, apresentam uma tendência diferente daquela para os pontos correspondentes a teores de umidade gravimétricos superiores a 30%. Os prováveis fatores que podem causar esta diferença de tendência são:

- Deficiência na compactação, pois para alguns destes pontos os teores de umidade estão acima do teor de umidade ótimo, podendo ocasionar a formação de grumos. Quando compactados esses grumos tendem a formar macroporos que podem afetar as medidas da constante dielétrica. Vieira *et al.* (2005) também encontraram tal problema em seus trabalhos.
- Outro fator que pode estar relacionado a este problema foi constatado por Dobson *et al.* (1985) que relatam a dependência da constante dielétrica em relação à textura do solo. Isso é presumível devido à interação entre as fases sólidas e líquidas, pois a constante dielétrica depende da porosidade, das características do fluido intersticial e da superfície específica do solo.

Na Figura 5.10 nota-se que o solo 4 apresenta tendência diferente dos demais solos, apresentando valores de condutividade elétrica volumétrica mais elevados.

De acordo com Rhoades *et al.* (1976), a condutividade elétrica volumétrica do solo é uma resultante da condutividade elétrica da fase líquida do solo que ocupa os poros do mesmo e da condutividade elétrica referente aos cátions trocáveis situados na interface sólido-líquido. Como o solo 4 possui matéria orgânica, a parcela da condutividade elétrica referente aos cátions trocáveis é maior que nos demais solos. Por isso esse solo apresenta valores mais elevados de condutividade elétrica volumétrica.

A tabela 5.7 mostra os resultados das determinações das constantes das correlações. A Tabela 5.8 mostra os erros padrões de teor de umidade gravimétrico estimado (w_{TDR}) e massa específica seca estimada (ρ_{dTDR}). A Figura 5.11 e 5.12 mostram as comparações entre valores

de teor de umidade gravimétrico determinado pelo método da estufa (w) e estimado (w_{TDR}), e valores de massa específica seca (ρ_d) e a massa específica seca estimada através da técnica TDR (ρ_{dTDR}), respectivamente..

Tabela 5.7 – Constantes obtidas através da correlação proposta por Yu & Drnevich (2004).

Solo	a	b	c	d
1	0,43385	0,07023	0,02495	0,0006448
2	0,70889	0,05755	0,02556	0,0004795
3	1,00972	0,04933	0,01811	0,0005742
4	0,97936	0,05095	0,05682	0,0020721
5	0,9459	0,0622	0,01905	0,000878
6	0,80978	0,05877	0,02916	0,0004130
7	1,0581	0,05182	0,0273	0,000413
8	0,5106	0,0653	0,00946	0,0007923
9	1,2183	0,05633	0,0215	0,0002081
10	1,4717	0,04359	0,00234	0,0001657

Tabela 5.8 – Erros padrão encontrados para as estimativa de teor de umidade gravimétrico e massa específica seca.

Solo	Erro Padrão w (%)	Erro Padrão ρ_d (g/cm^3)
1	3,37	0,066
2	15,19	0,194
3	29,87	0,346
4	89,25	0,948
5	19,52	0,415
6	3,57	0,046
7	6,94	0,152
8	15,70	0,429
9	2,99	0,093
10	4,69	0,119

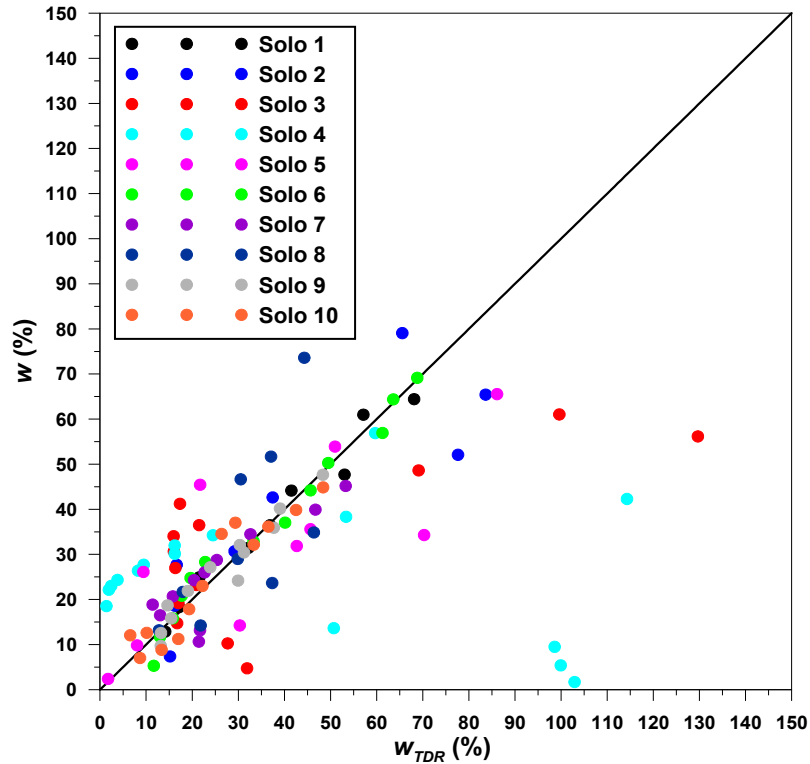


Figura 5.11 – Comparação entre teor de umidade gravimétrico e teor de umidade gravimétrico estimado dos solos.

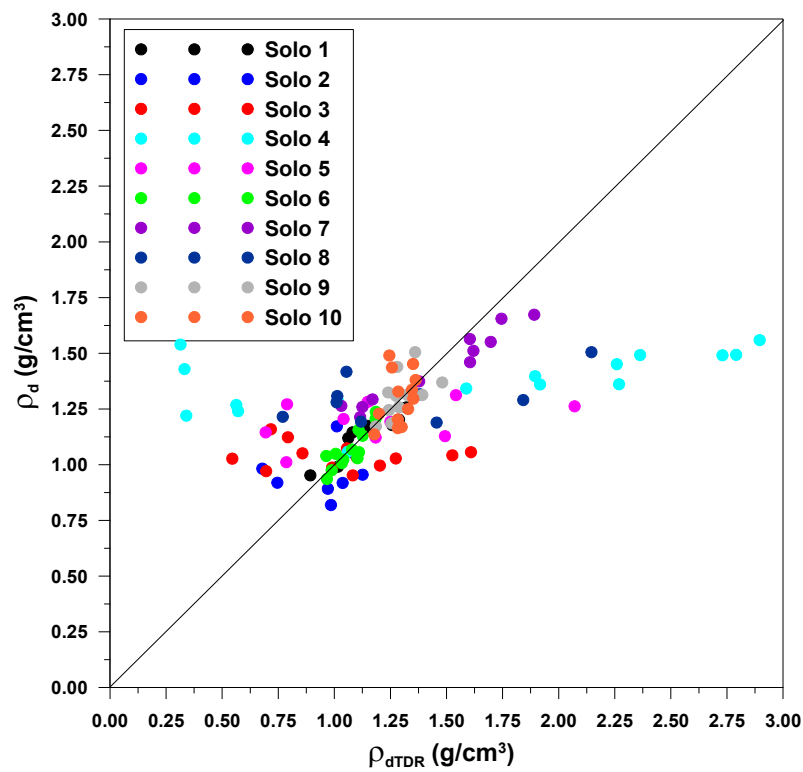


Figura 5.12 – Comparação entre massa específica seca e massa específica seca estimada dos solos.

Através da análise das tabelas e dos gráficos de comparação tanto do teor de umidade quanto massa específica seca, apresentados anteriormente, nota-se que os valores dos teores de umidade gravimétricos estimados (w_{TDR}), utilizando o método de Yu e Drnevich são menos satisfatórios do que aqueles estimados através das correlações alternativas. Para a viabilização do uso da sonda TDR helicoidal em conjunto com a metodologia proposta por Yu e Drnevich (2004), seria necessário readequar o modelo matemático proposto.

Devido à diferença de tendência entre os pontos inferiores e superiores a 30% de teor de umidade, foi proposta uma correlação que engloba os teores de umidade gravimétricos superiores a 30%. Além dos teores de umidade gravimétricos em condições não saturadas acima de 30%, também são plotados nos gráficos os teores de umidade gravimétricos na condição saturada. Uma das aplicações para esta correlação seria sua utilização em barragens de rejeito, para avaliar o grau de adensamento do rejeito.

Nesta análise são utilizados os solos 1 a 6, pois estes solos apresentam uma maior quantidade de pontos na fase saturada, tornando-se de certa forma mais representativo. As Figuras 5.13 e 5.14 apresentam os gráficos $\sqrt{K_a}(\rho_w/\rho_d)$ versus w e $\sqrt{EC_b}(\rho_w/\rho_d)$ versus w para os Solos 1 a 10. As correlações do modelo proposto por Yu e Drnevich referente aos Solos 1 a 6 estão apresentados no ANEXO E.

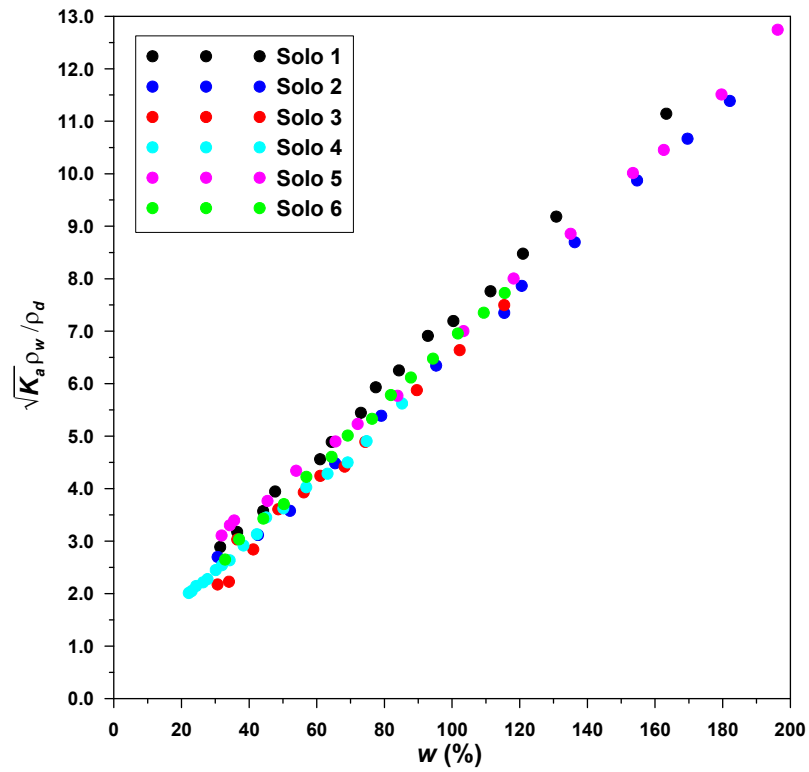


Figura 5.13 – Gráfico de $\sqrt{K_a(\rho_w/\rho_d)}$ versus w .

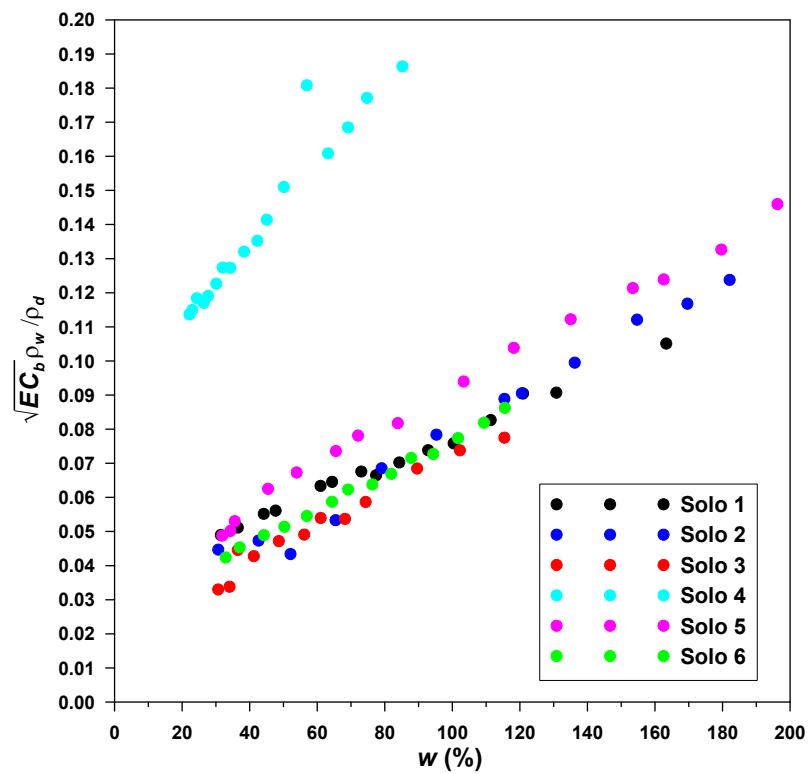


Figura 5.14 – Gráfico de $\sqrt{EC_b(\rho_w/\rho_d)}$ versus w .

A tabela 5.9 mostra os resultados das determinações das constantes das correlações propostas por Yu e Drnevich (2004). Os erros padrões das estimativas do teor de umidade gravimétrico e da massa específica seca são apresentados na Tabela 5.10.

Tabela 5.9 – Constantes obtidas através da correlação proposta por Yu & Drnevich (2004).

Solo	a	b	c	d
1	0,87580	0,06309	0,03596	0,0004220
2	0,68232	0,05890	0,02160	0,0005692
3	0,43862	0,06085	0,02071	0,0005120
4	0,76178	0,05619	0,08702	0,0012278
5	1,18988	0,05748	0,03463	0,0005640
6	0,071336	0,06109	0,02583	0,0005114

Tabela 5.10 – Erros padrão encontrados para as estimativa de teor de umidade gravimétrico e massa específica seca.

Solo	Erro Padrão w (%)	Erro Padrão ρ_d (g/cm^3)
1	8,34	0,06
2	21,60	0,19
3	8,80	0,10
4	6,96	0,12
5	16,17	0,15
6	5,12	0,04

As Figuras 5.15 e 5.16 mostram os gráficos de comparação entre os valores de teor de umidade gravimétrico (w) e teor de umidade estimado através da técnica TDR (w_{TDR}), e as comparações entre a massa específica seca (ρ_d) e a massa específica seca estimada através da reflectometria no domínio do tempo (ρ_{dTDR}), respectivamente.

Nota-se que na condição saturada, assim como na condição não saturada, a análise da correlação proposta por Yu e Drnevich (2004) não apresentou resultados satisfatórios, demonstrando um alto erro padrão quando comparados às outras correlações. No entanto com a readequação do modelo matemático esta metodologia seria vantajosa no estudo da deformabilidade dos solos saturados.

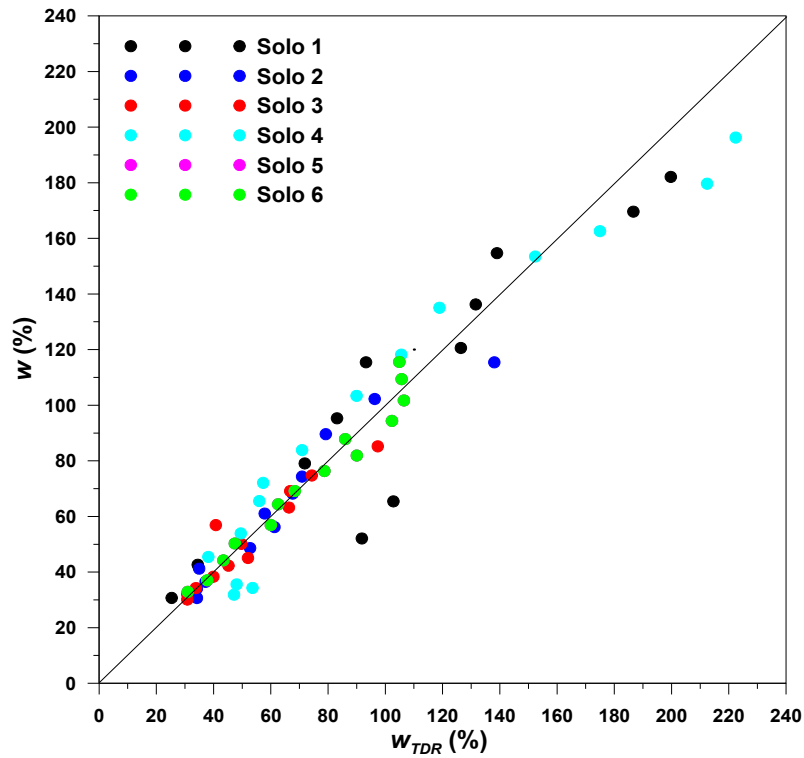


Figura 5.15 – Comparação entre teor de umidade gravimétrico e teor de umidade gravimétrico estimado dos solos.

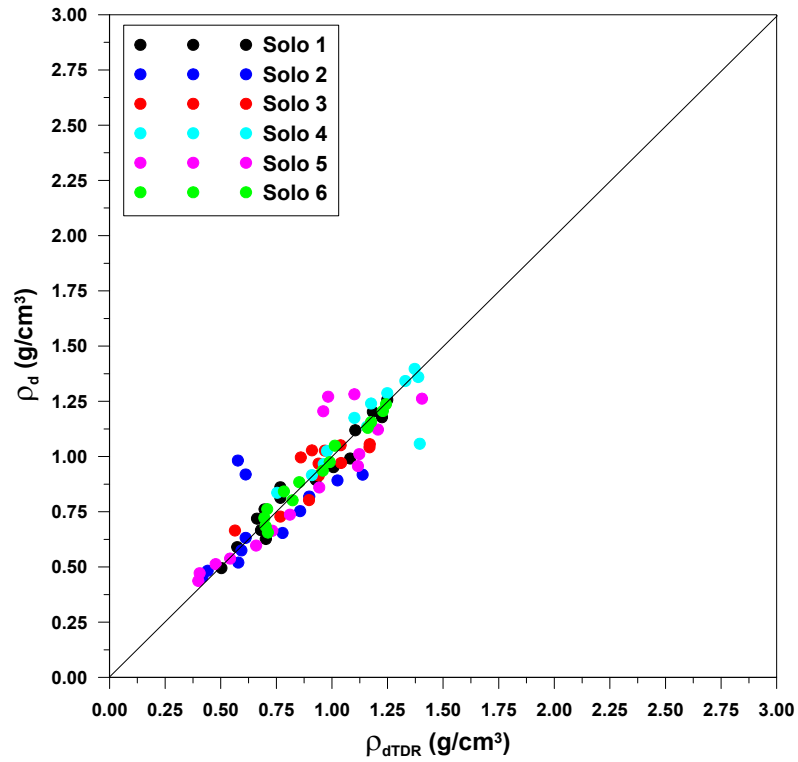


Figura 5.16 – Comparação entre massa específica seca e massa específica seca estimada dos solos.

5.5 Análise dos Resultados de Campo

Os ensaios de campo tiveram como finalidade a validação das calibrações executadas em laboratório e também a avaliação do desempenho da sonda TDR helicoidal.

A partir dos resultados dos ensaios realizados em campo, os teores de umidade foram estimados com o auxílio das calibrações realizadas em laboratório. Estes valores de teor de umidade são então comparados com os teores de umidade reais, determinados a partir das amostras coletadas. Nesta análise, as estimativas foram feitas utilizando a correlação entre w e $\sqrt{K_a}$, pelo fato desta ter apresentado melhores resultados quando comparadas às estimativas de laboratório. Diante da dificuldade de se determinar as massas específicas naturais e secas no campo, não houve comparação com os valores estimados. Pelo mesmo motivo, não foi possível estabelecer comparações entre teores de umidade volumétricos.

Vale ressaltar que a calibração utilizada refere-se aos solos 7, 8, 9 e 10 que representam respectivamente os ensaios de campo realizados no Campus I e II da Escola de Engenharia de São Carlos, no Bosque Paulistinha e próximo ao Departamento de Engenharia Civil (DECiv) na Universidade Federal de São Carlos. Outro ponto a destacar é que os ensaios foram realizados com o solo na condição não saturada, por isso a calibração utilizada refere-se à mesma condição.

As Tabelas 5.11 a 5.14 mostram os valores de teor de umidade gravimétrico de campo (w) e os valores de teor de umidade estimados (w_{TDR}) por meio das calibrações. As Figuras 5.17 a 5.32 mostram perfis de teores de umidade gravimétricos e teores de umidade estimados para o ensaio de campo.

Tabela 5.11 – Resultados correspondentes ao Campus I da EESC-USP.

Furo	Prof. (m)	w (%)	K_a	w_{TDR} (%)	$(w - w_{TDR})$
1	1,60	16,93	8,43	16,82	0,12
	2,60	14,87	6,92	14,48	0,39
	3,10	15,83	8,32	16,63	-0,80
	3,60	16,10	8,32	16,63	-0,53
	4,20	15,80	7,17	14,88	0,92
	4,70	15,99	8,73	17,29	-1,29
	5,20	16,16	9,35	18,30	-2,14
				$\Sigma(w - w_{TDR})^2$	8,18
			Erro Padrão	1,28%	
2	1.50	13,82	4,99	10,92	2,90
	2.00	13,43	5,42	11,86	1,57
	2.50	12,40	5,52	12,06	0,34
	3.00	12,38	5,52	12,06	0,32
	3.50	11,82	4,78	10,41	1,41
	4.00	11,87	5,32	11,65	0,23
	4.50	11,75	6,70	14,15	-2,40
				$\Sigma(w - w_{TDR})^2$	10,48
			Erro Padrão	1,45%	
3	1.50	14,02	5,28	11,56	2,46
	2.00	14,18	6,82	14,34	-0,15
	2.50	13,41	6,29	13,47	-0,06
	3.00	14,25	6,29	13,47	0,79
	3.50	14,07	6,55	13,89	0,18
	4.00	15,49	8,58	17,04	-1,55
	4.50	14,49	7,25	15,00	-0,50
				$\Sigma(w - w_{TDR})^2$	9,39
			Erro Padrão	1,37%	
4	1.50	12,80	5,19	11,37	1,42
	2.00	13,71	6,30	13,48	0,23
	2.50	13,92	6,51	13,83	0,09
	3.00	13,73	5,97	12,90	0,82
	3.50	14,41	7,75	15,76	-1,35
	4.00	15,07	8,71	17,25	-2,18
	4.50	15,49	8,57	17,03	-1,53
				$\Sigma(w - w_{TDR})^2$	11,67
			Erro Padrão	1,53%	

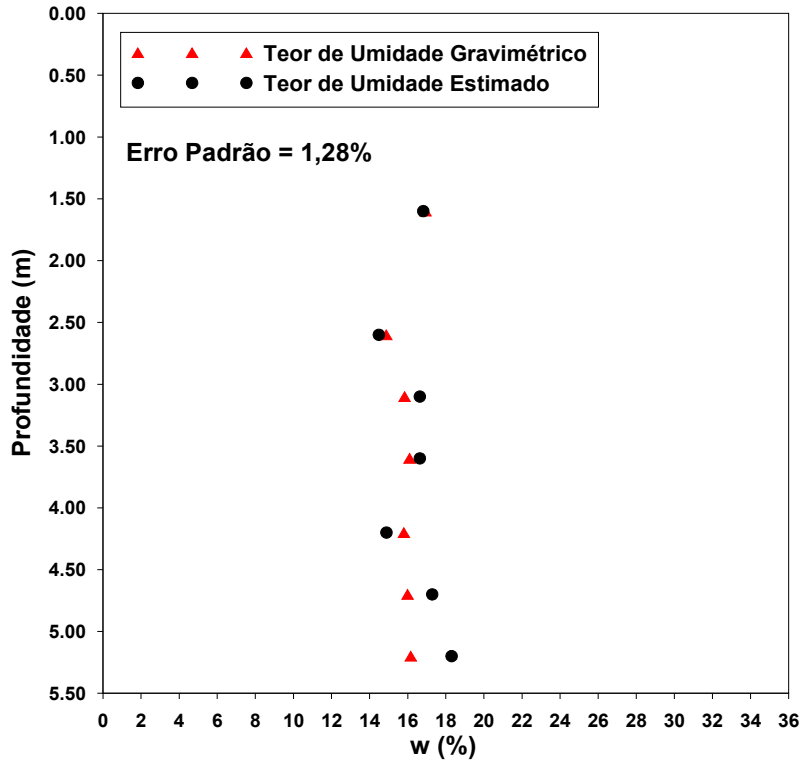


Figura 5.17 – EESC-USP Campus I: Perfil do teor de umidade no Furo 1.

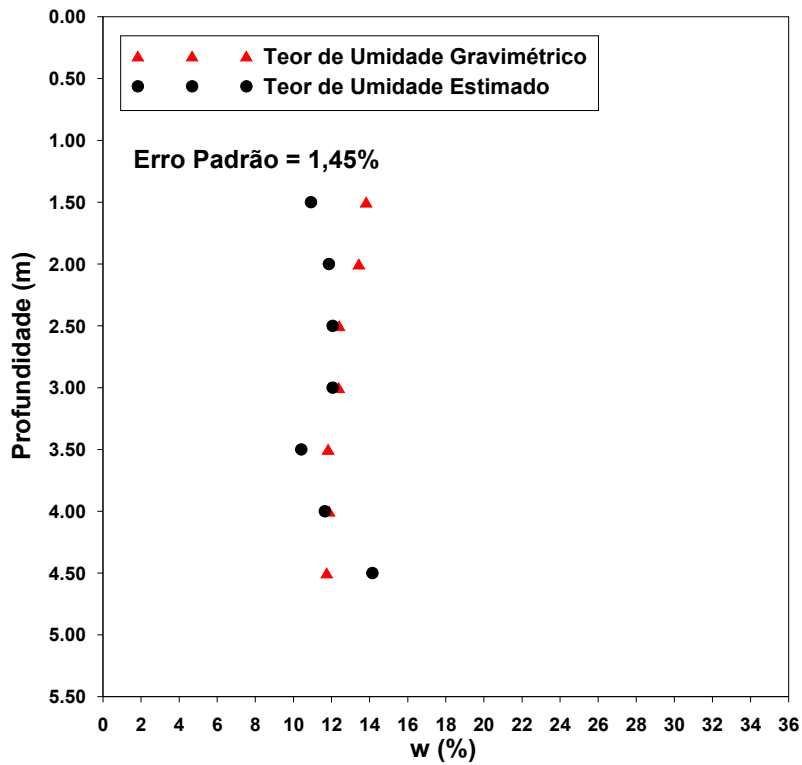


Figura 5.18 – EESC-USP Campus I: Perfil do teor de umidade no Furo 2.

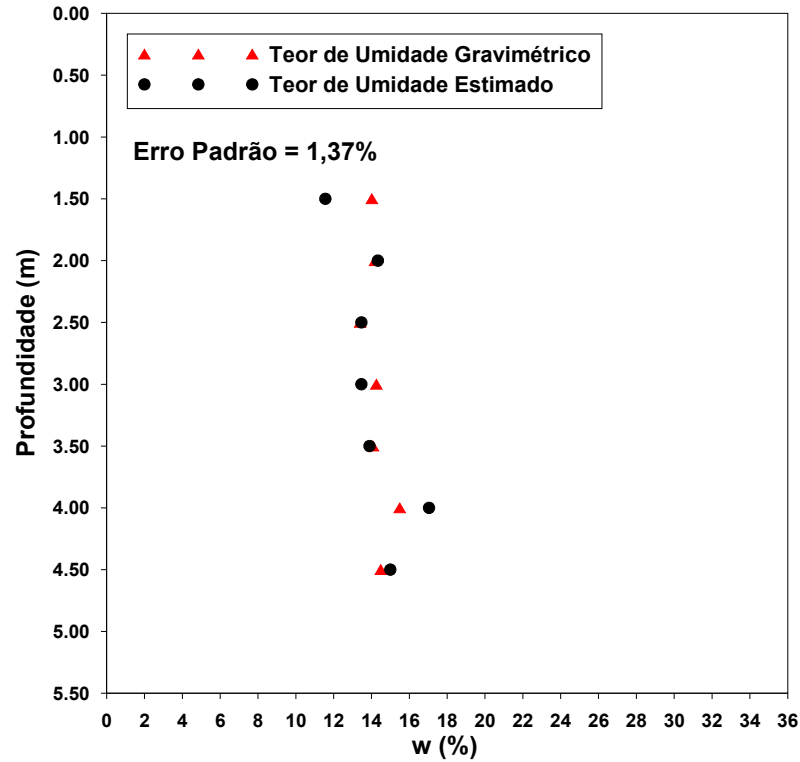


Figura 5.19 – EESC-USP Campus I: Perfil do teor de umidade no Furo 3.

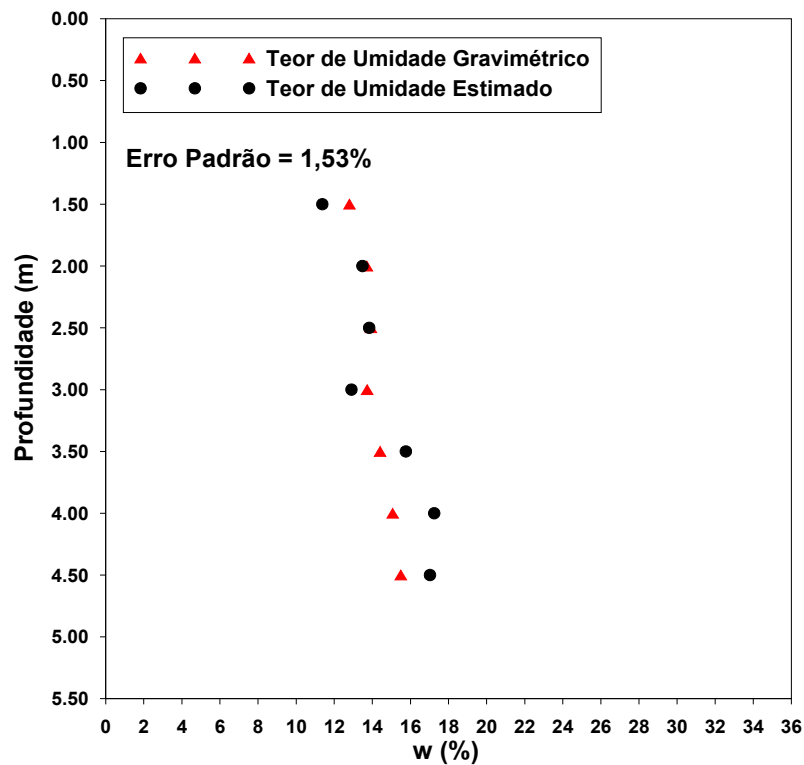


Figura 5.20 – EESC-USP Campus I: Perfil do teor de umidade no Furo 4.

Tabela 5.12 – Resultados correspondentes ao Campus II da EESC-USP.

Furo	Prof. (m)	W (%)	K_a	W_{TDR} (%)	$(W - W_{TDR})$
1	1.50	21,41	8,18	22,37	-0,96
	2.00	21,57	7,64	21,91	-0,34
	2.50	23,14	11,41	26,98	-3,84
	3.00	28,27	13,15	31,27	-3,00
	3.50	30,52	14,07	34,15	-3,63
				$\Sigma(W - W_{TDR})^2$	37,96
			Erro Padrão	3,56%	
2	1.50	18,95	8,36	22,54	-3,59
	2.00	19,82	7,52	21,82	-2,01
	2.50	22,35	10,12	24,66	-2,31
	3.00	25,88	12,51	29,53	-3,64
				$\Sigma(W - W_{TDR})^2$	35,51
				Erro Padrão	4,21%
3	1.50	20,76	7,71	21,97	-1,22
	2.00	19,73	9,52	23,82	-4,09
	2.50	20,39	9,87	24,30	-3,91
	3.00	22,15	10,99	26,15	-3,99
	3.50	22,02	11,67	27,53	-5,51
	4.00	21,83	11,03	26,23	-4,40
	4.50	22,43	12,05	28,40	-5,97
				$\Sigma(W - W_{TDR})^2$	134,79
			Erro Padrão	5,19%	
4	1.50	21,41	9,26	23,50	-2,09
	2.00	21,59	10,34	25,01	-3,42
	2.50	22,13	11,10	26,36	-4,22
	3.00	23,06	10,58	25,41	-2,34
	3.50	23,37	11,00	26,17	-2,80
	4.00	23,46	11,67	27,54	-4,08
	4.50	22,91	12,31	29,02	-6,11
				$\Sigma(W - W_{TDR})^2$	101,17
			Erro Padrão	4,50%	

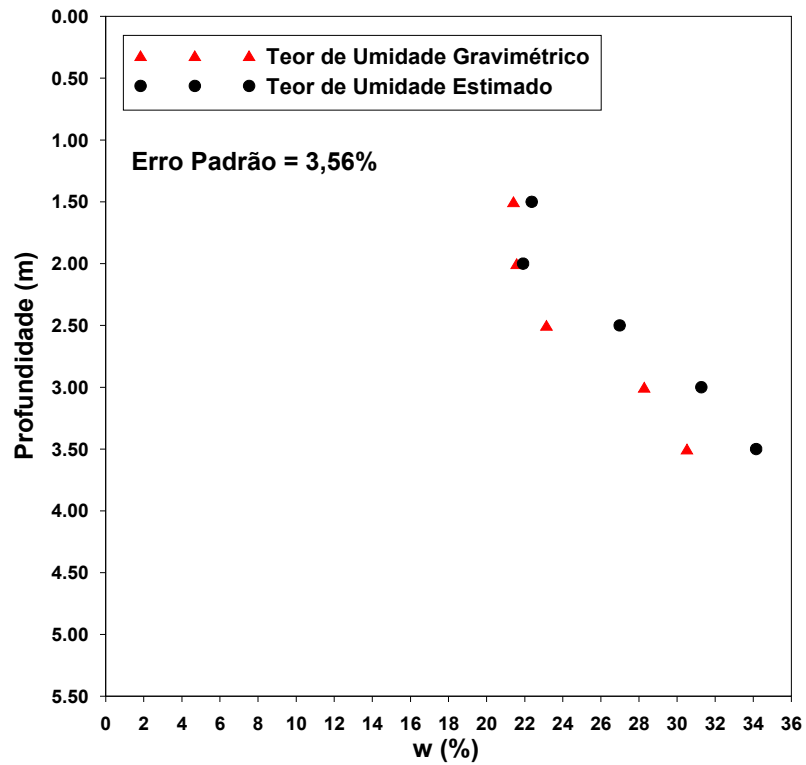


Figura 5.21 – EESC-USP Campus II: Perfil do teor de umidade no Furo 1.

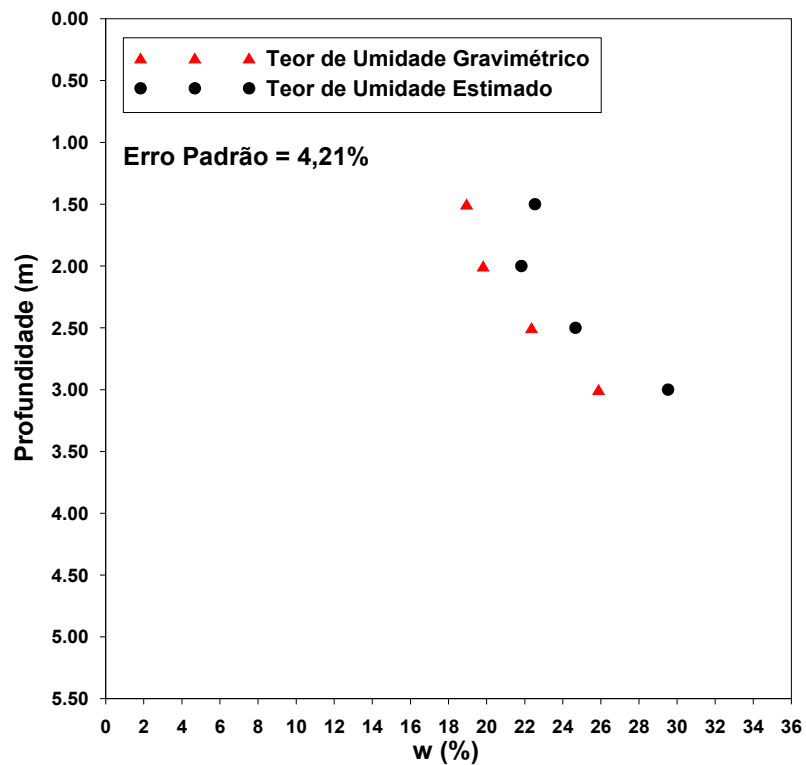


Figura 5.22 – EESC-USP Campus II: Perfil do teor de umidade no Furo 2.

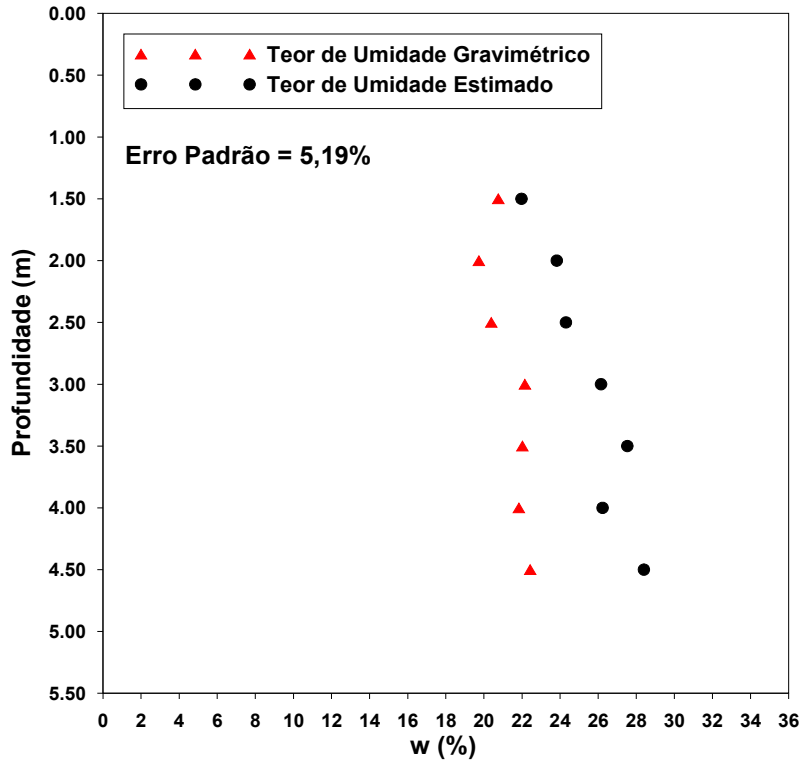


Figura 5.23 – EESC-USP Campus II: Perfil do teor de umidade no Furo 3.

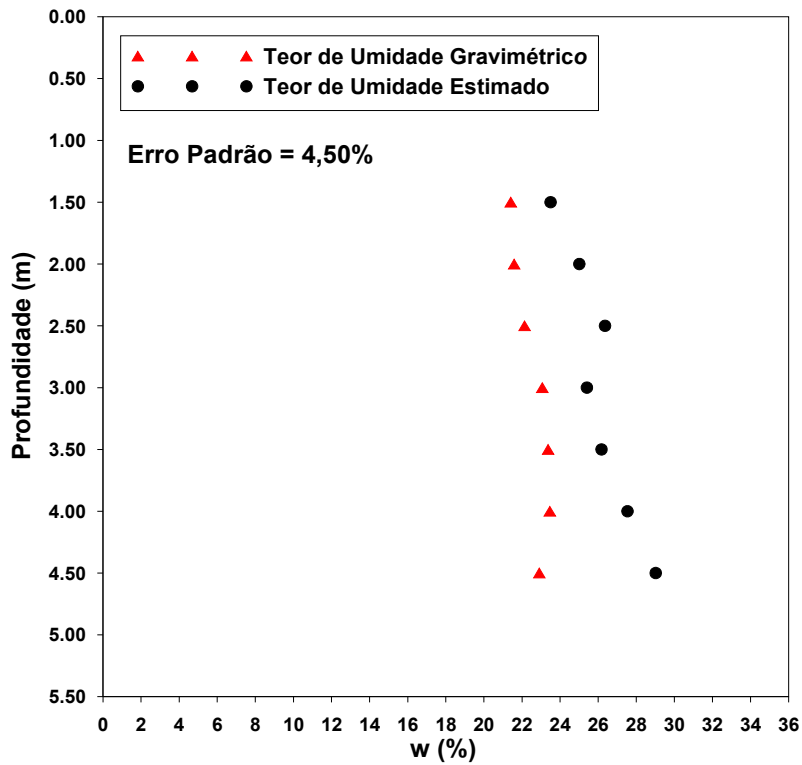


Figura 5.24 – EESC-USP Campus II: Perfil do teor de umidade no Furo 4.

Tabela 5.13 – Resultados correspondentes ao Bosque Paulistinha - UFSCar.

Furo	Prof. (m)	W (%)	K_a	W_{TDR} (%)	$(W - W_{TDR})$
1	1.50	19,14	6,58	14,83	4,31
	2.00	19,88	8,97	20,23	-0,35
	2.50	20,43	6,93	15,91	4,52
	3.00	21,60	9,49	21,00	0,61
	3.50	21,09	10,96	22,84	-1,75
	4.00	20,75	9,85	21,48	-0,73
	4.50	20,68	12,00	24,06	-3,38
			$\Sigma(W - W_{TDR})^2$		54,52
			Erro Padrão		3,30%
2	1.50	16,32	5,18	8,81	7,51
	2.00	17,64	7,04	16,22	1,42
	2.50	18,85	9,86	21,49	-2,64
	3.00	20,22	10,57	22,38	-2,16
	3.50	20,49	9,71	21,29	-0,80
	4.00	19,63	11,52	23,50	-3,87
	4.50	20,18	11,62	23,61	-3,43
			$\Sigma(W - W_{TDR})^2$		97,43
			Erro Padrão		4,41%
3	1.50	16,59	4,59	5,03	11,56
	2.00	17,23	5,63	11,11	6,12
	2.50	19,52	10,08	21,77	-2,25
	3.00	20,94	8,37	19,21	1,73
	3.50	20,14	9,29	20,70	-0,56
	4.00	19,86	7,85	18,20	1,67
	4.50	20,04	11,19	23,12	-3,08
			$\Sigma(W - W_{TDR})^2$		191,73
			Erro Padrão		6,19%
4	1.50	16,90	4,99	7,69	-2,04
	2.00	16,51	6,74	15,35	4,31
	2.50	20,36	9,93	21,58	-0,35
	3.00	20,15	10,53	22,33	4,52
	3.50	18,90	9,45	20,94	0,61
	4.00	18,54	10,21	21,93	-1,75
			$\Sigma(W - W_{TDR})^2$		46,73
			Erro Padrão		3,42%

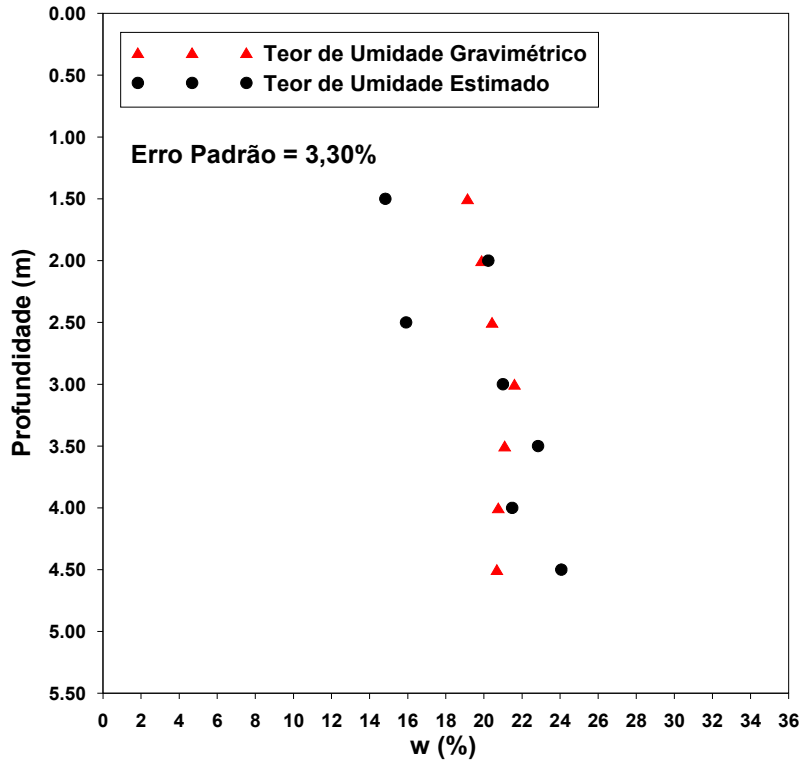


Figura 5.25 – UFSCar-Bosque Paulistinha: Perfil do teor de umidade no Furo 1.

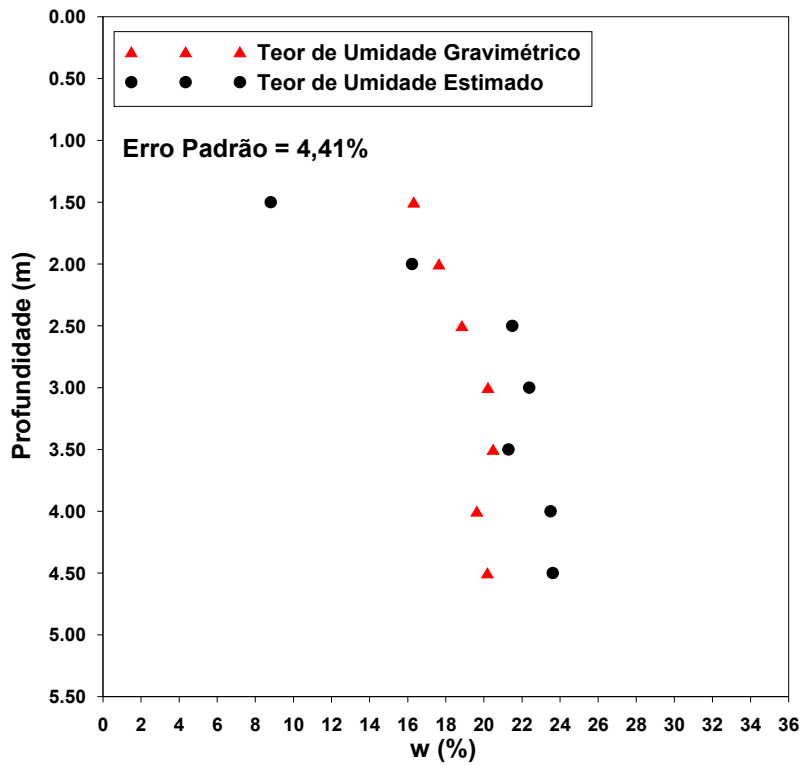


Figura 5.26 – UFSCar-Bosque Paulistinha: Perfil do teor de umidade no Furo 2.

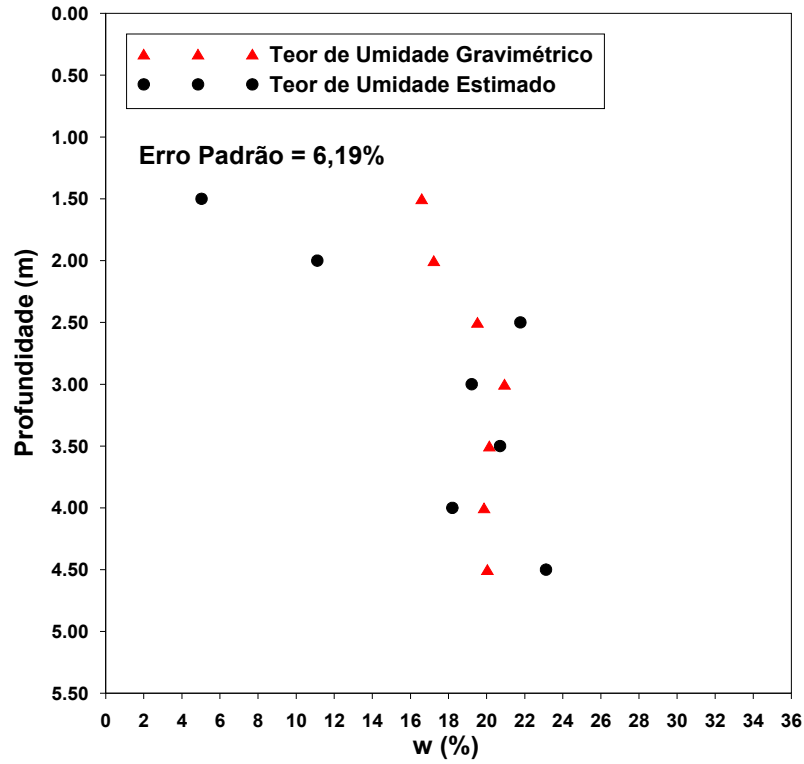


Figura 5.27 – UFSCar-Bosque Paulistinha: Perfil do teor de umidade no Furo 3.

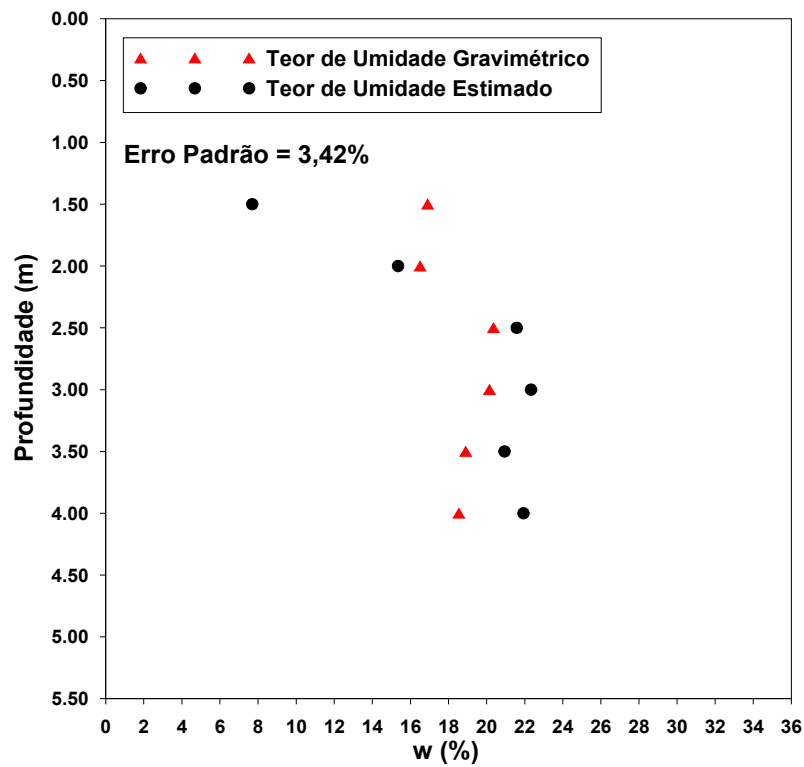


Figura 5.28 – UFSCar-Bosque Paulistinha: Perfil do teor de umidade no Furo 4.

Tabela 5.14 – Resultados correspondentes ao DECiv - UFSCar.

Furo	Prof. (m)	W (%)	K_a	W_{TDR} (%)	$(W - W_{TDR})$
1	1.50	20,58	9,15	20,30	0,28
	2.00	19,32	9,69	21,04	-1,71
	2.50	19,26	9,12	20,25	-1,00
	3.00	20,29	8,83	19,82	0,47
	3.50	19,68	8,53	19,33	0,34
				$\Sigma(W - W_{TDR})^2$	4,34
			Erro Padrão	1,20%	
2	1.50	23,40	11,56	23,42	-0,02
	2.00	24,31	10,51	22,06	2,24
	2.50	23,60	11,45	23,26	0,34
	3.00	22,86	9,23	20,41	2,44
	3.50	20,12	9,70	21,04	-0,92
				$\Sigma(W - W_{TDR})^2$	11,93
			Erro Padrão	1,99%	
3	1.50	22,29	9,50	20,78	1,52
	2.00	22,55	11,36	23,15	-0,60
	2.50	22,22	9,41	20,66	1,56
	3.00	20,33	8,88	19,89	0,43
	3.50	21,06	10,32	21,82	-0,76
	4.00	20,55	9,73	21,09	-0,54
	4.50	20,07	10,44	21,97	-1,90
			$\Sigma(W - W_{TDR})^2$	9,77	
			Erro Padrão	1,40%	
4	1.50	21,90	6,58	14,42	7,49
	2.00	22,92	8,97	20,04	2,89
	2.50	18,89	6,93	15,62	3,27
	3.00	20,72	9,49	20,77	-0,05
	3.50	20,62	10,96	22,62	-2,00
	4.00	21,56	9,85	21,24	0,32
	4.50	19,06	12,00	24,03	-4,98
			$\Sigma(W - W_{TDR})^2$	104,05	
			Erro Padrão	4,56%	

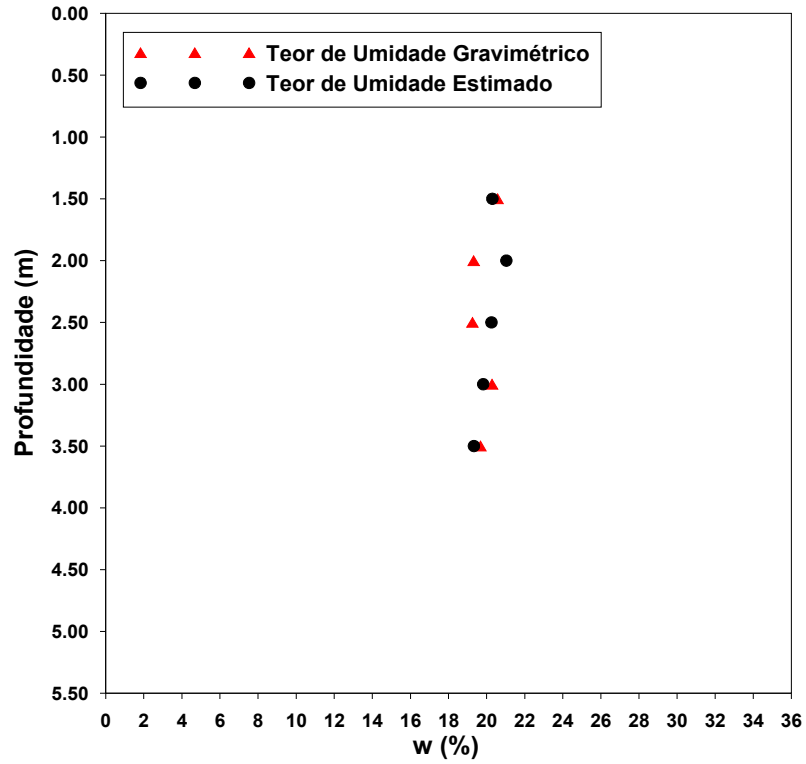


Figura 5.29 – UFSCar-DECiv: Perfil do teor de umidade no Furo 1.

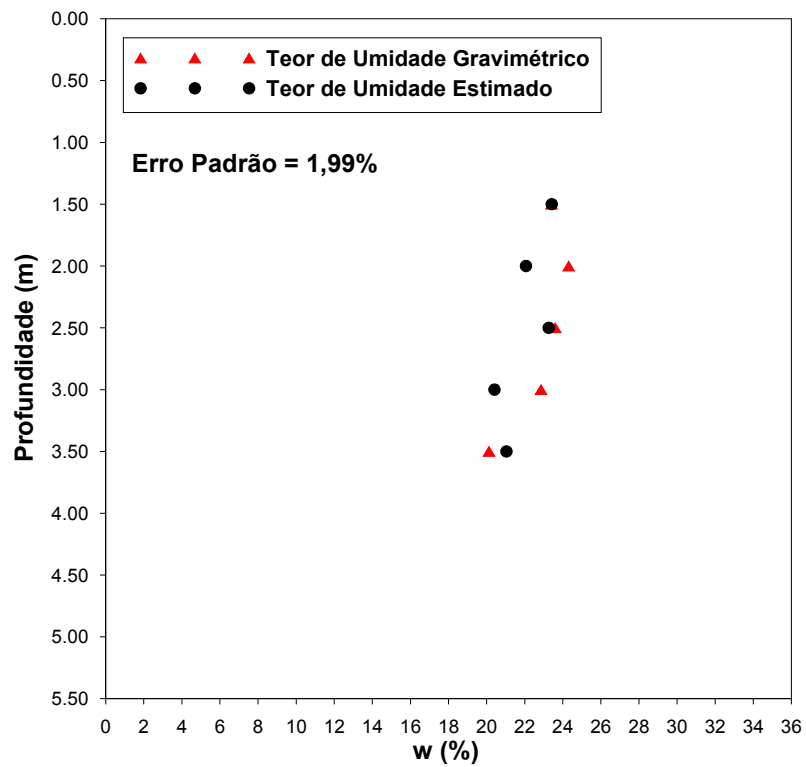


Figura 5.30 – UFSCar-DECiv: Perfil do teor de umidade no Furo 2.

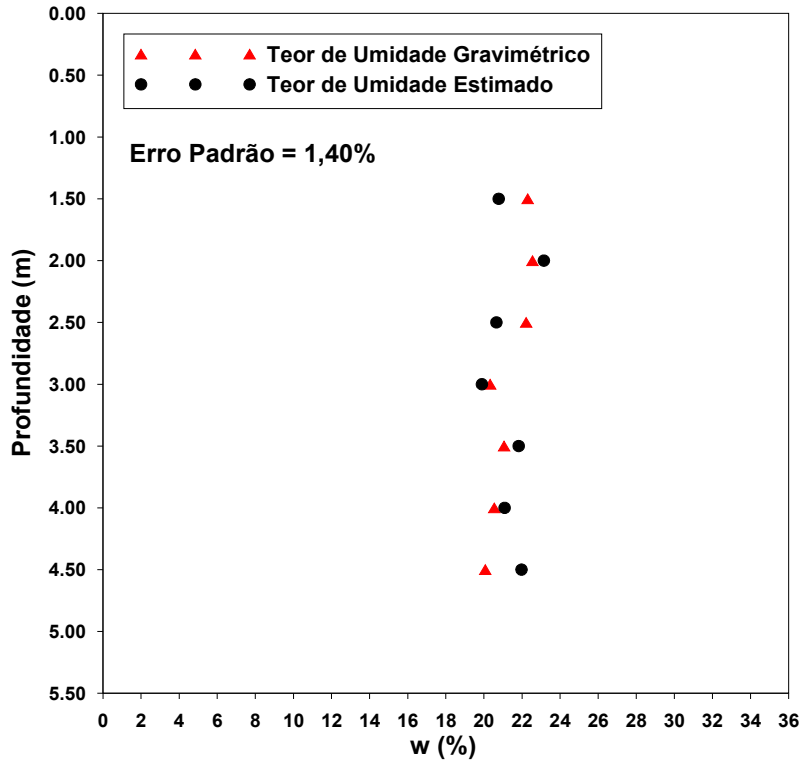


Figura 5.31 – UFSCar-DECiv: Perfil do teor de umidade no Furo 3.

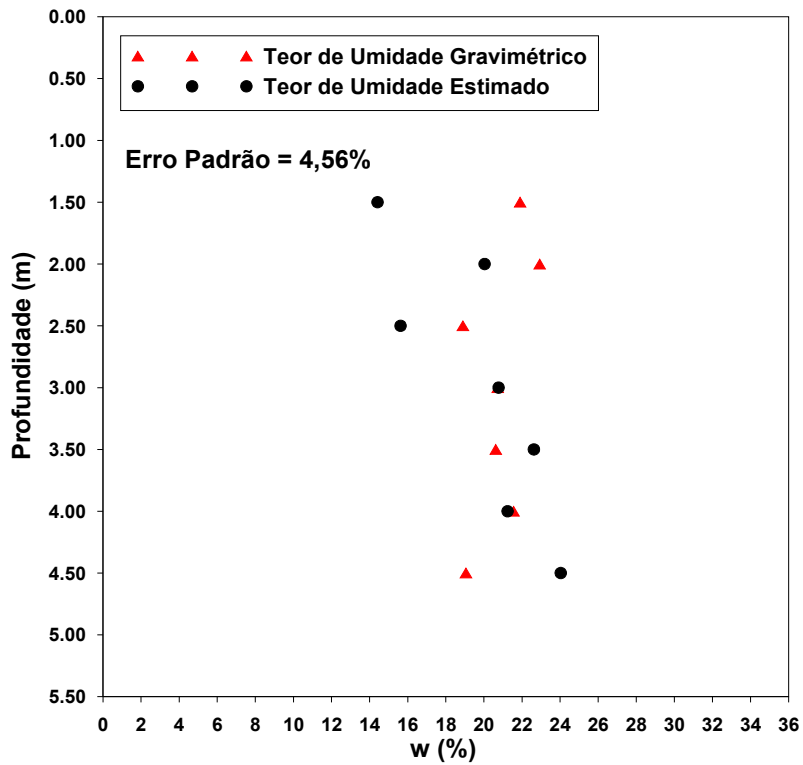


Figura 5.32 – UFSCar-DECiv: Perfil do teor de umidade no Furo 4.

6 CONCLUSÃO

Baseado nos ensaios realizados e na análise de seus resultados pode-se concluir que:

- a) O ensaio de efeito de borda demonstrou que a área de influência da técnica TDR é pequena, ficando restrita apenas ao contato entre a sonda e o solo. Também é possível concluir que o tipo de material que é constituído o molde para execução do ensaio não altera os valores da constante dielétrica.
- b) Nos ensaios realizados com o Solo 8, em que foram utilizadas três sondas TDR com comprimentos de cabos diferentes, foi possível verificar a atenuação do sinal devido à diminuição da condutividade elétrica volumétrica quando se aumenta o comprimento do cabo. Quanto ao valor da constante dielétrica aparente, este não sofreu redução significativa, possibilitando o uso da técnica em profundidades de até pelo menos 21m.
- c) As correlações alternativas usadas no trabalho apresentaram resultados satisfatórios, com erros médios relativamente pequenos quando comparados a outros métodos de estimativa do teor de umidade dos solos. Ao analisar as correlações verifica-se que os melhores resultados, baseado na análise estatística feita com os dados dos ensaios e dos resultados das correlações, foram obtidos através da correlação entre w e \sqrt{Ka} .
- d) A calibração dos solos utilizando a metodologia aplicada por Yu e Drnevich (2004) não trouxe resultados satisfatórios, quando comparados aos resultados das correlações alternativas. Os valores de erro padrão foram superiores aos das demais correlações. No entanto tais resultados não vem a inviabilizar o uso da técnica sendo necessário uma readequação do seu modelo matemático, para que possibilite que esse modelo seja utilizado em conjunto com a sonda TDR helicoidal.
- e) Os resultados dos ensaios para a determinação do teor de umidade, utilizando a tecnologia TDR são satisfatórios, com um erro padrão de estimativa baixo quando comparado a outros métodos de estimativa de teor de umidade, como por exemplo o *speedy* e o GPR. Esse fato mostra que a técnica TDR para estimar teores de umidade em pontos localizados na subsuperfície, utilizando a sonda helicoidal, é prática, rápida e eficaz. Apresenta ainda como vantagem, a possibilidade de se estimar a constante dielétrica e a condutividade elétrica volumétrica dos solos.

Sugestões para trabalhos futuros:

- a) Como a sonda TDR helicoidal utilizada neste trabalho é um protótipo, torna-se necessário aperfeiçoar seu desenho, para que esta seja capaz de suportar altos esforços mecânicos durante sua cravação.
- b) Também é necessário readaptar o modelo proposto por Yu e Drnevich (2004), para utilização deste com a sonda TDR helicoidal. Deve-se ainda avaliar sua aplicação em locais sob condições saturadas.
- c) Estudar com mais detalhes os fatores que alteram o valor da constante dielétrica, tais como, mineralogia, presença de materiais ferríferos, sais e temperatura.

REFERÊNCIAS

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

ANNAN, A. P. *GPR – History, Trends, and Future Developments*. Subsurface Sensing Technologies and Applications. V. 3, N. 4, p. 253-270, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6459**: *Determinação do Limite de Liquidez – Método de Ensaio*. 6 p., Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6508**: *Grãos que passam na peneira 4,8 mm – Determinação da massa específica*. 8 p., Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7180**: *Determinação do Limite de Plasticidade – Método de Ensaio*. 3 p., Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7181**: *Solo – Análise granulométrica*. 13 p., Rio de Janeiro, 1984.

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

BELCHER, D. J.; CUYKENDALL, T. R.; SACK, H. S. *The measurement of soil moisture and density by Neutron and Gamma-ray scattering*. Civil Aeronautics Administration Technologic Development Report. V. 127, 20 p. 1950.

BELL, J. P. *Neutron Probe Practice*. Natural Environment Research Council. Report 19, 1973.

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

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

CAETANO-CHANG, M.R.; WU, F.T. *Diagênese de arenitos da formação Pirambóia no centro-leste paulista*. Geociências, São Paulo. V. 22, p. 33-39, 2003.

CAMPBELL, G. S.; ANDERSON, R. Y. *Evaluation of simple line oscillators for soil moisture measurement*. Computers and Electronics in Agriculture, V. 20, p. 31-44, 1998.

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

DALTON, F. N. *Development of time domain reflectometry for measuring soil water and bulk soil electrical conductivity*. Soil Science Society American, Madison, Wis., SSSA Sp. Pub. 30, p. 143-167, 1992.

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, 224(4652), 989-990, 1984.

DANIEL, C. R.; GIACHETI, H. L.; CAMPANELLA, R. G.; HOWIE, J. A. *Resistivity piezocone: data interpretation and potential applications*. In *proceedings*. Pan American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. V.1, p. 361-368, 1999.

DAVIES, M.P. & CAMPANELLA, R.G. *Piezocone Technology: Downhole Geophysics for the Geoenvironmental Characterization of Soil*. Proceedings of Symposium on App. of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Environmental and Engineering Geophysics Society. Orlando, Florida, April, 11p. 1995.

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

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

DOWDING, D. G.; HUANG, F. C. *Early detection of rock movement with time domain reflectometry*. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, V. 120, n° 8, p. 1413-1427, 1994.

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

DRNEVICH, V. *Some new uses of time domain reflectometry in geotechnical engineering*. Soil Dynamics Symposium in Honor of Professor Richard D. Woods. 2005

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

FERRE, P. A.; RUDOLPH, D. L.; KACHANOSKI, R. G. *Spatial averaging of water content by time domain reflectometry: implications for twin rod probes with and without dielectric coating*. Water Resources Research. V. 32, n°. 2, p. 271-279. 1996.

GIESE, K.; TIEMANN, R. *Determination of the complex permittivity from a thin sample time domain reflectometry, improved analysis of the step response waveform*. Adv. Molec. Relax. Processes. V. 7, p. 45-49, 1975.

HALLIKAINEN, M. T.; ULABY, F. T.; DOBSON, M. C.; EL-RAYES, M. A. *Microwave dielectric behavior of wet soil, Empirical models and experimental observations*. Geoscience Remote Sens. V. 23, n° 1, p. 25-34. 1985.

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

HERKELRATH, W. N.; HAMBURG, S. P.; MURTHY, F. *Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry*. Water Resources Research. V. 27, n° 5, p. 857-864. 1991.

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

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

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

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

LUNNE, T.; ROBERTSON, P. K.; POWELL, J. J. M. *Cone Penetration testing in geotechnical practice*. Blackie Academic & Professional, 1998.

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

MOJID, M. A.; WYSEURE, G. C. L.; ROSE, D. A. *Extension of the measurement range of electrical conductivity by time domain reflectometry*. Hydrological Earth Systems Science 1, p. 175-183, 1997.

NADLER A., DASBERG S., LAPID I. Time domain reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soils columns. Soil Science Society America Journal, V. 55, p. 938-943, 1991.

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.

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

OR, D.; JONES, S. B.; VANSHAAR, J. R.; HUMPHRIES, S.; KOBERSTEIN, L. *WintTDR Soil Analysis Software – Users Guide*. Utah State University, Plants, Soils & Biometeorology, Logan, 2003.

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

ROBINSON, D. A. ; JONES, S. B. ; WRAITH, J. M. ; OR, D. ; FRIEDMAN, S. P. *A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry*. Soil Science Society America Journal, V. 2, pp. 444-475, 2003.

ROTH, K.; SHULIN, R.; FLÜHLER, H; ATTINGER, W. *Calibration of Time Domain Reflectometry for Water Content Measurement Using a Composite Dielectric Approach*. Water Resources Research, V. 26, n°. 10, pp. 2267-2273, Oct. 1990.

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

SHEN, F. *Estimation of soil water and resolution and resident and effluent solute concentrations using time domain reflectometry*. Dissertação submetida a Iowa State University, 1999.

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

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

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

SILVA, E. L. GERVÁSIO, E. S. *Uso do instrumento TDR para determinação do teor de água em diferentes camadas de um Latossolo Roxo Distrófico*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. V. 3, nº.3, p. 417-420, 1999.

SOUZA, C. F.; MATSURA, E. E. *Avaliação de sondas de TDR multi-haste segmentadas para a estimativa da umidade do solo*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. V. 6, nº 1, p. 63-68, 2002.

TEIXEIRA, C. F.; 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. V. 29, p. 161-168, 2005.

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

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

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L. Time domain reflectometry (TDR) and its application to irrigation scheduling. In: D. HILLEL (ed.). *Advances in irrigation*. V. 3. Academic Press, London. P. 107-127, 1985.

TOPP, G. C.; YANUKA, M.; ZEBCHUK, W.D., ZEELIN, S. *Determination of electrical conductivity using time domain reflectometry: Soil and water experiments in coaxial lines*. Water Resources Research, V. 24, p. 945-952, 1988.

TOPP, G.C. ; LAPEN, D. R. ; EDWARDS, M. J. ; YOUNG, G. D. *Laboratory calibration, in field validation and use of a soil penetrometer measuring cone resistance and water content*. Soil Science Society of America Journal. P. 633-641, 2003.

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

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

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

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

WOLLSCHLÄGER, U.; ROTH, K. *Estimation of temporal changes of volumetric soil water content from ground-penetrating radar reflections*. Subsurface Sensing Technologies and Applications, V. 6, No. 2, April 2005

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

YU, C. *The application of time domain reflectometry in solute transport experiments*. Dissertação submetida ao Departamento de Hidrologia e Recursos Aquáticos da University of Arizona. 1998.

YU, X.; DRNEVICH, P. *Soil water content and dry density by time domain reflectometry*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, V. 130, nº. 9, p. 922-934, 2004.

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

ANEXO A – Correlações entre $w(\%)$ e $\sqrt{K_a}$

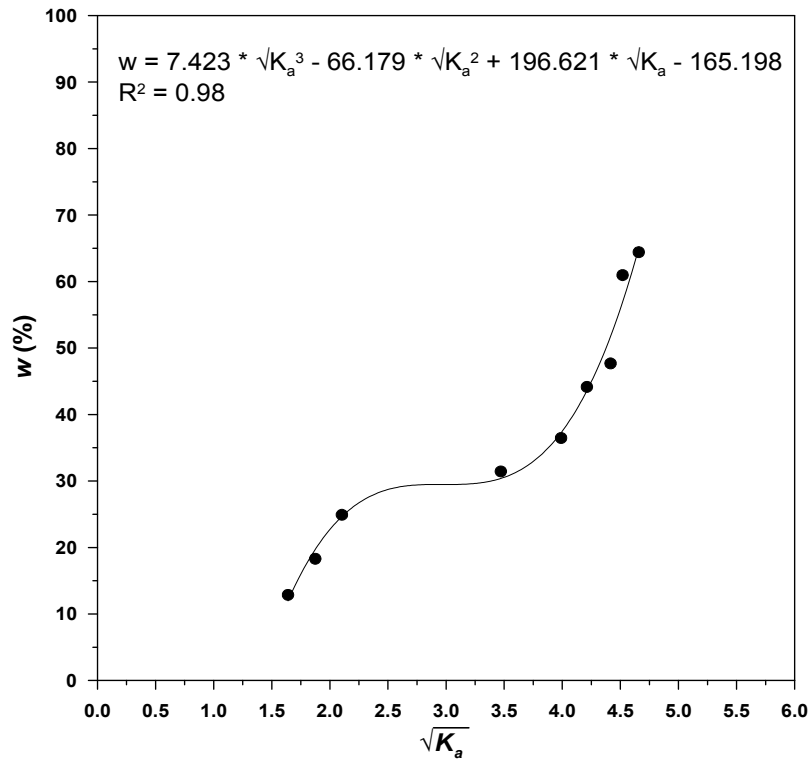


Figura 1 – Determinação das constantes da correlação entre w e $\sqrt{K_a}$ para o Solo 1.

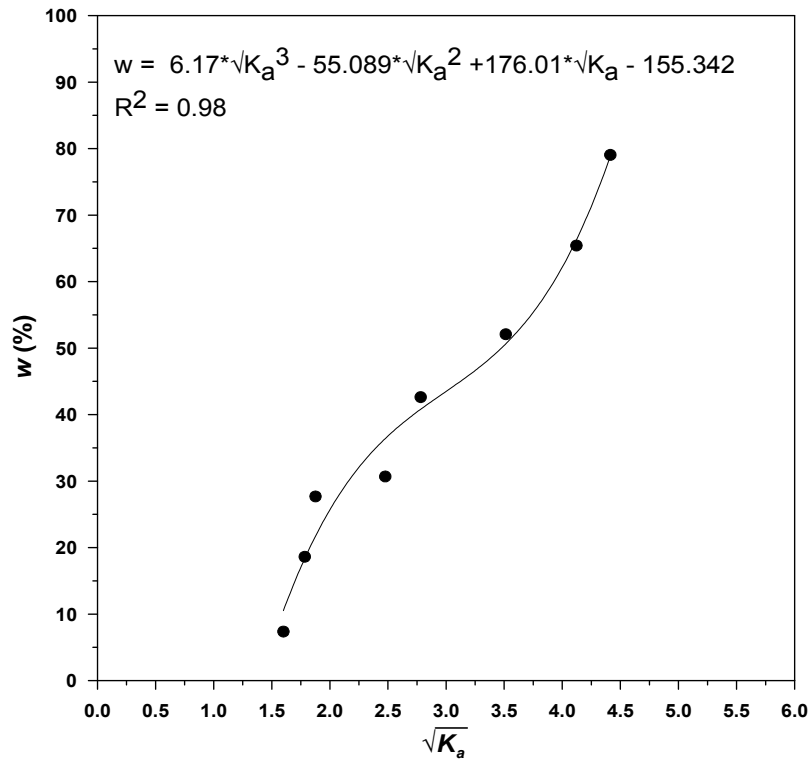


Figura 2 – Determinação das constantes da correlação entre w e $\sqrt{K_a}$ para o Solo 2.

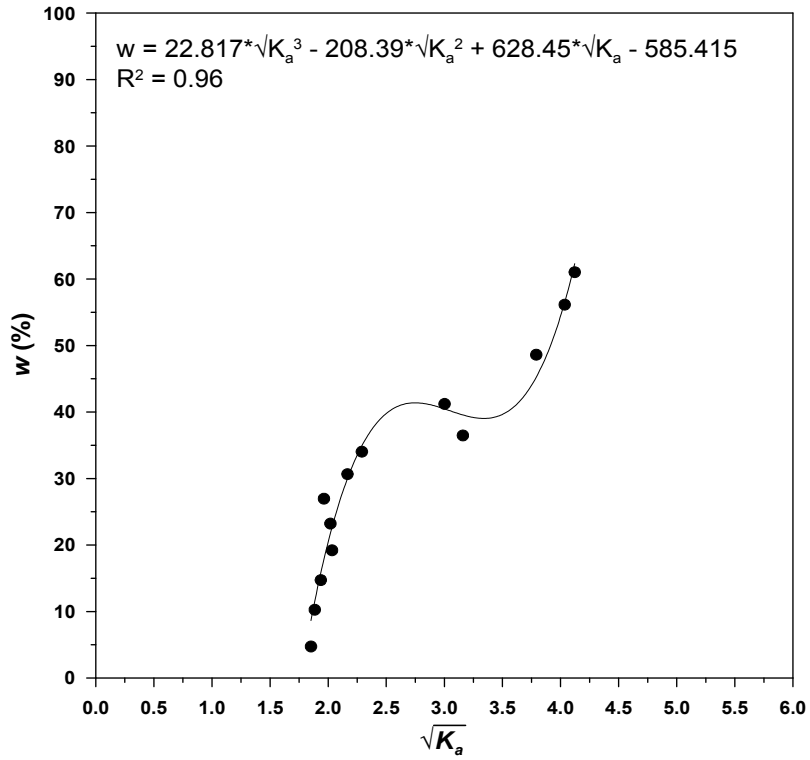


Figura 3 – Determinação das constantes da correlação entre w e $\sqrt{K_a}$ para o Solo 3.

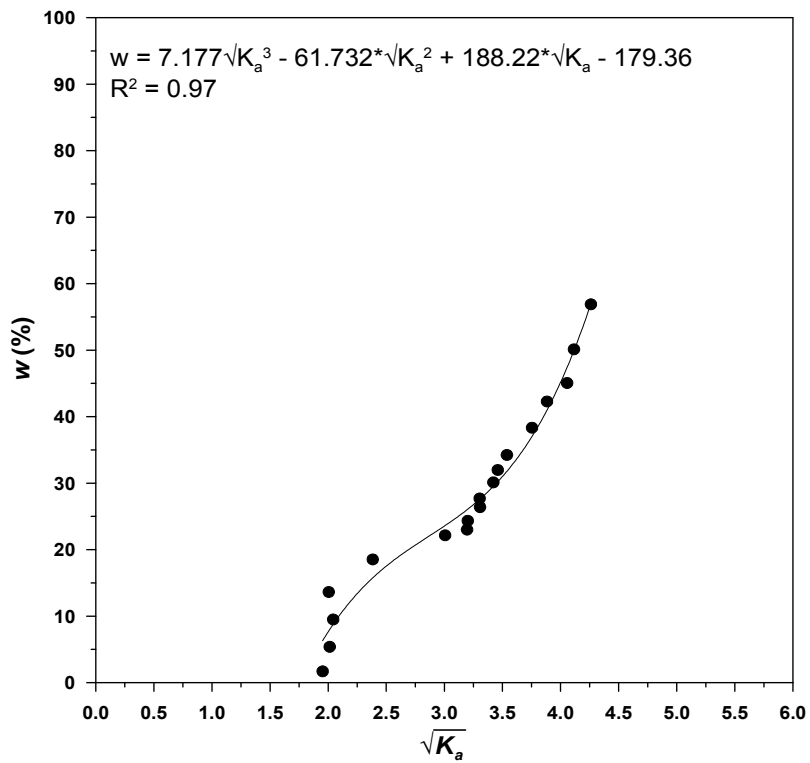


Figura 4 – Determinação das constantes da correlação entre w e $\sqrt{K_a}$ para o Solo 4.

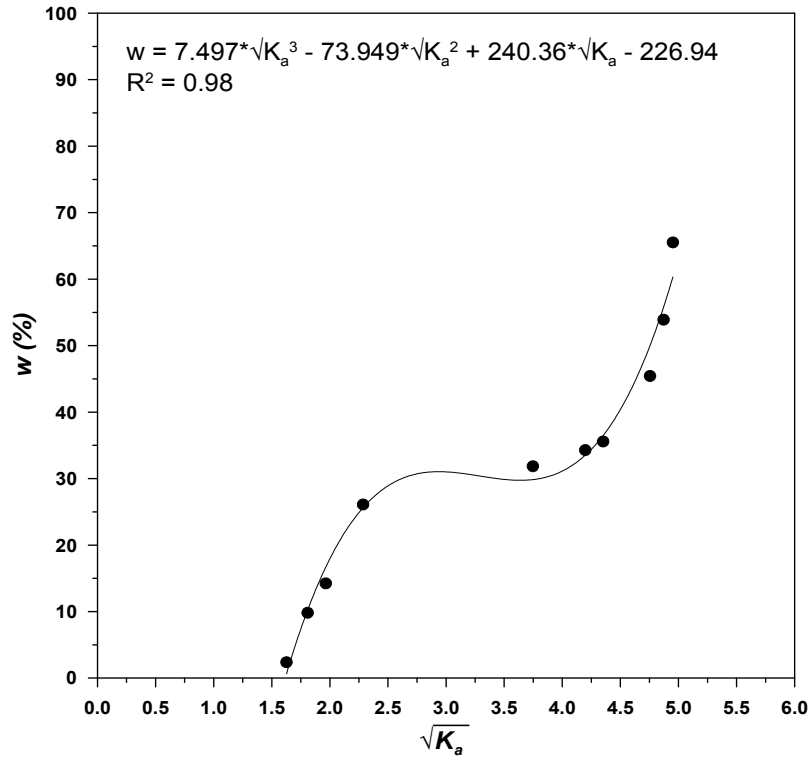


Figura 5 – Determinação das constantes da correlação entre w e $\sqrt{K_a}$ para o Solo 5.

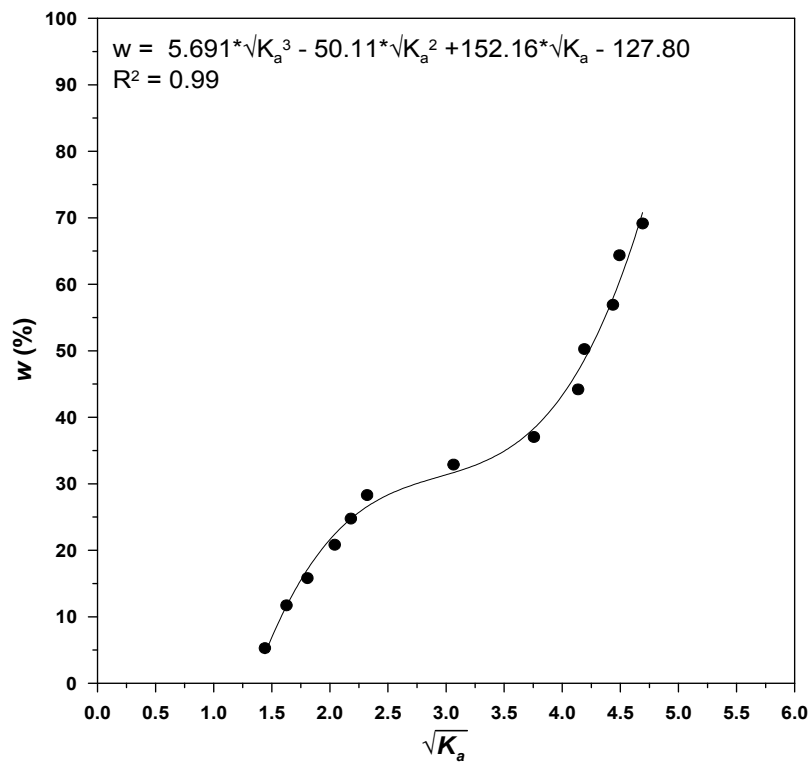


Figura 6 – Determinação das constantes da correlação entre w e $\sqrt{K_a}$ para o Solo 6.

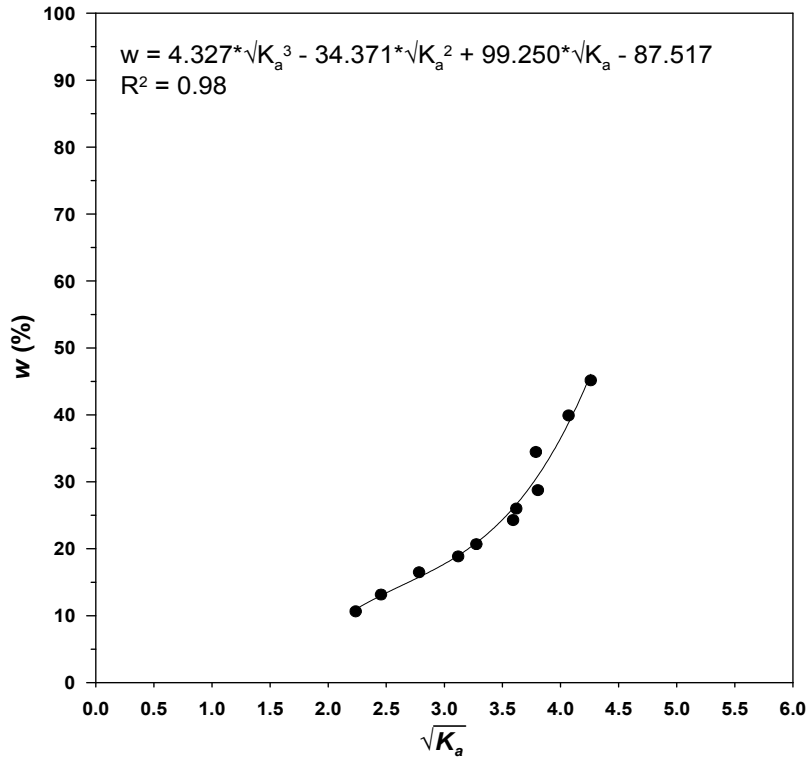


Figura 7 – Determinação das constantes da correlação entre w e $\sqrt{K_a}$ para o Solo 7.

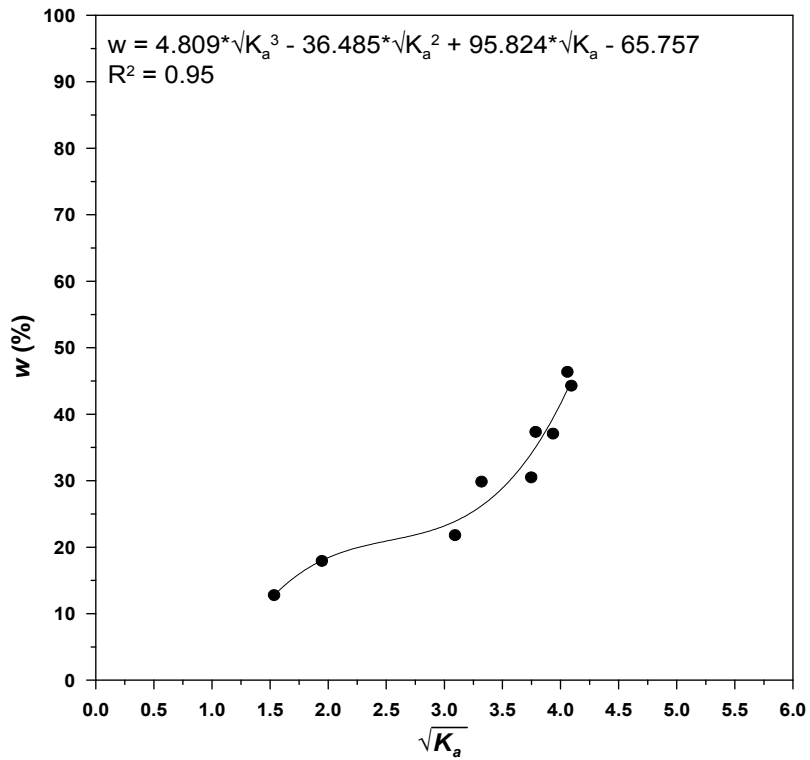


Figura 8 – Determinação das constantes da correlação entre w e $\sqrt{K_a}$ para o Solo 8.

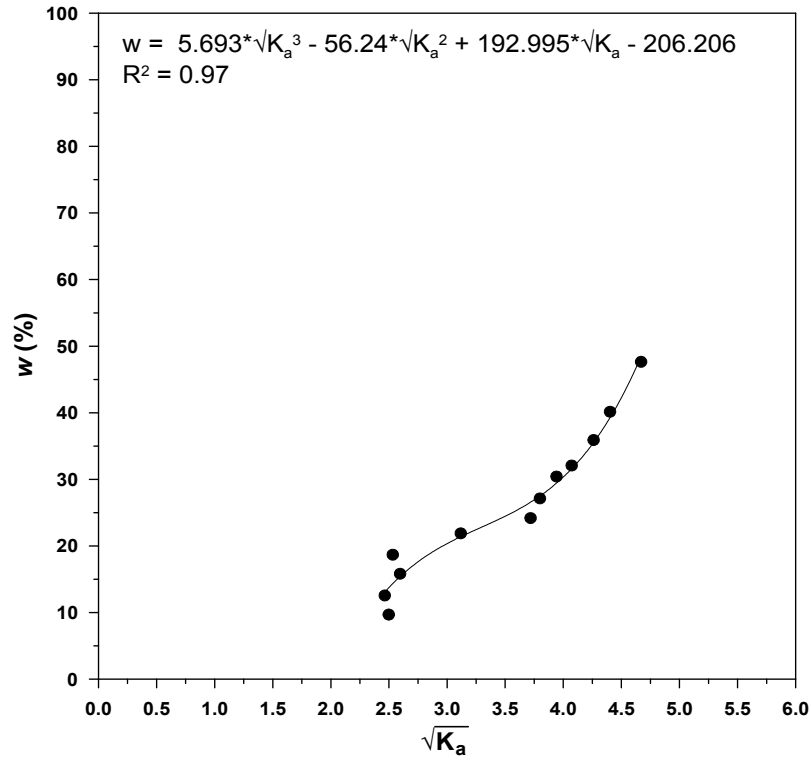


Figura 9 – Determinação das constantes da correlação entre w e $\sqrt{K_a}$ para o Solo 9.

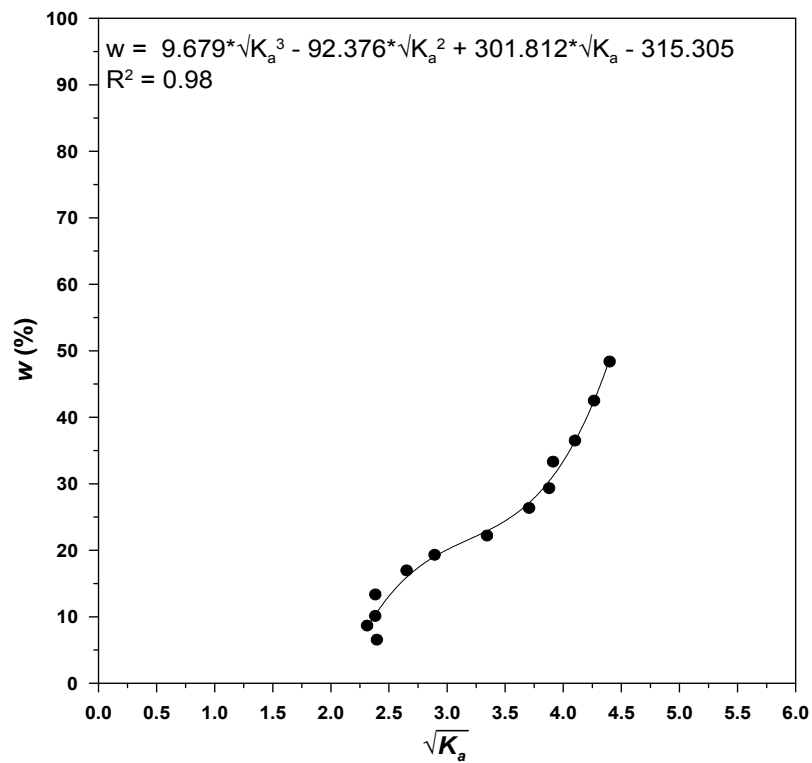


Figura 10 – Determinação das constantes da correlação entre w e $\sqrt{K_a}$ para o Solo 10.

ANEXO B – Correlações entre $w(\%)$ e K_a

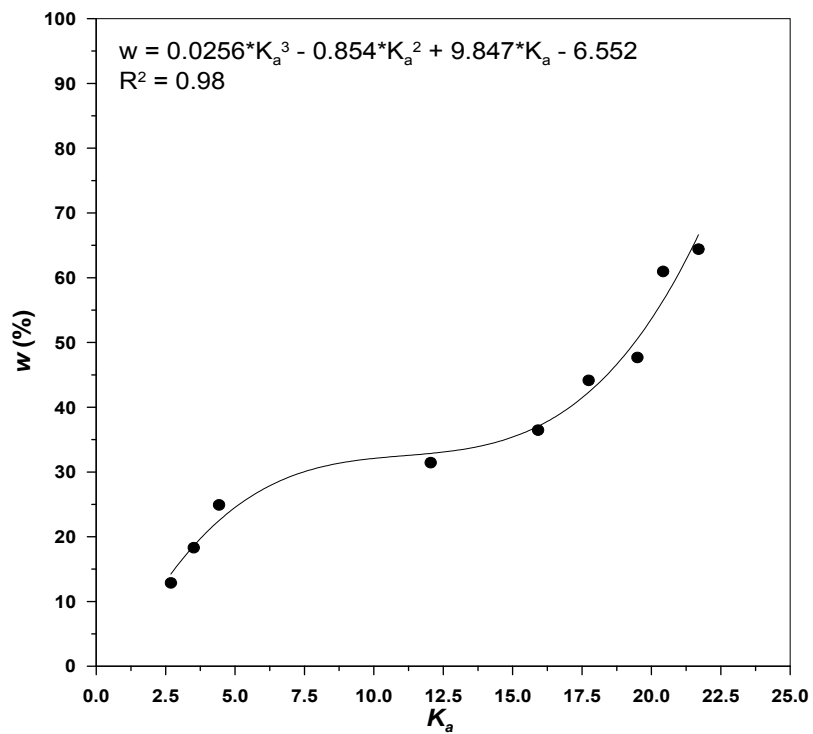


Figura 1 – Determinação das constantes da correlação entre w e K_a para o Solo 1.

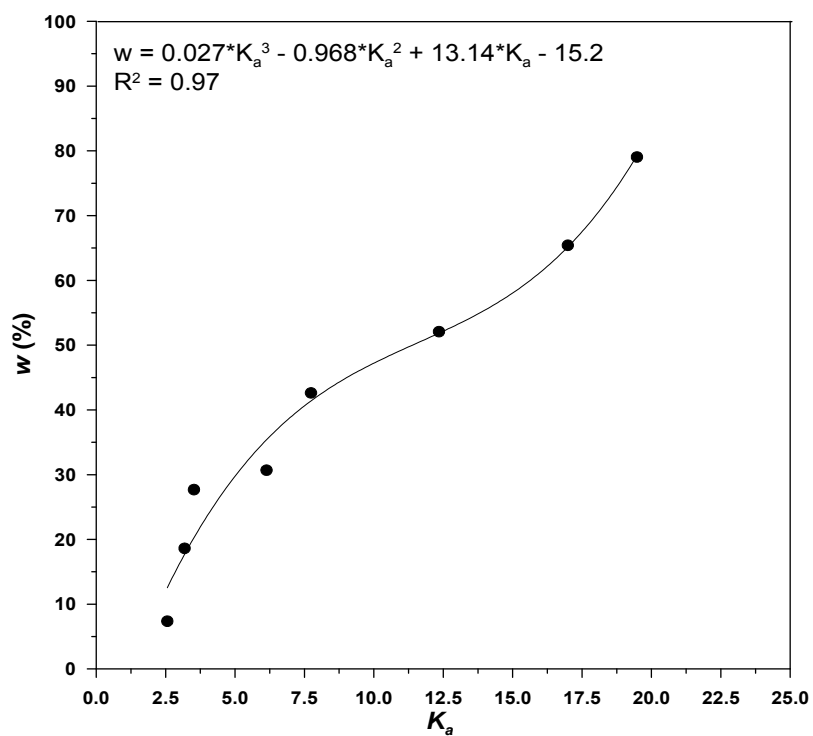


Figura 2 – Determinação das constantes da correlação entre w e K_a para o Solo 2.

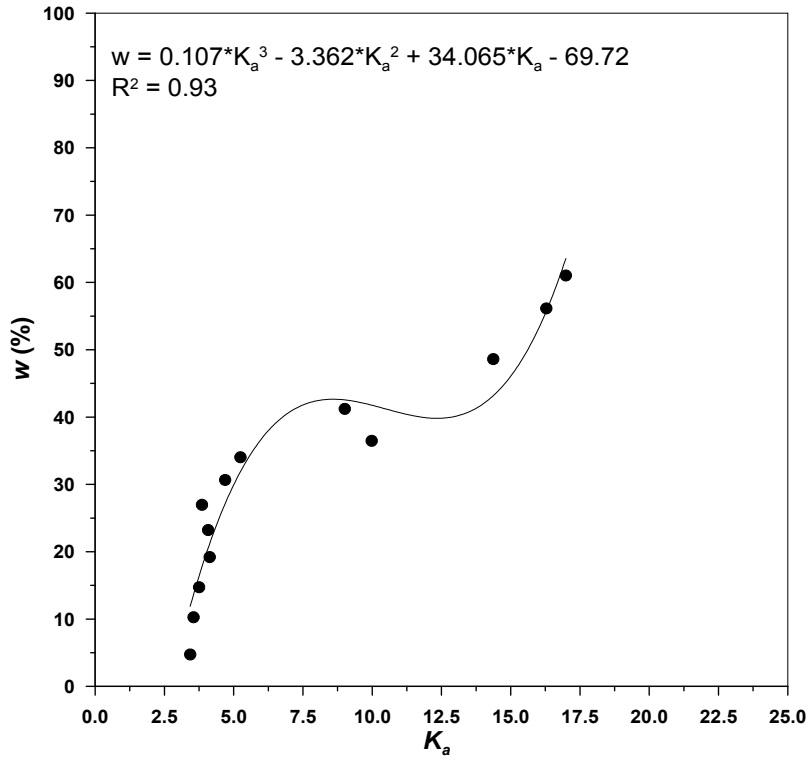


Figura 3 – Determinação das constantes da correlação entre w e K_a para o Solo 3.

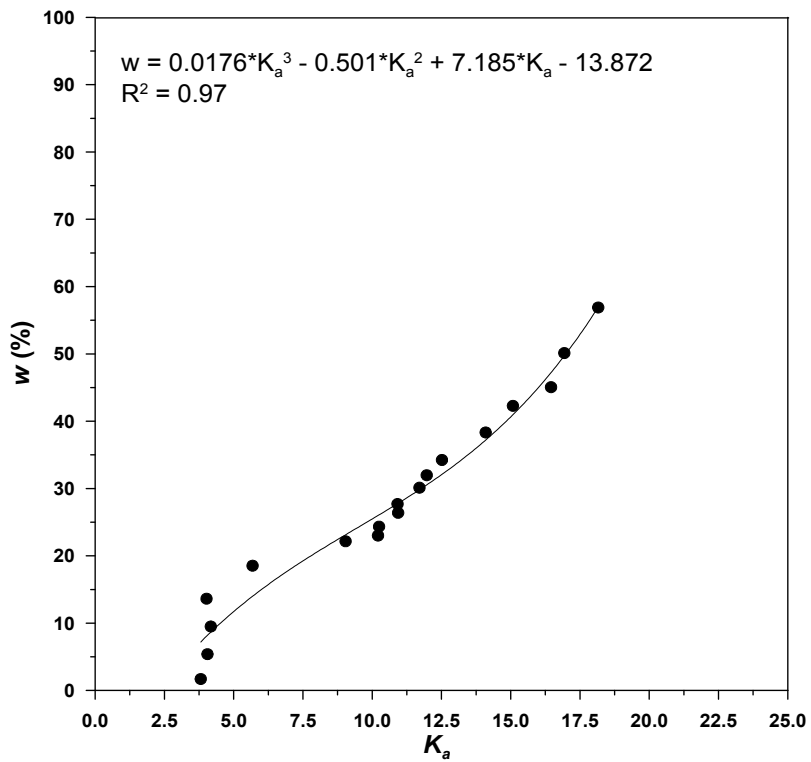


Figura 4 – Determinação das constantes da correlação entre w e K_a para o Solo 4.

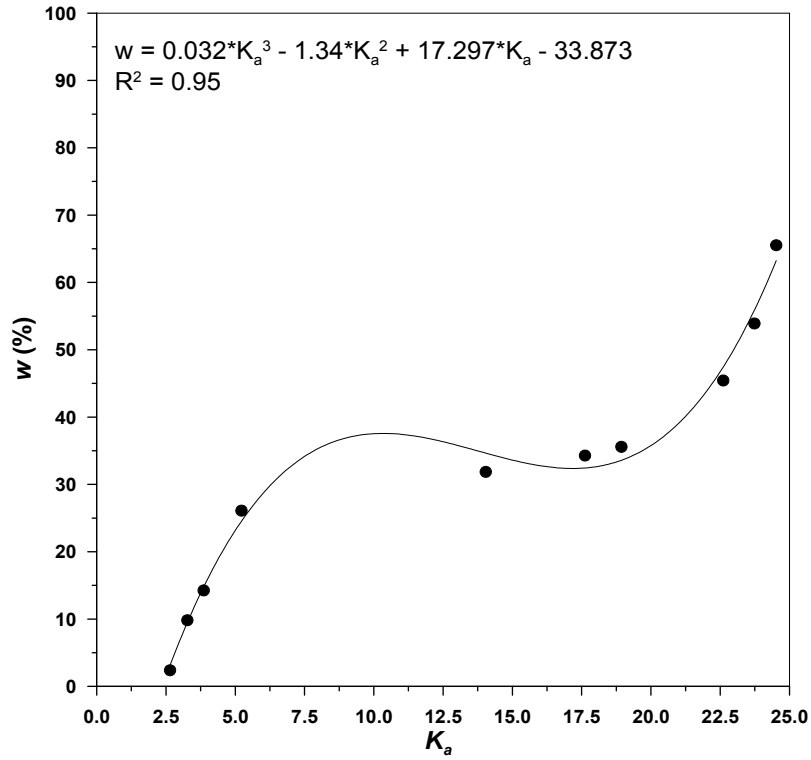


Figura 5 – Determinação das constantes da correlação entre w e K_a para o Solo 5.

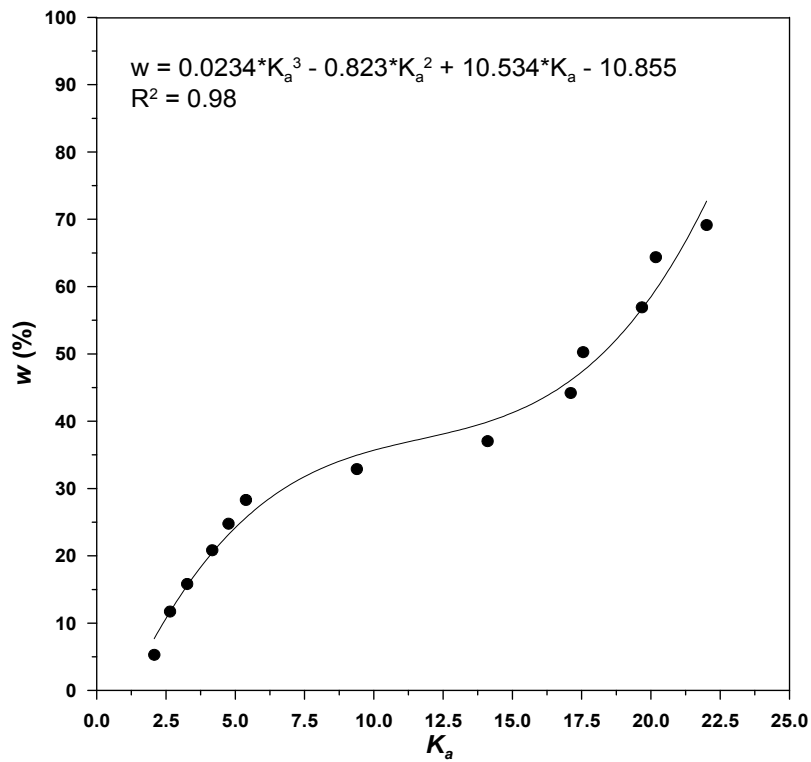


Figura 6 – Determinação das constantes da correlação entre w e K_a para o Solo 6.

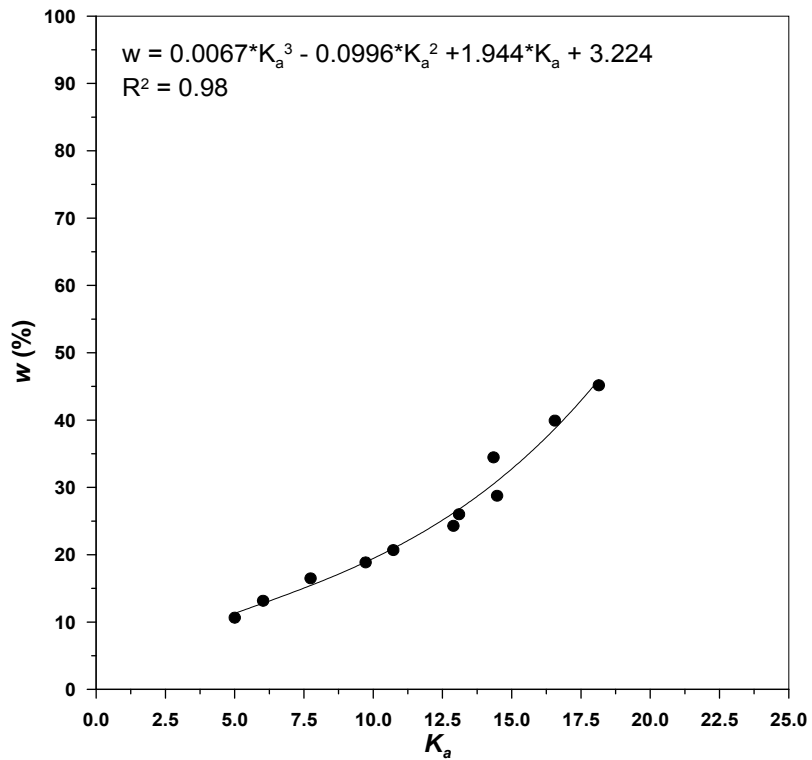


Figura 7 – Determinação das constantes da correlação entre w e K_a para o Solo 7.

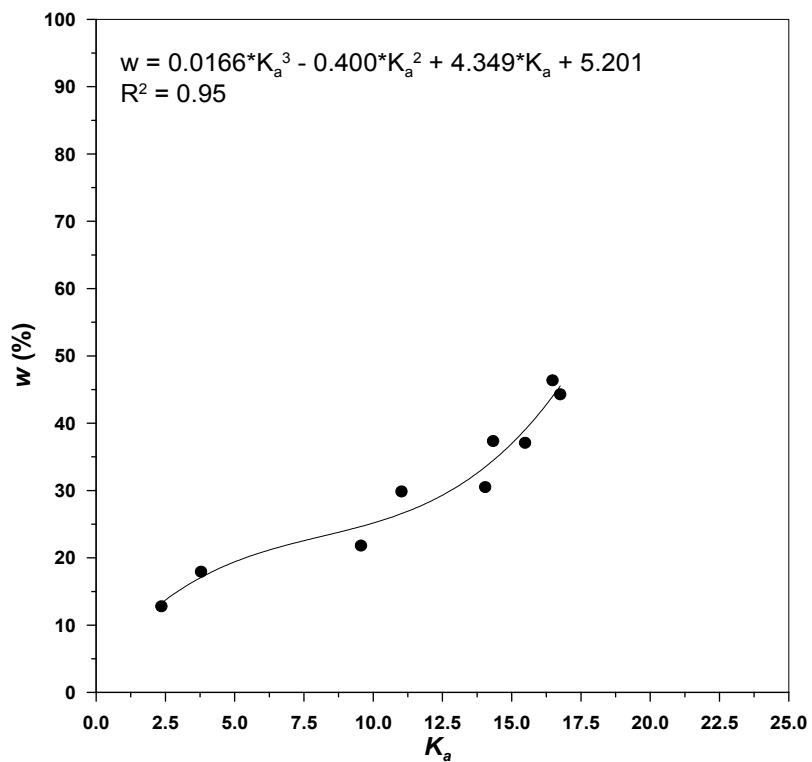


Figura 8 – Determinação das constantes da correlação entre w e K_a para o Solo 8.

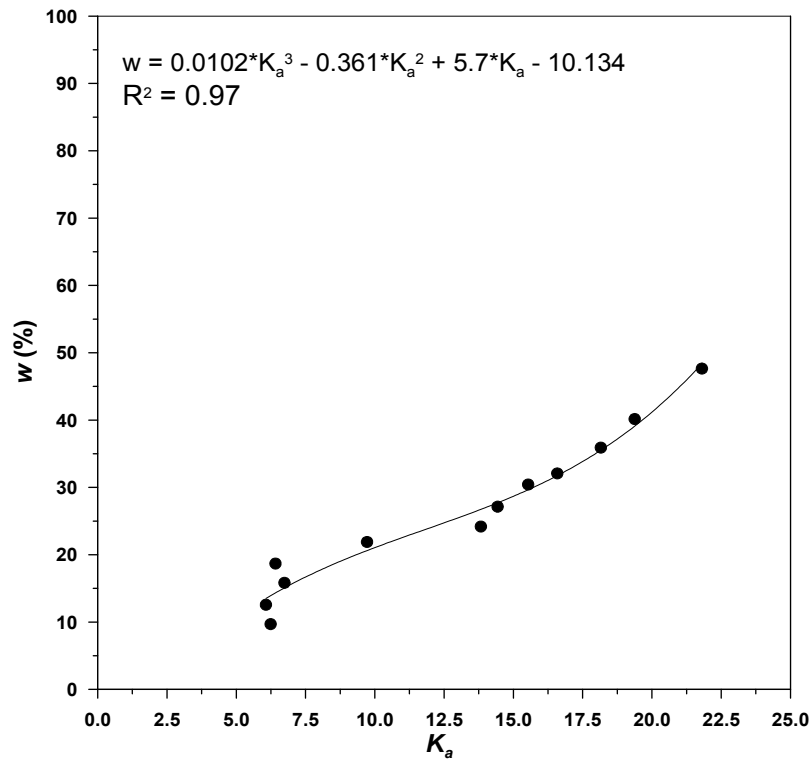


Figura 9 – Determinação das constantes da correlação entre w e K_a para o Solo 9.

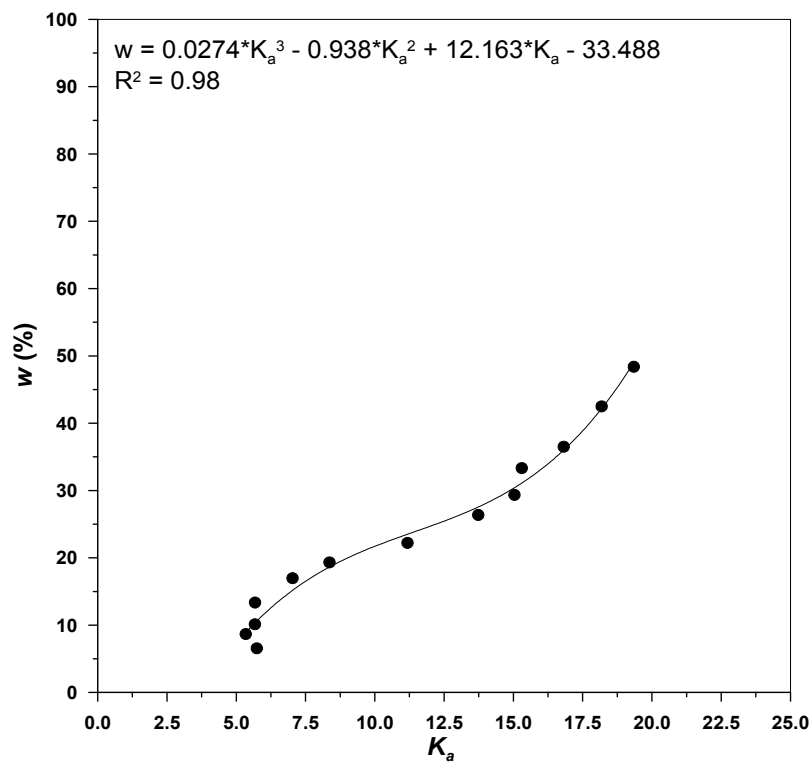


Figura 10 – Determinação das constantes da correlação entre w e K_a para o Solo 10.

ANEXO C – Correlações entre θ (%) e K_a

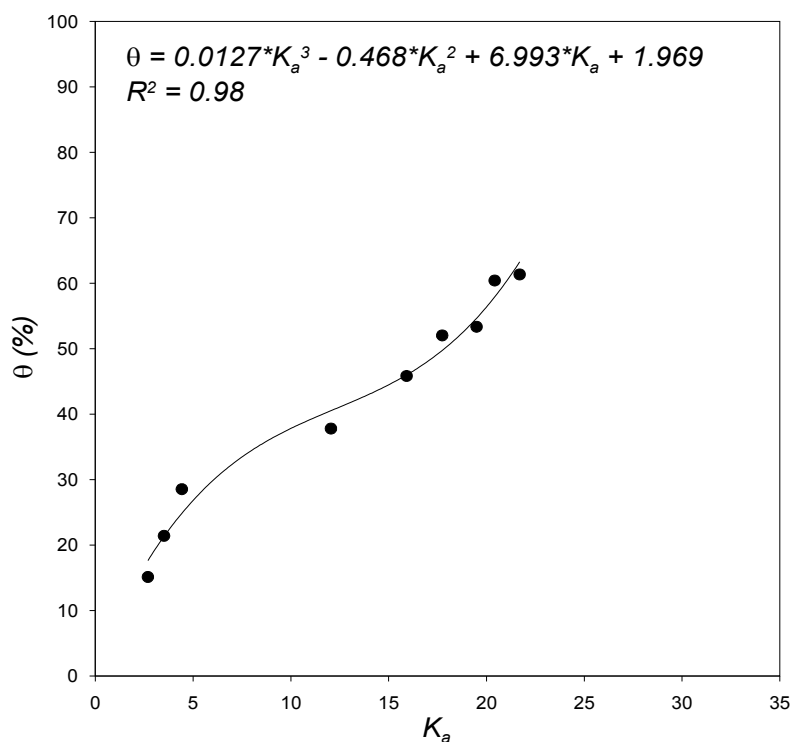


Figura 1 – Determinação das constantes da correlação entre θ e K_a para o Solo 1.

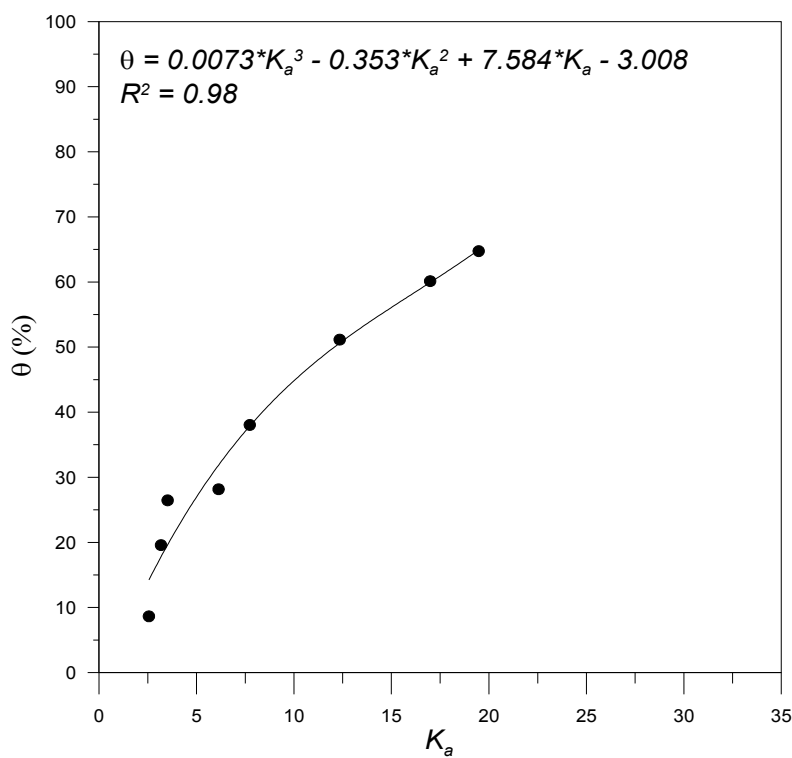


Figura 2 – Determinação das constantes da correlação de θ versus K_a para o Solo 2.

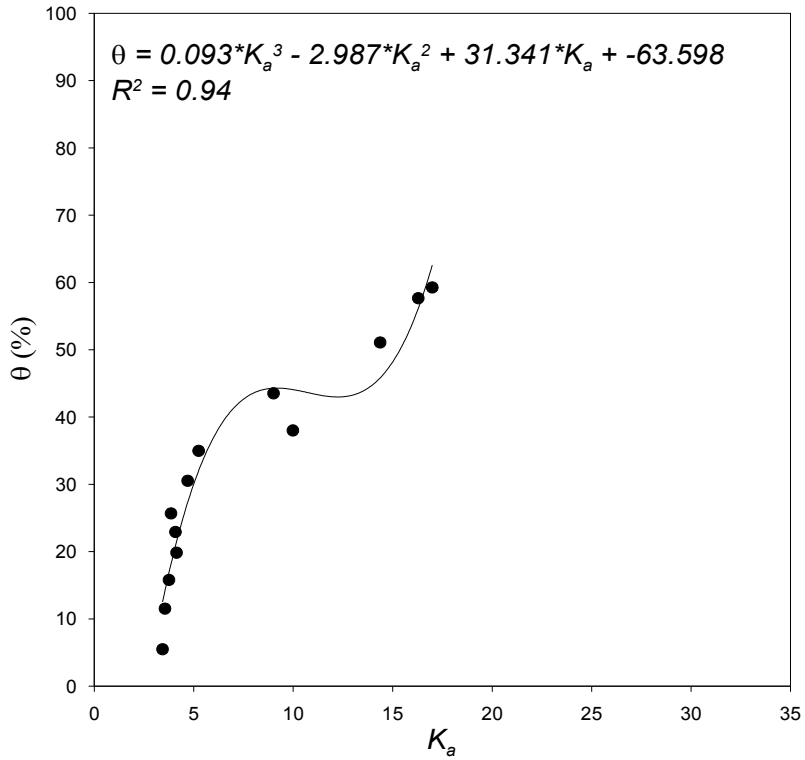


Figura 3 – Determinação das constantes da correlação de θ versus K_a para o Solo 3.

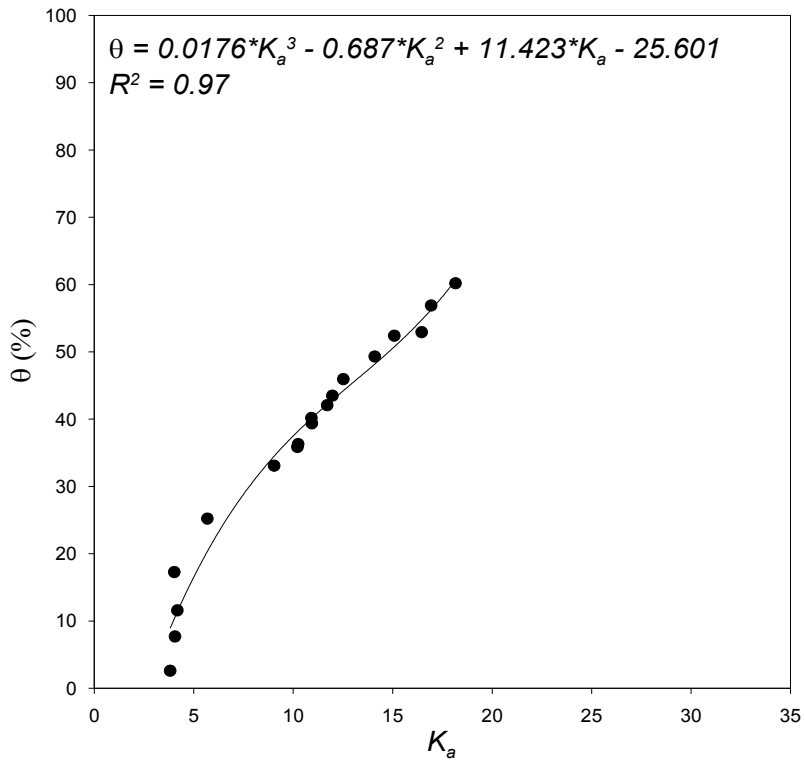


Figura 4 – Determinação das constantes da correlação de θ versus K_a para o Solo 4.

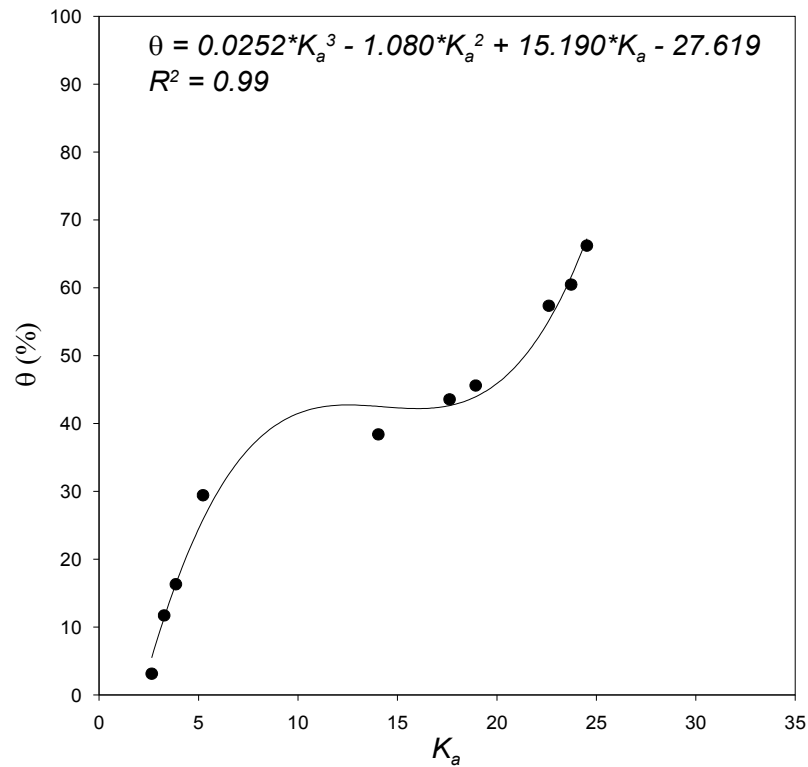


Figura 5 – Determinação das constantes da correlação de θ versus K_a para o Solo 5.

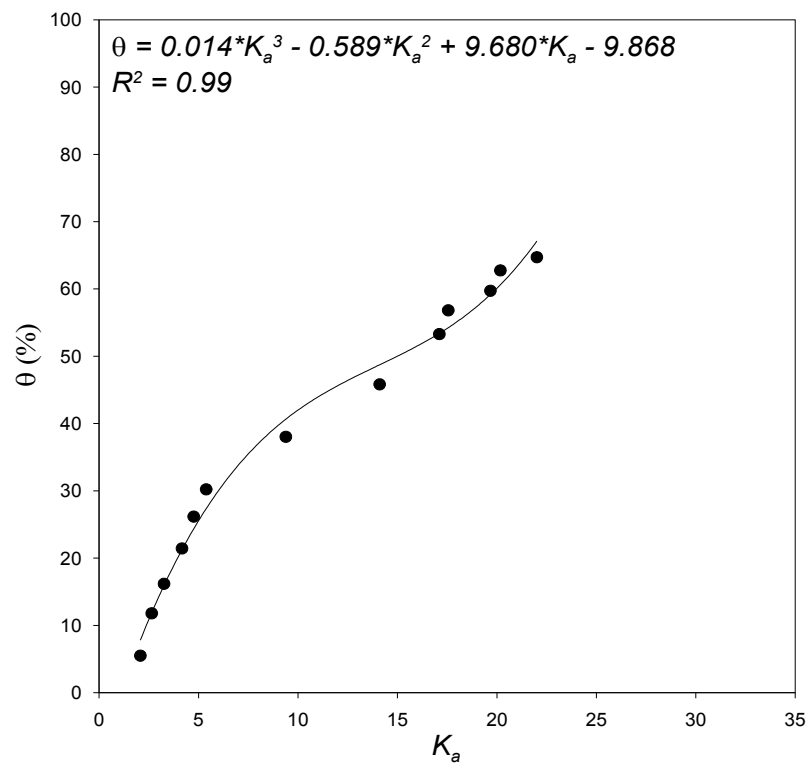


Figura 6 – Determinação das constantes da correlação de θ versus K_a para o Solo 6.

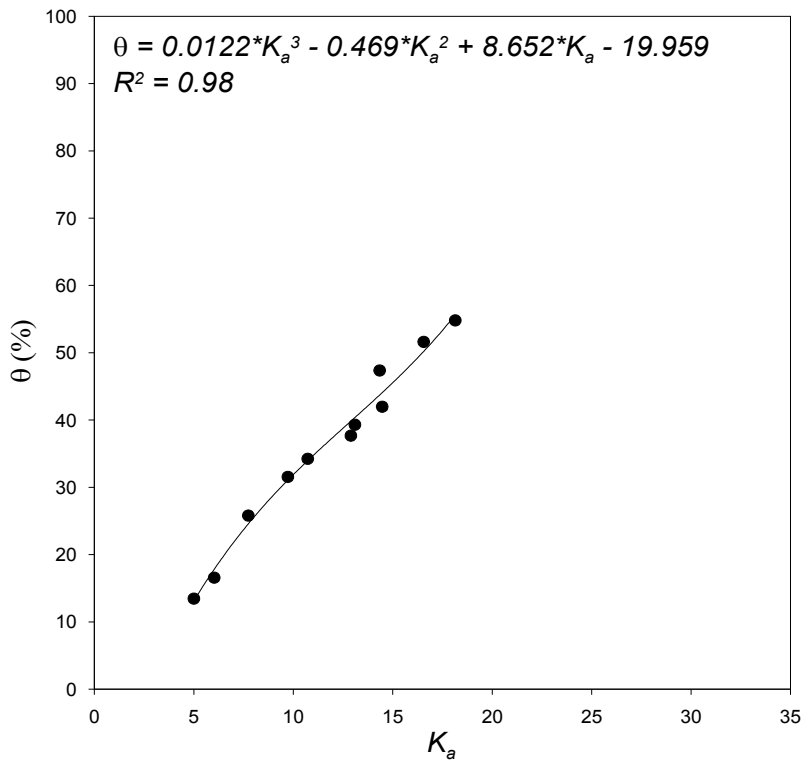


Figura 7 – Determinação das constantes da correlação de θ versus K_a para o Solo 7.

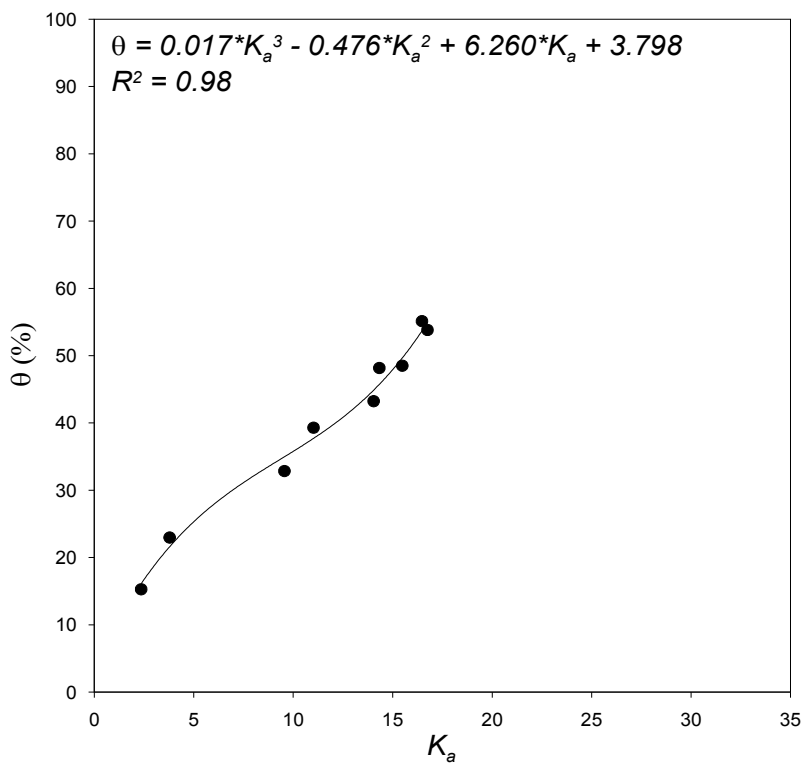


Figura 8 – Determinação das constantes da correlação de θ versus K_a para o Solo 8.

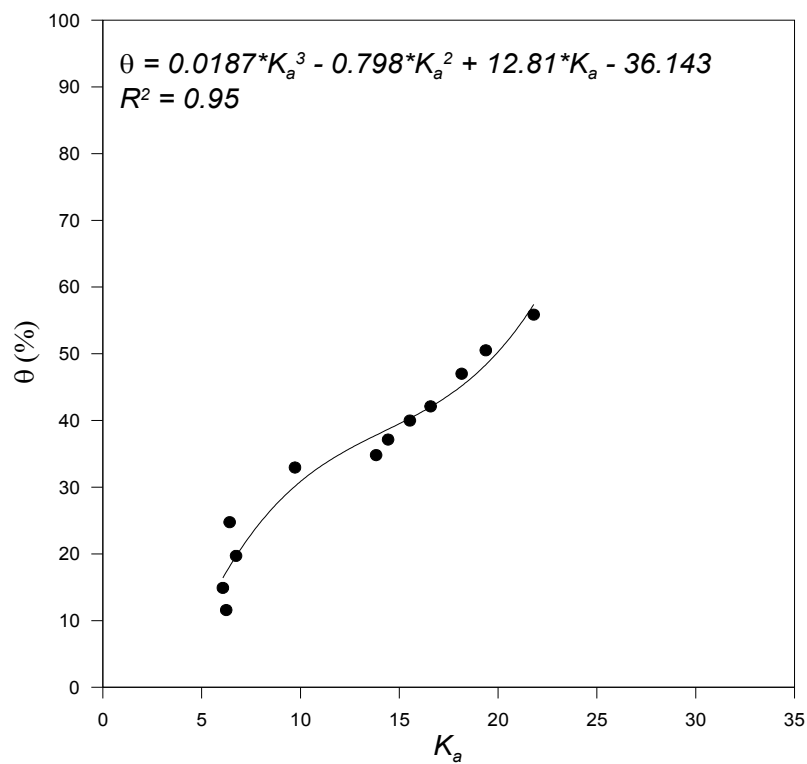


Figura 9 – Determinação das constantes da correlação de θ versus K_a para o Solo 9.

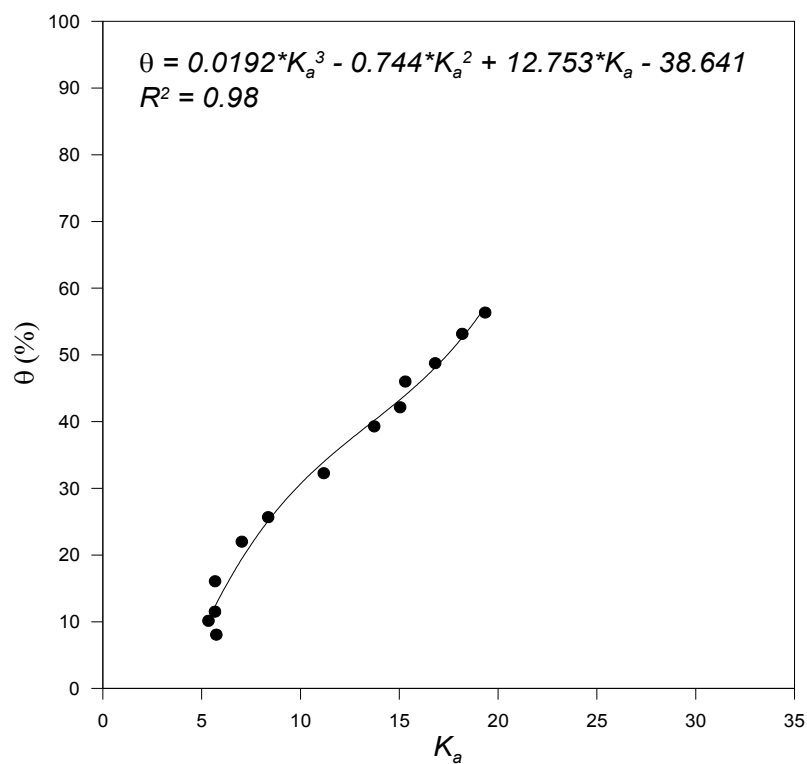


Figura 10 – Determinação das constantes da correlação de θ versus K_a para o Solo 10.

ANEXO D – Correlações Yu e Drnevich (2004) na condição não saturada

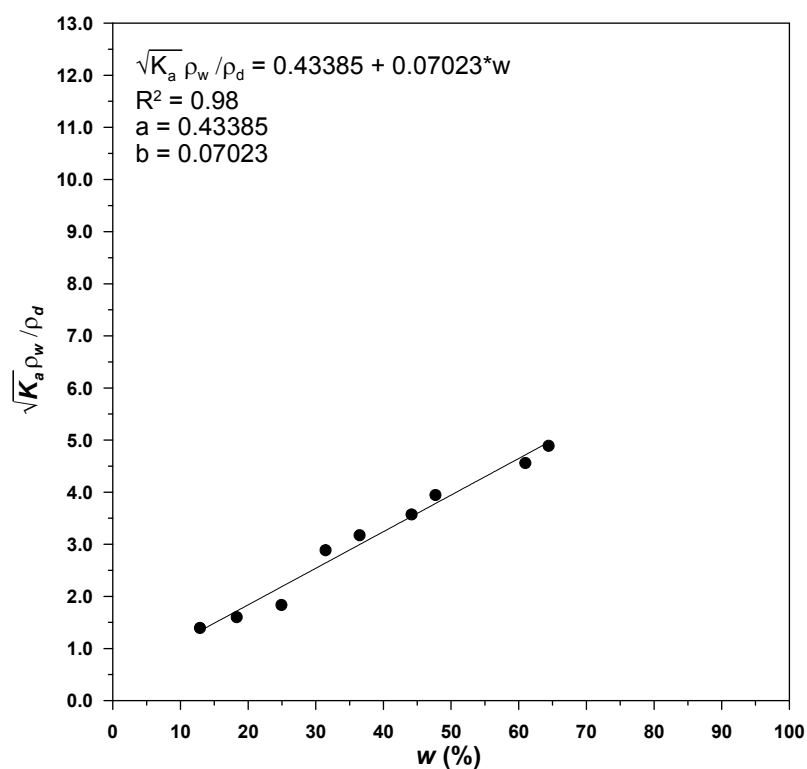


Figura 1 – Determinação das constantes a e b da correlação para o Solo 1.

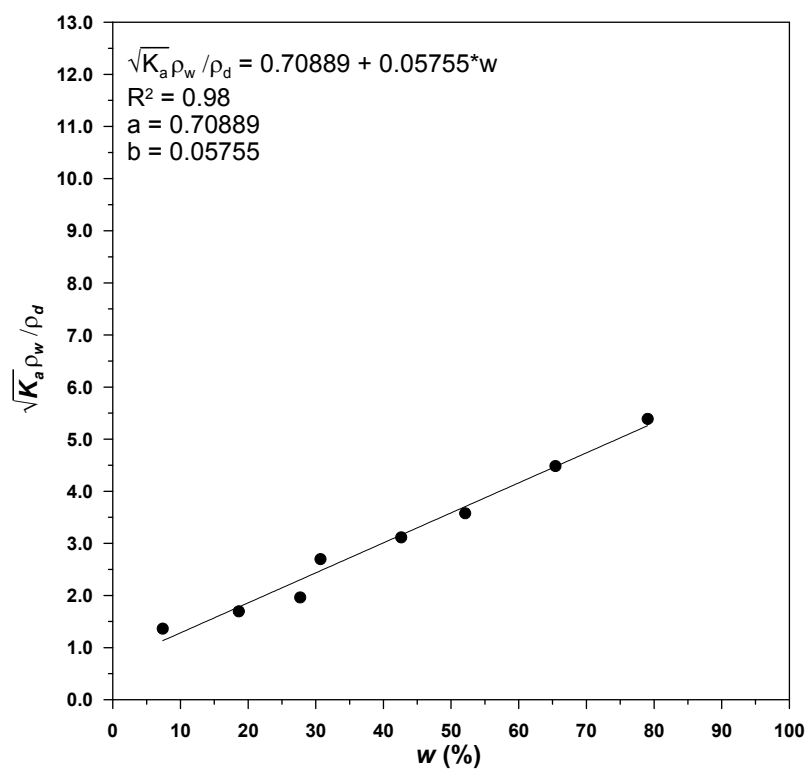


Figura 2 – Determinação das constantes a e b da correlação para o Solo 21

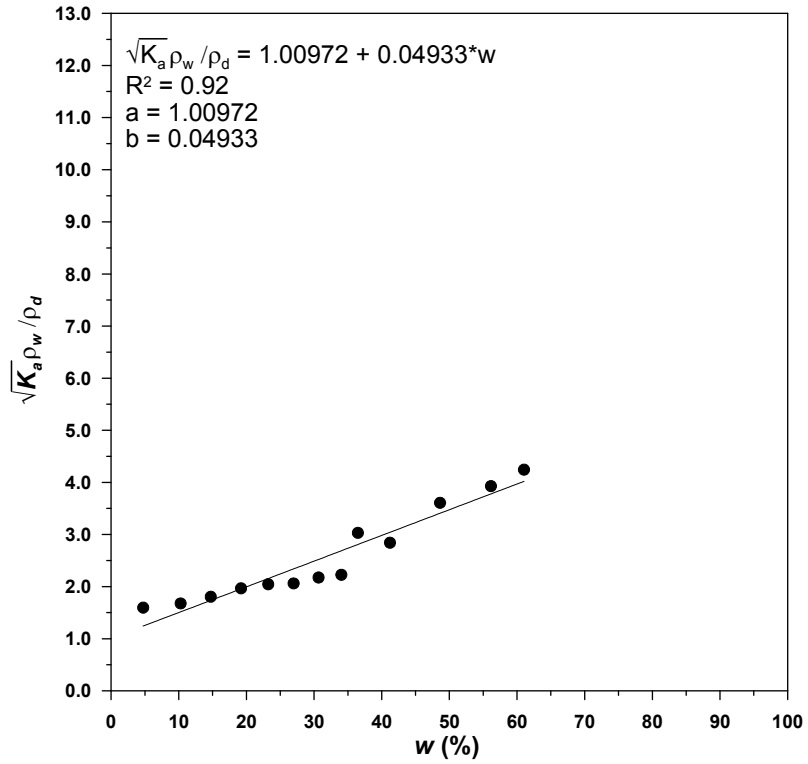


Figura 3 – Determinação das constantes a e b da correlação para o Solo 3.

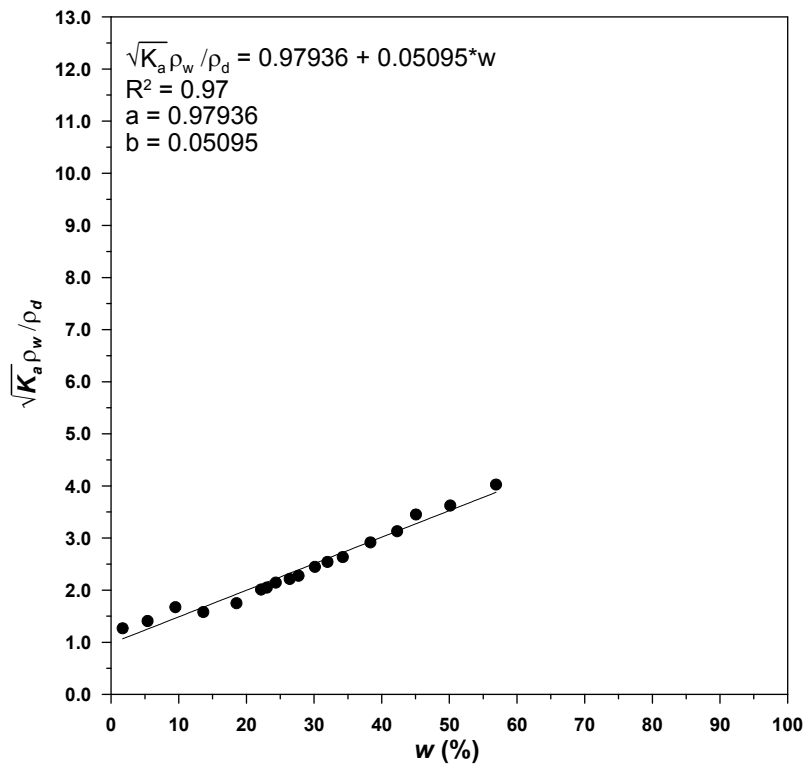


Figura 4 – Determinação das constantes a e b da correlação para o Solo 4.

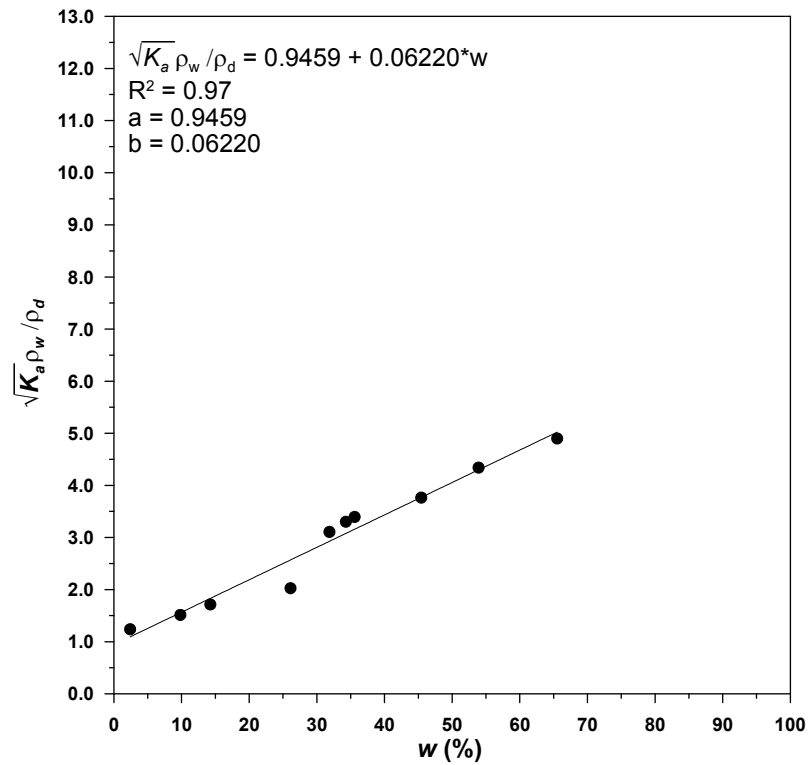


Figura 5 – Determinação das constantes a e b da correlação para o Solo 5.

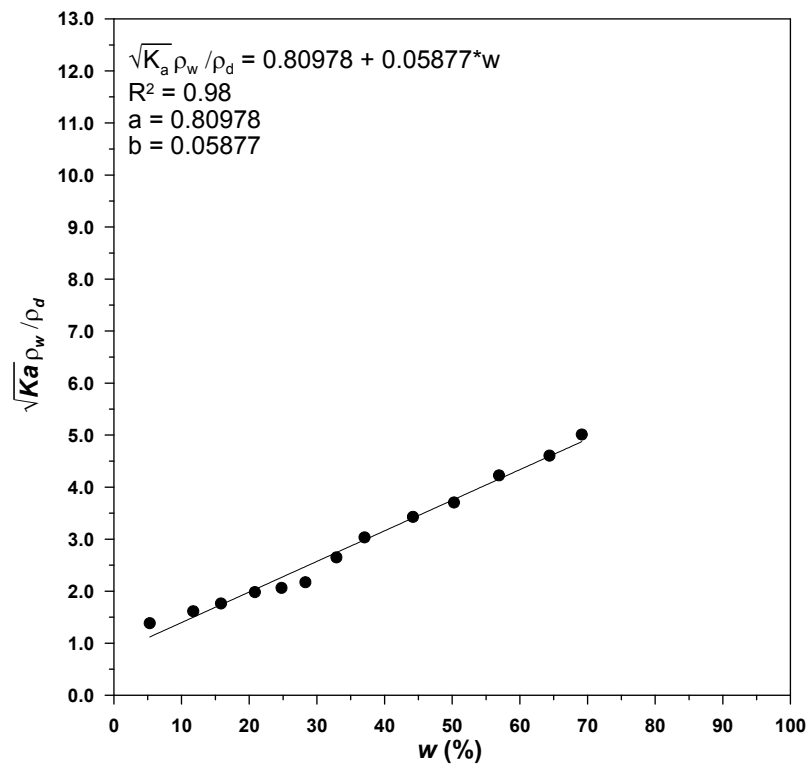


Figura 6 – Determinação das constantes a e b da correlação para o Solo 6.

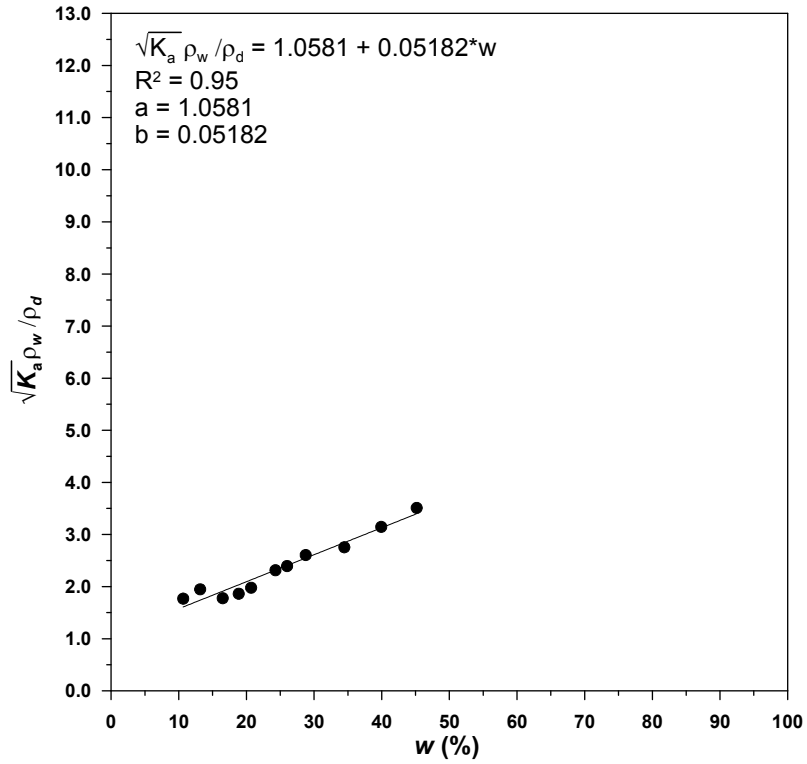


Figura 7 – Determinação das constantes *a* e *b* da correlação para o Solo 7.

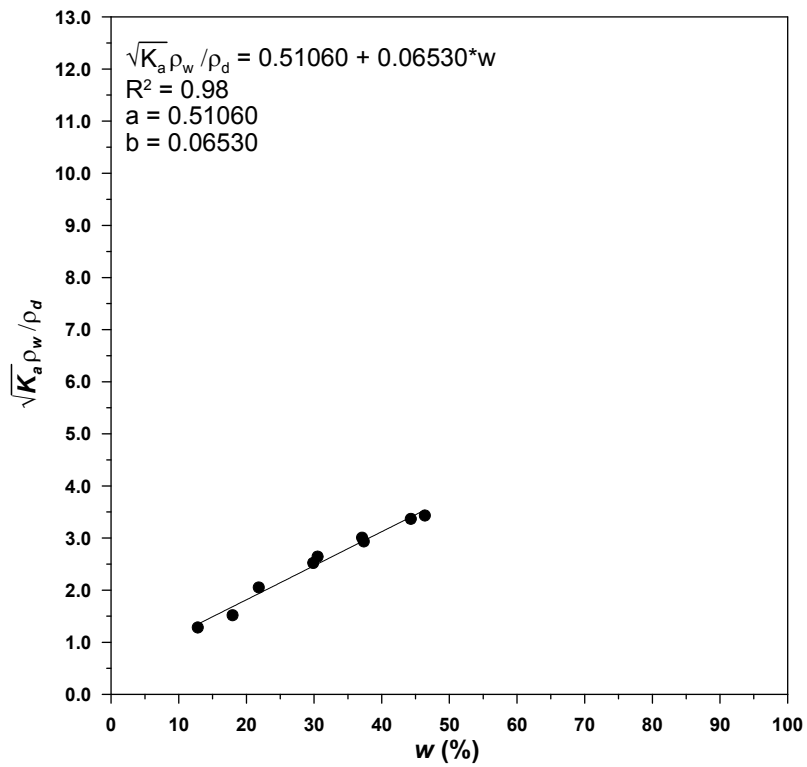


Figura 8 – Determinação das constantes *a* e *b* da correlação para o Solo 8.

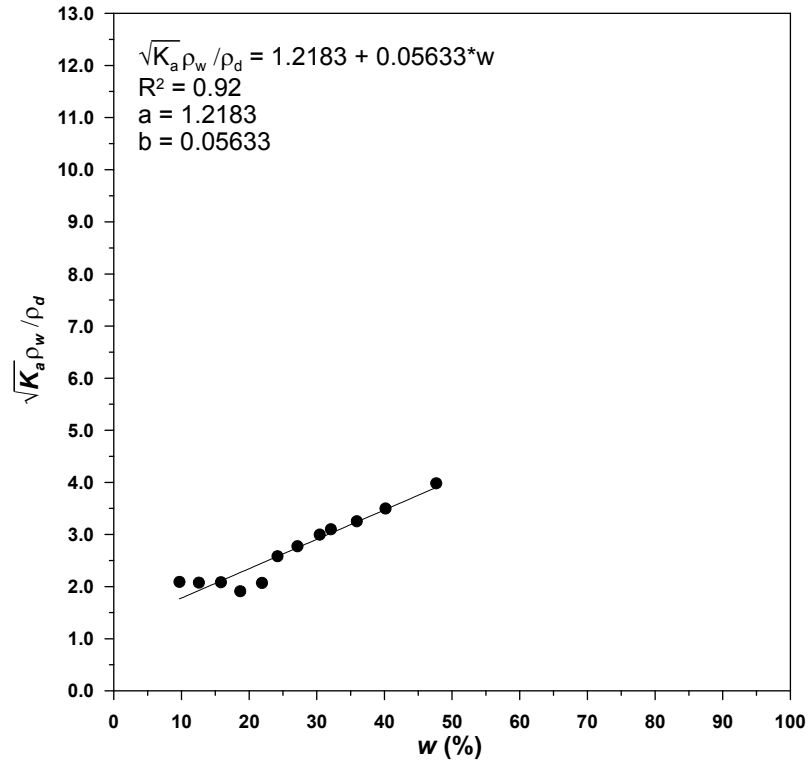


Figura 9 – Determinação das constantes a e b da correlação para o Solo 9.

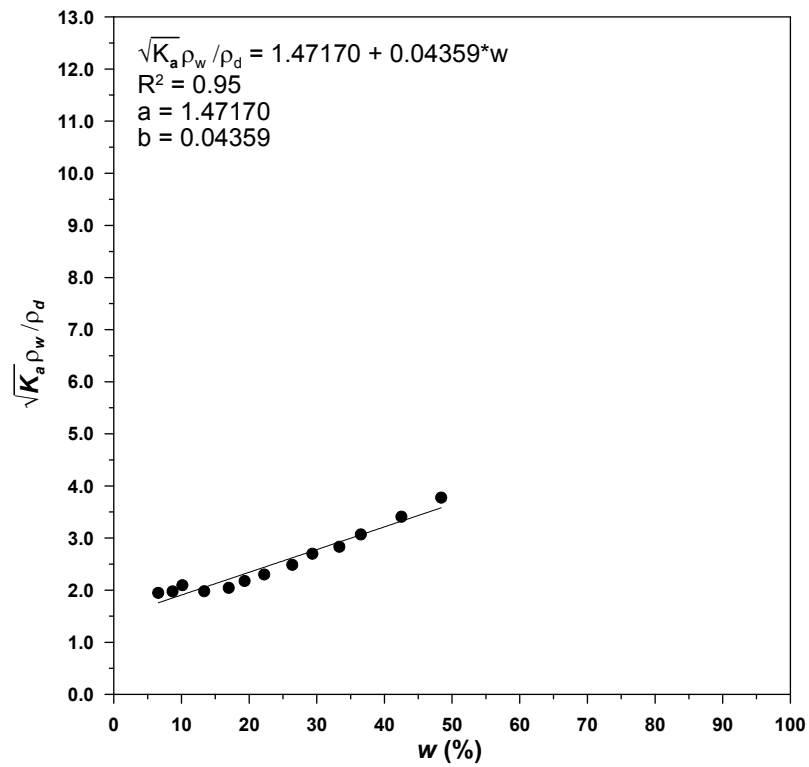


Figura 10 – Determinação das constantes a e b da correlação para o Solo 10.

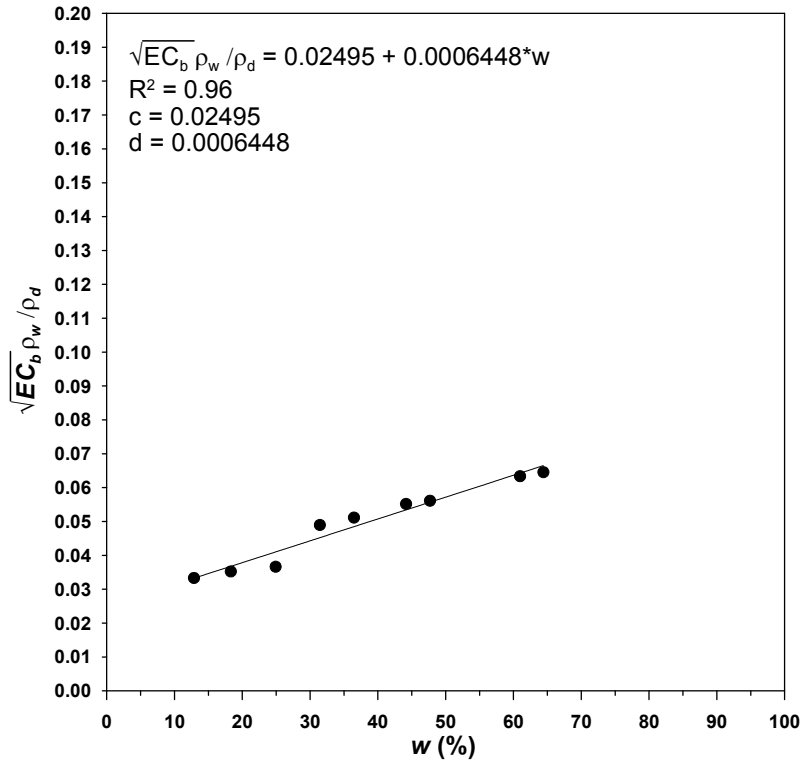


Figura 11 – Determinação das constantes *c* e *d* da correlação para o Solo 1.

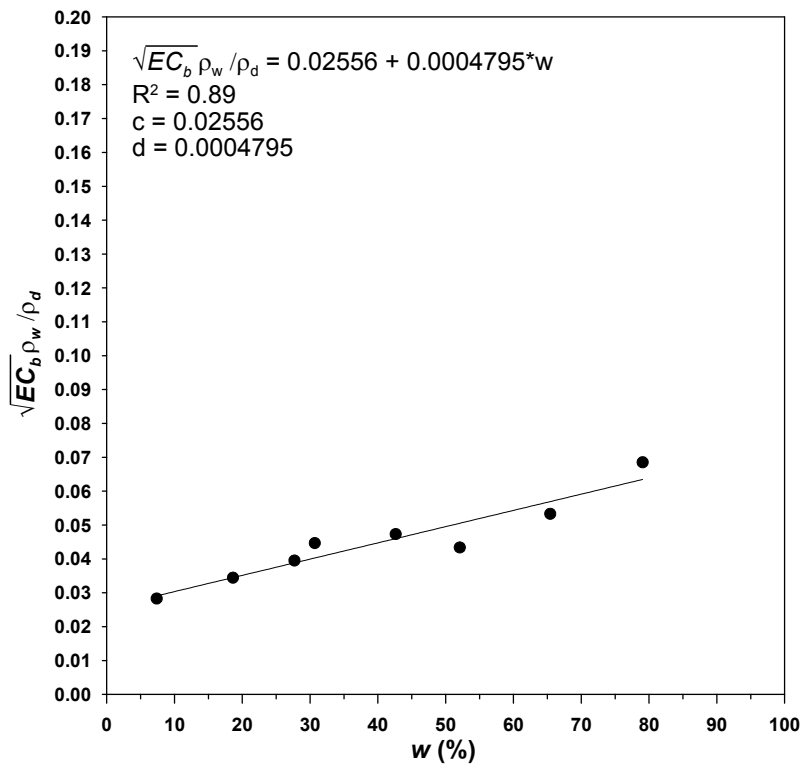


Figura 12 – Determinação das constantes *c* e *d* da correlação para o Solo 2.

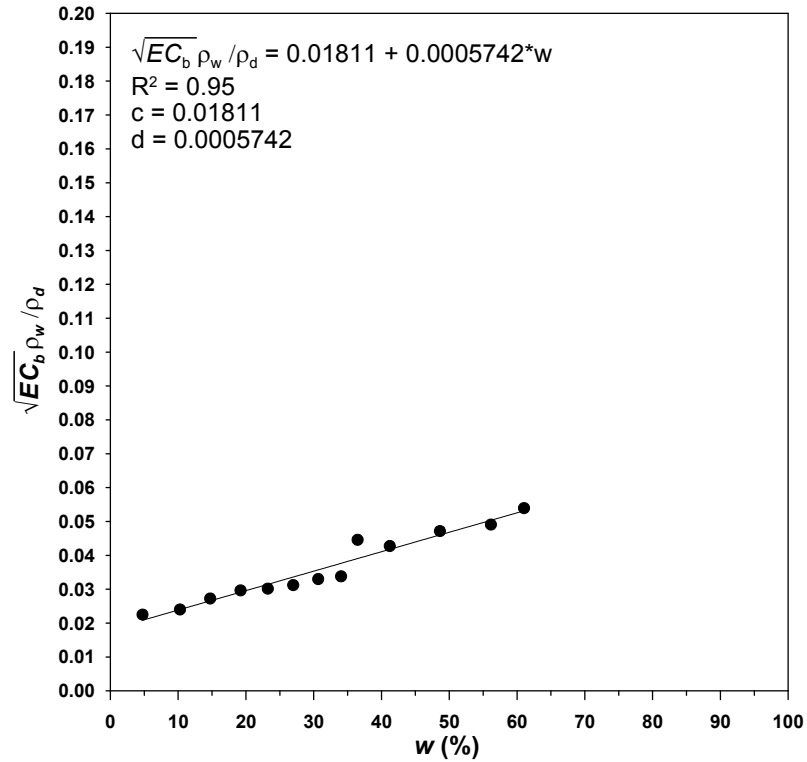


Figura 13 – Determinação das constantes c e d da correlação para o Solo 3.

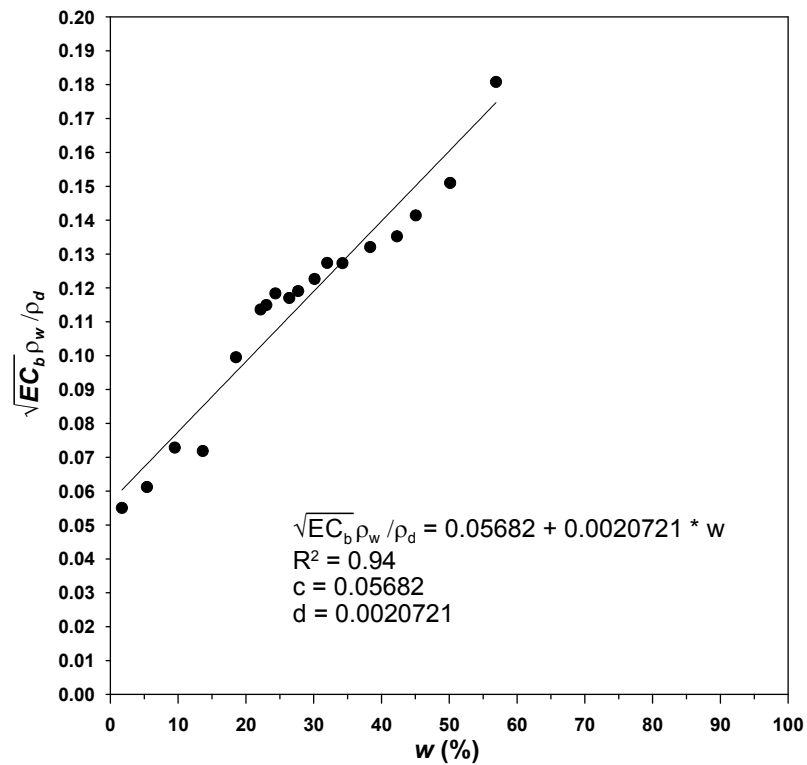


Figura 14 – Determinação das constantes c e d da correlação para o Solo 4.

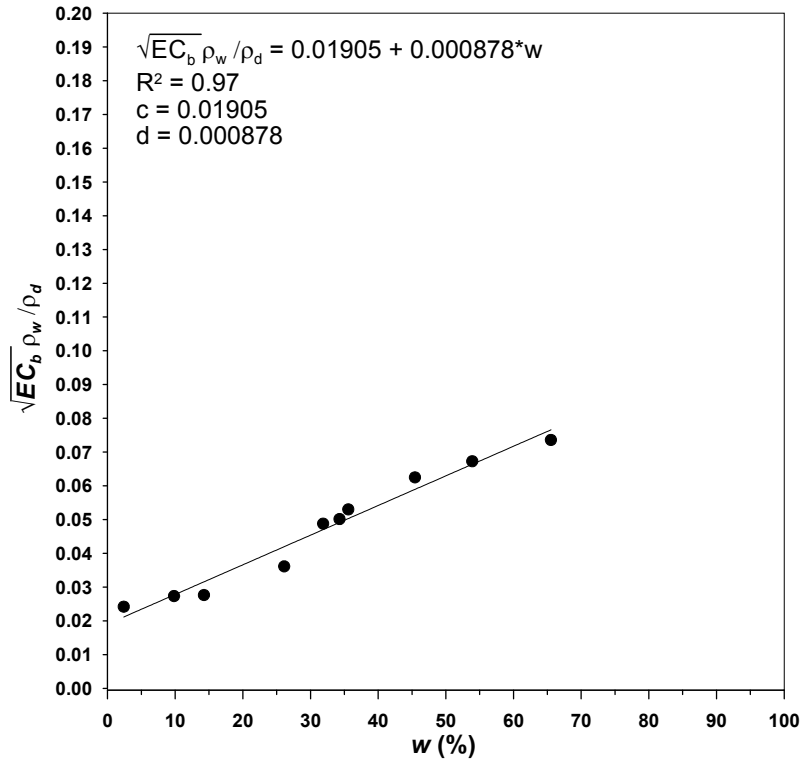


Figura 15 – Determinação das constantes *c* e *d* da correlação para o Solo 5.

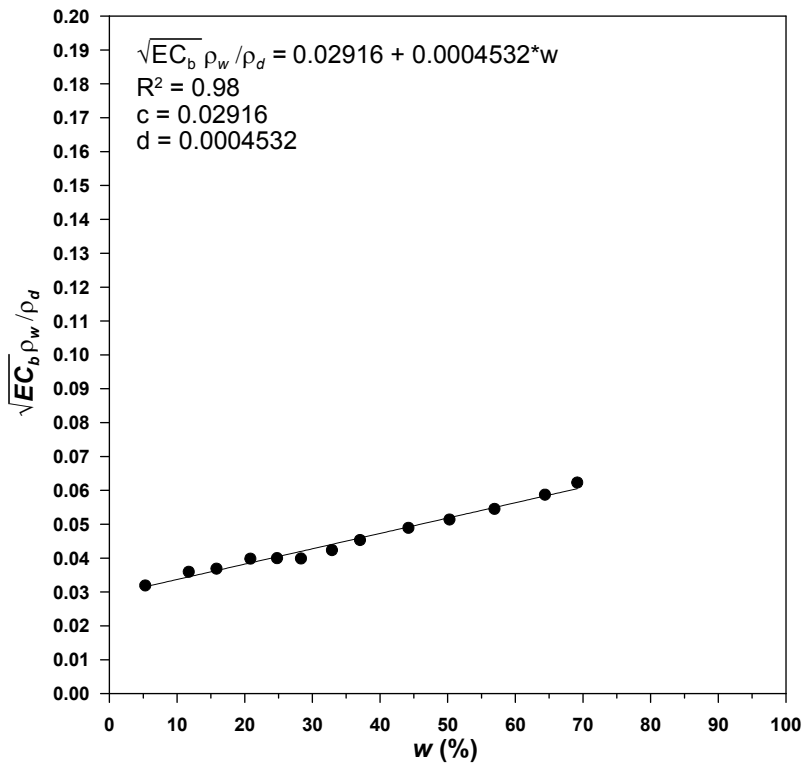


Figura 16 – Determinação das constantes *c* e *d* da correlação para o Solo 6.

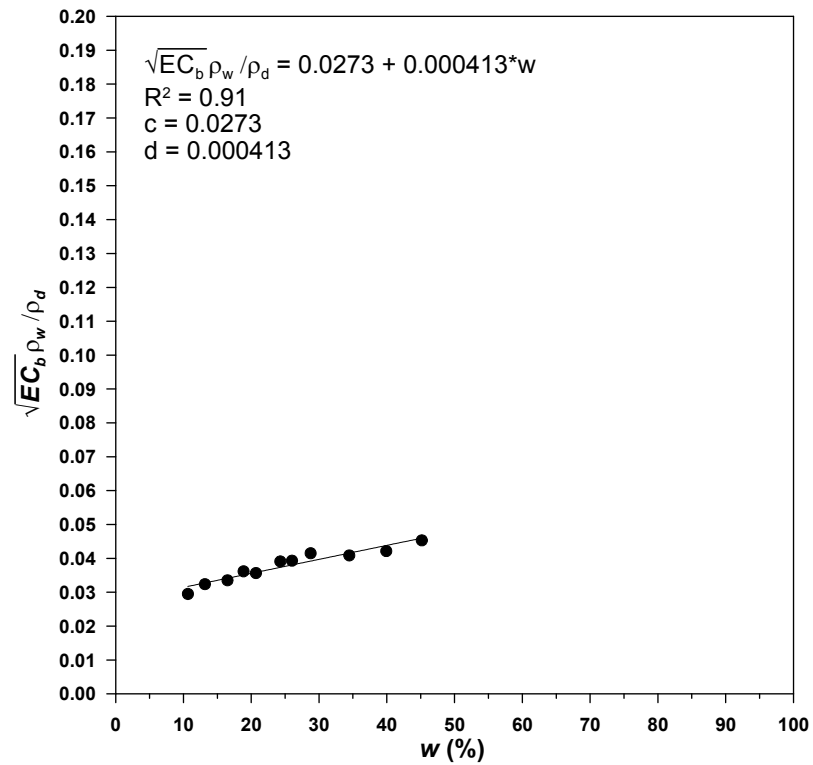


Figura 17 – Determinação das constantes c e d da correlação para o Solo 7.

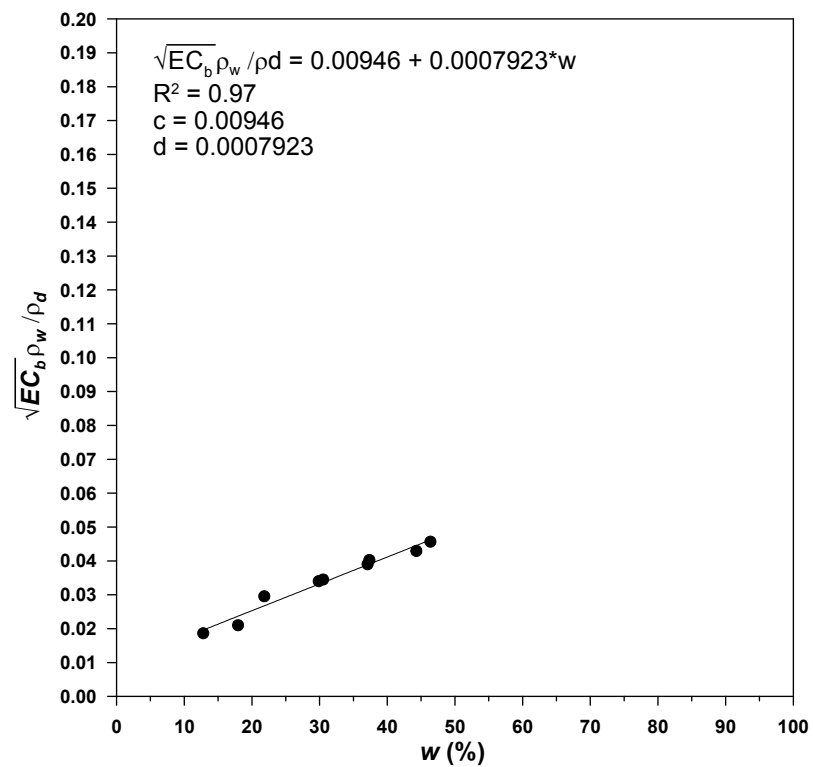


Figura 18 – Determinação das constantes c e d da correlação para o Solo 8.

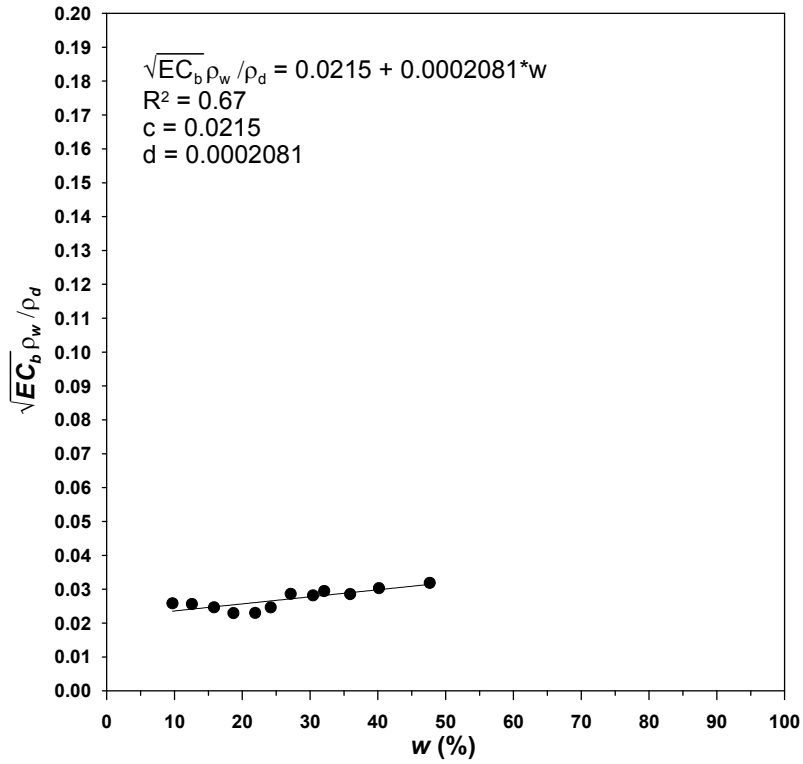


Figura 19 – Determinação das constantes *c* e *d* da correlação para o Solo 9.

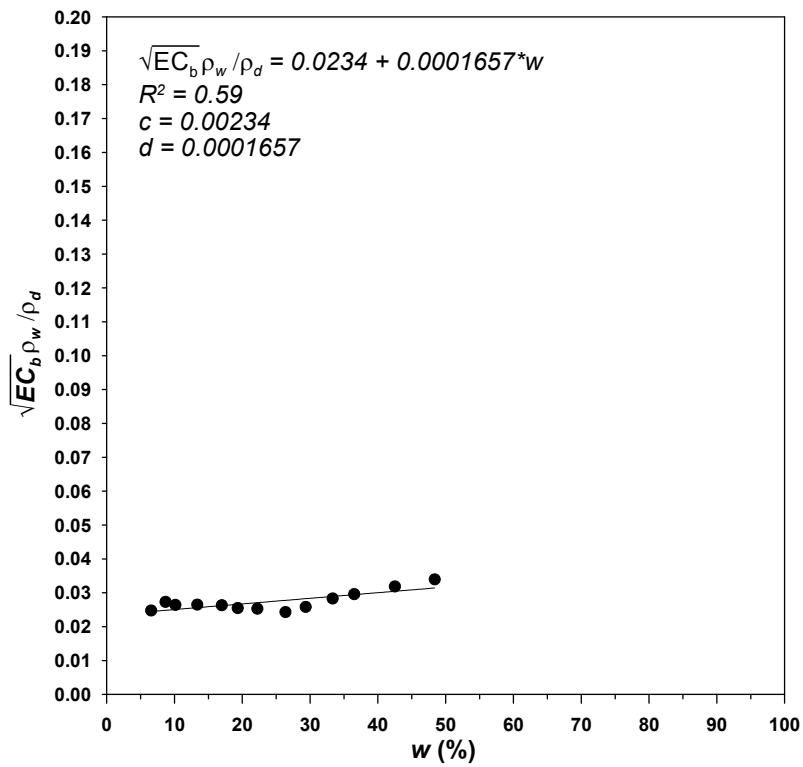


Figura 20 – Determinação das constantes *c* e *d* da correlação para o Solo 10.

ANEXO E – Correlações de Yu e Drnevich (2004) na condição saturada

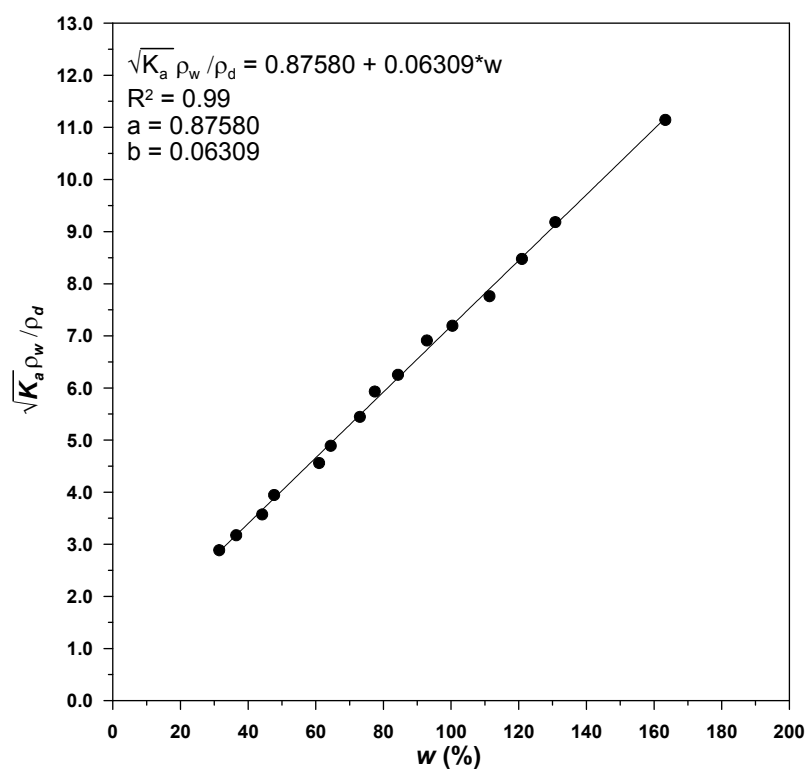


Figura 1 – Determinação das constantes a e b da correlação para o Solo 1.

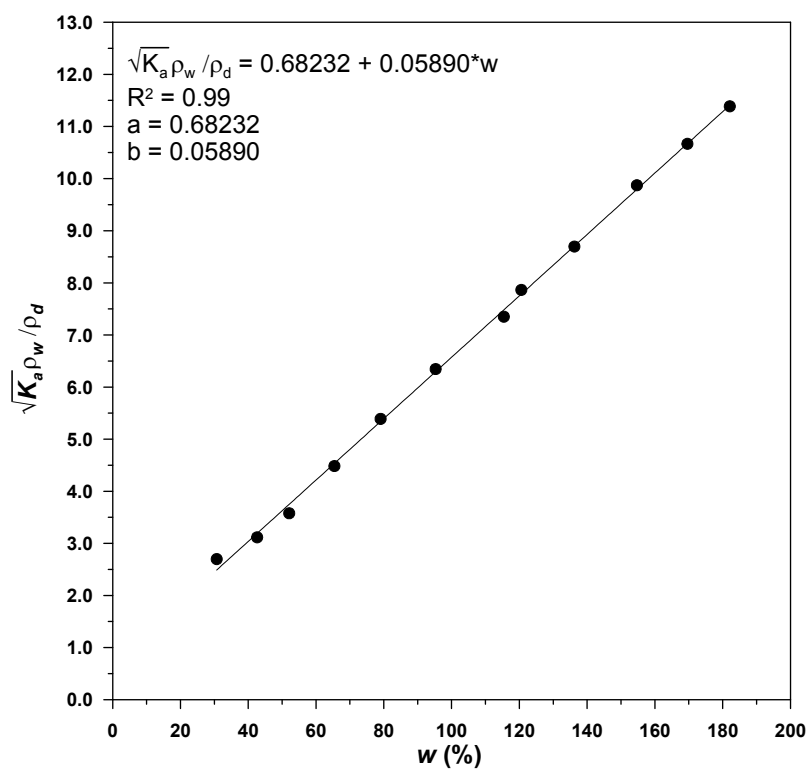


Figura 2 – Determinação das constantes a e b da correlação para o Solo 2.

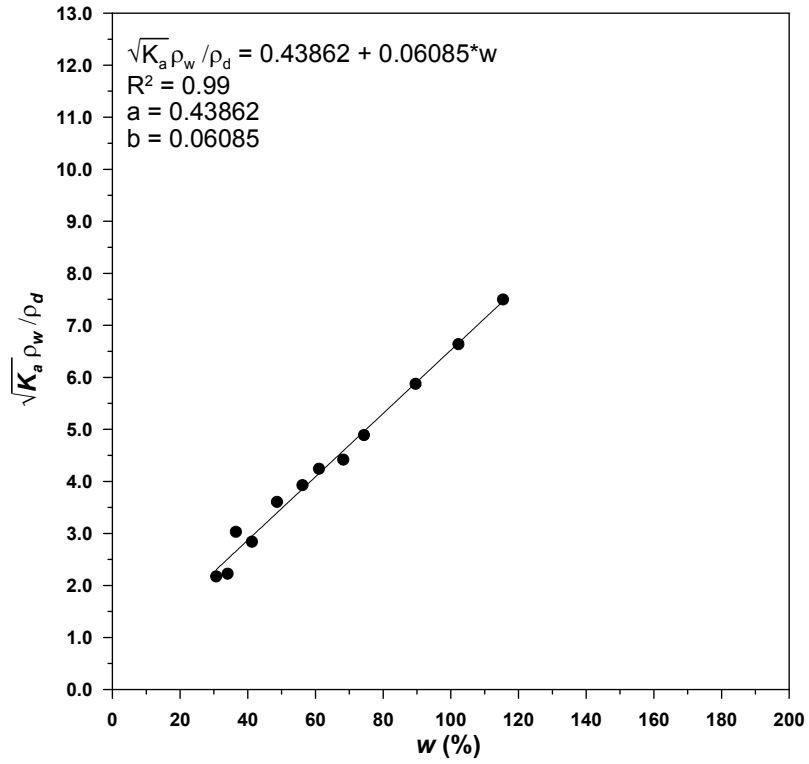


Figura 3 – Determinação das constantes a e b da correlação para o Solo 3.

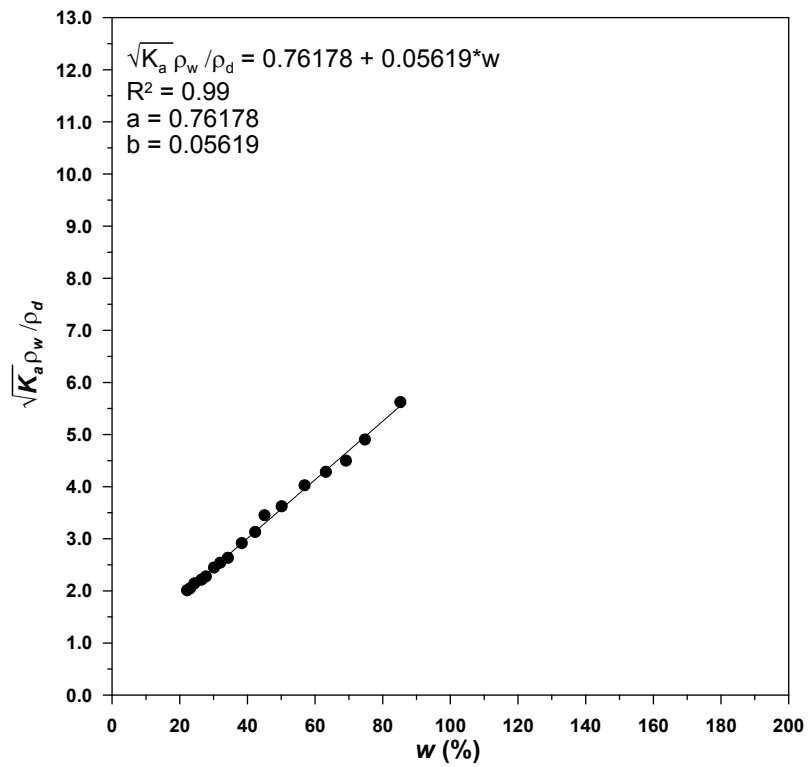


Figura 4 – Determinação das constantes a e b da correlação para o Solo 4.

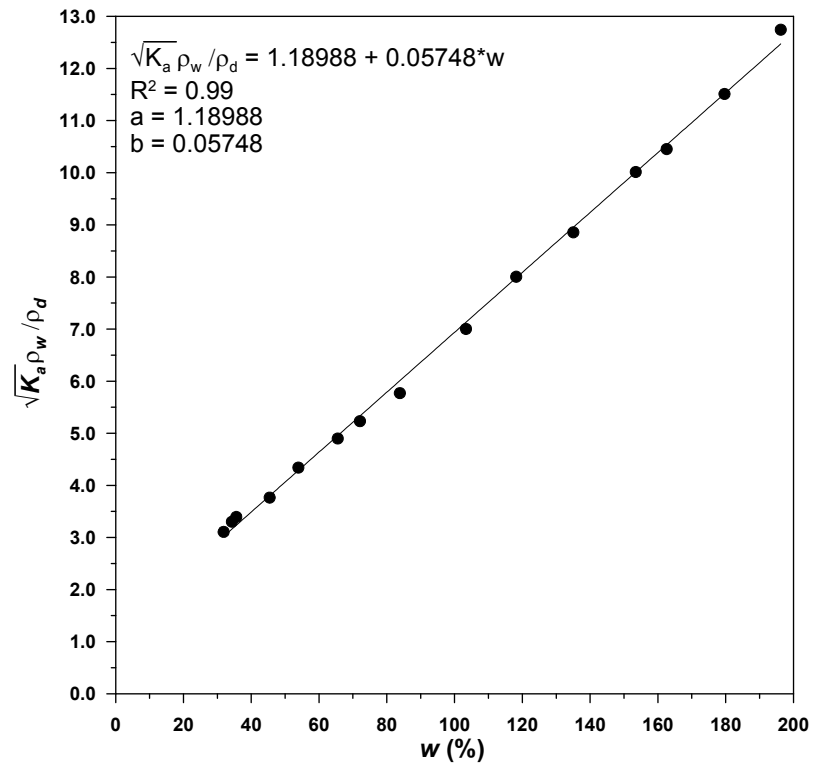


Figura 5 – Determinação das constantes a e b da correlação para o Solo 5.

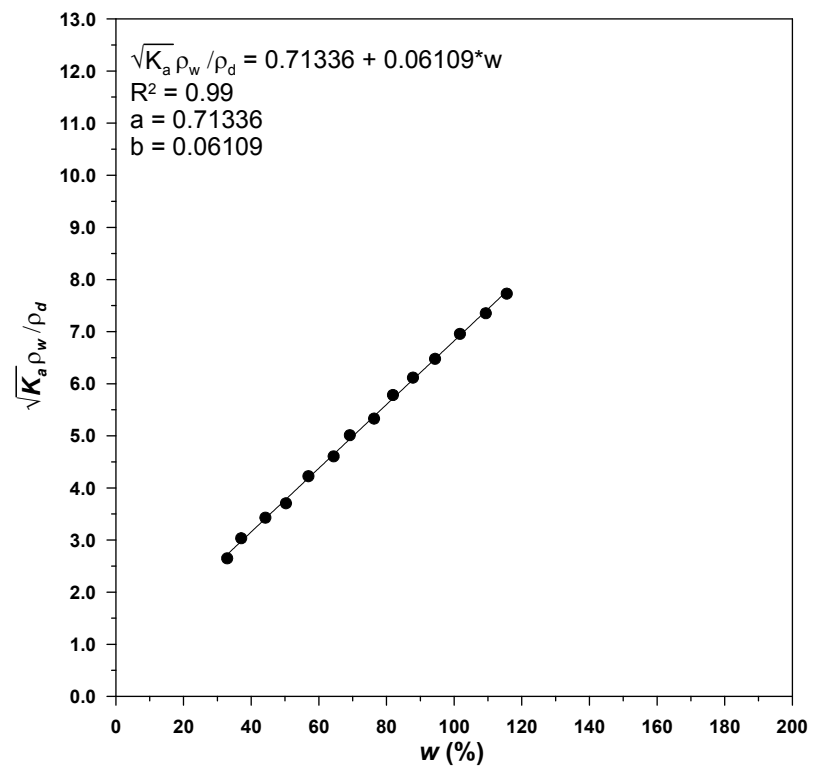


Figura 6 – Determinação das constantes a e b da correlação para o Solo 6.

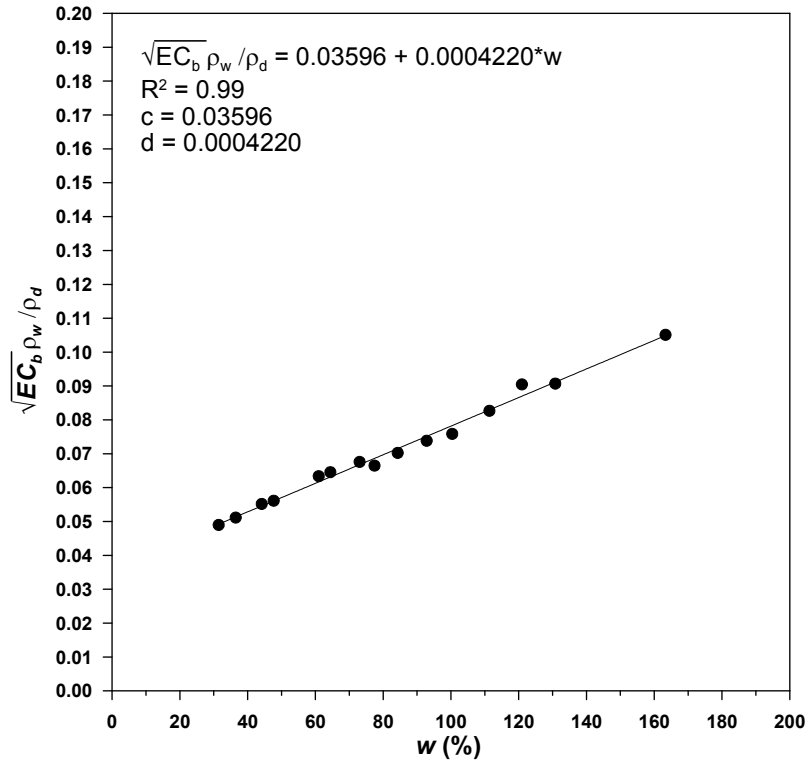


Figura 7 – Determinação das constantes c e d da correlação para o Solo 1.

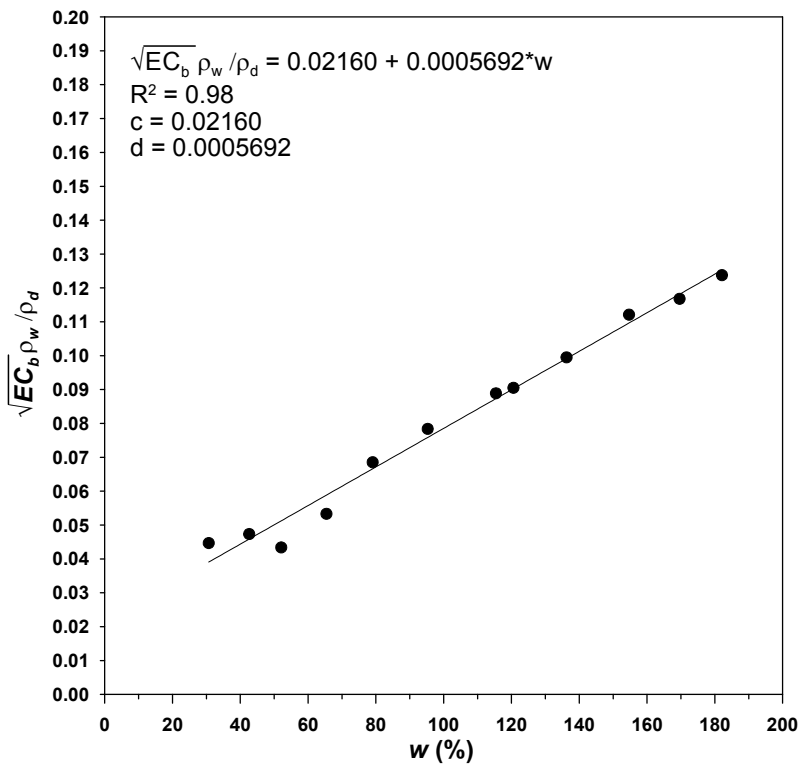


Figura 8 – Determinação das constantes c e d da correlação para o Solo 2.

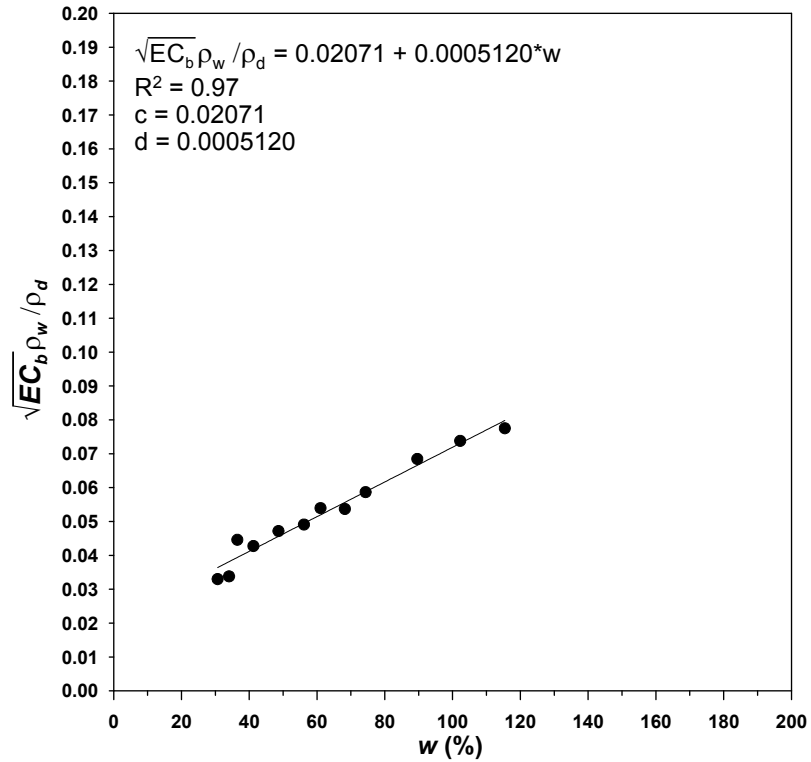


Figura 9 – Determinação das constantes c e d da correlação para o Solo 3.

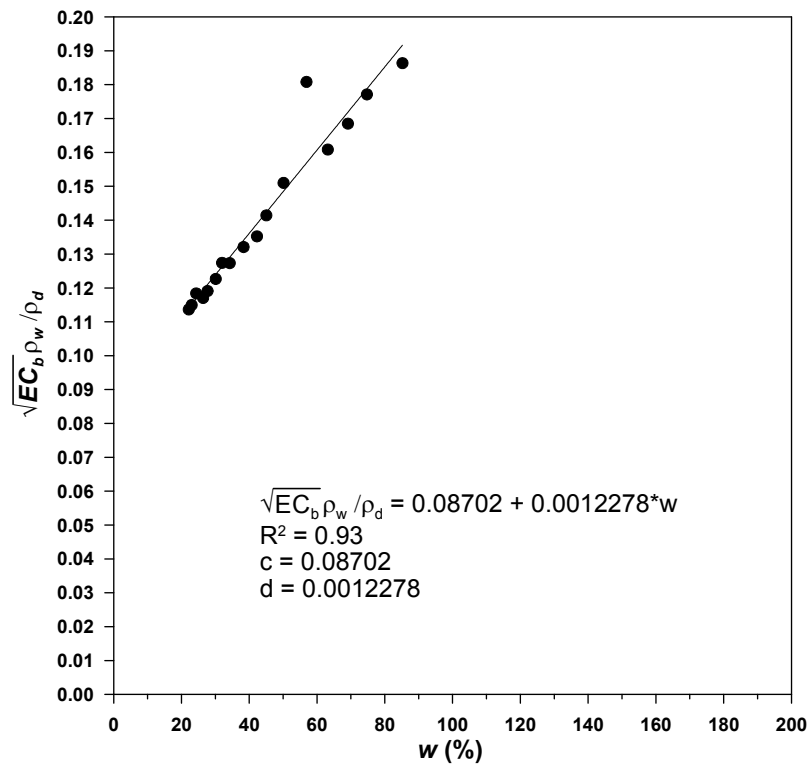


Figura 10 – Determinação das constantes c e d da correlação para o Solo 4.

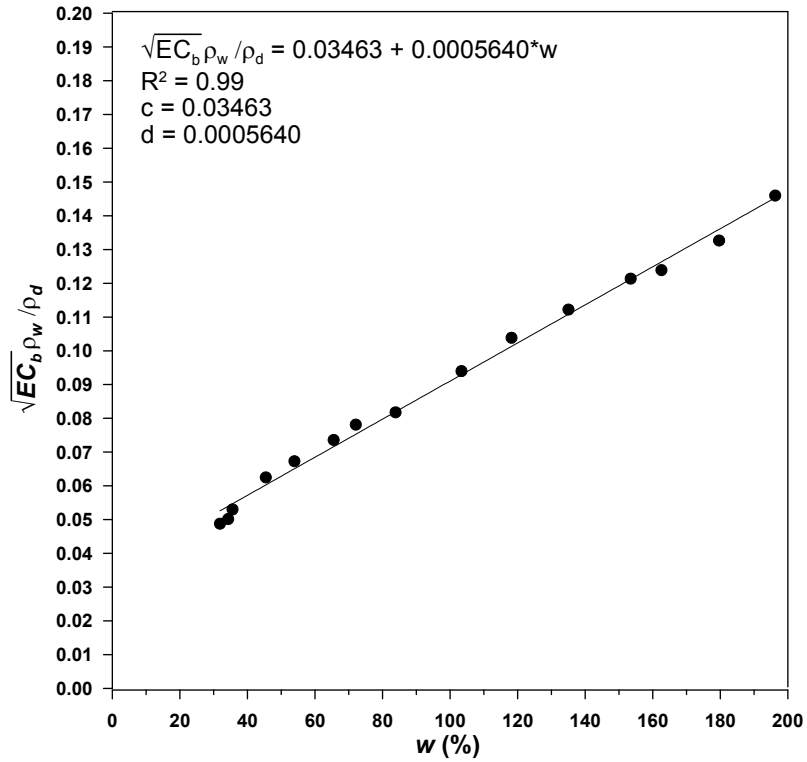


Figura 11 – Determinação das constantes c e d da correlação para o Solo 5.

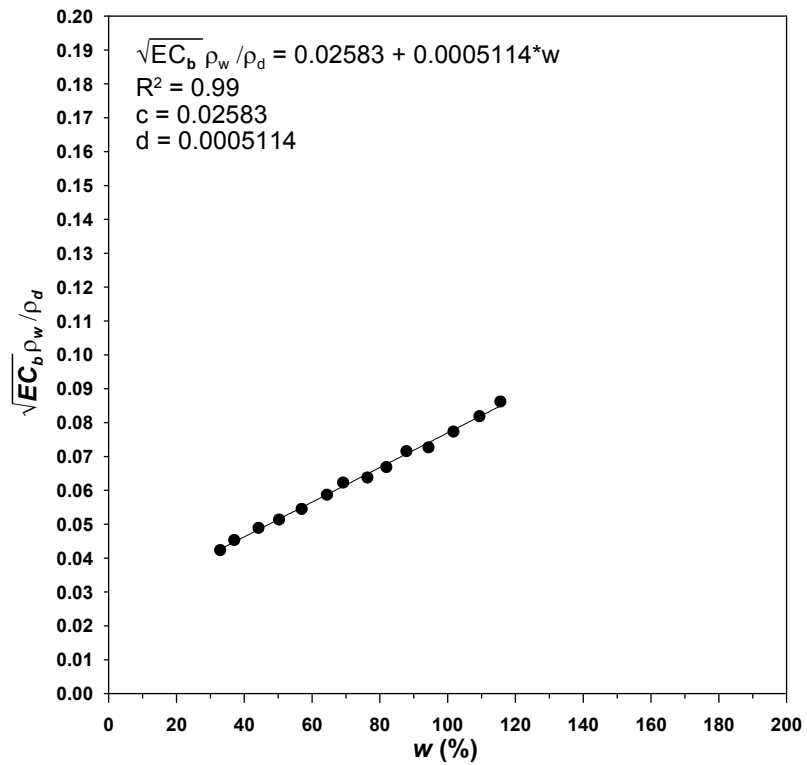


Figura 12 – Determinação das constantes c e d da correlação para o Solo 6.