

**KATERIN GUERRERO DORIA**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA SONDA TDR HELICOIDAL PARA  
USO EM CONJUNTO COM ENSAIO CPT**

Dissertação de Mestrado 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. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Heraldo Luiz Giacheti

São Carlos - SP

2015

**Trata-se da versão corrigida da dissertação. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o programa de Pós-Graduação em Geotecnia**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

G696d Guerrero Doria, Katerin  
DESENVOLVIMENTO DE UMA SONDA TDR HELICOIDAL PARA  
USO EM CONJUNTO COM ENSAIO CPT / Katerin Guerrero  
Doria; orientador Heraldo Luis Giacheti. São Carlos,  
2015.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação  
e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de  
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,  
2015.

1. Reflectometria no domínio do tempo (TDR). 2.  
Sonda helicoidal. 3. Ensaio de penetração de cone  
(CPT). 4. Teor de umidade . 5. Constante dielétrica. I.  
Título.

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **KATERIN GUERRERO DORIA**.

Título da dissertação: "Desenvolvimento de uma sonda TDR helicoidal para uso em conjunto com ensaio CPT".

Data da defesa: 21/08/2015

### Comissão Julgadora:

### Resultado:

Prof. Dr. **Heraldo Luiz Giacheti (Orientador)**

(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP - Bauru)

Aprovada

Prof. Dr. **Edmundo Rogério Esquivel**

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovada

Dr. **Carlos Manoel Pedro Vaz**

(Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/EMBRAPA)

Aprovada

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:

Prof. Dr. **Edmundo Rogério Esquivel**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**



Primeiramente a Deus por me permitir nascer na minha maravilhosa família, me tornando mais forte e por poder sentir seu amor incondicional.

A minha mãe por me brindar seu amor e me ensinar a ser cada dia um melhor ser humano. A meu pai que, apesar de todas as dificuldades, sempre me fortaleceu.

Aos meus irmãos e sobrinha, por me apoiarem em todas as minhas decisões; vocês são meu exemplo.

Ao Guido, o amor da minha vida, por seu carinho, ajuda, apoio e confiança. Por estar ao meu lado sempre e me fazer feliz cada dia.



# AGRADECIMENTOS

---

Ao professor Heraldo Luiz Giacheti, pela orientação e disposição para me ajudar em todo momento da pesquisa, mais ainda na realização dos ensaios de campo.

Ao técnico e amigo Oscar dos Santos, por todo seu apoio na parte experimental, por seus conselhos e paciência. Principalmente pela amizade.

Ao professor Orenco Monje Vilar, pelo interesse na pesquisa e por todas sugestões e recomendações.

Ao Dr. Carlos Manoel Pedro Vaz da EMBRAPA, pelas muitas contribuições ao trabalho e por toda sua ajuda e tempo dedicado.

Ao colega Breno Rocha, por me auxiliar na realização dos ensaios de campo e pelos bons conselhos durante o mestrado.

Aos Professores e Funcionários do Departamento de Geotecnia da EESC-USP, por compartilhar seus conhecimentos e ao Heriberto, pela e disposição e apoio técnico.

Aos técnicos Sérgio e Gustavo, da Unesp de Bauru, e Edson, Pedro e Flavio, da oficina do Departamento de Mecânica da EESC-USP, pelo apoio na parte experimental.

Aos amigos Zorany, Juliana, Tálita, Moises, Ingrid, Tatiane, Sergio e Julieth, pelos bons momentos compartilhados.

Ao casal Raquel de Faria e Renato Monaro, por serem tão especiais, fazendo-me sentir como em casa.

Ao CNPq, pela bolsa de estudo concedida para a realização do programa de mestrado.



# RESUMO

---

**DORIA, K.G. Desenvolvimento de uma Sonda TDR Helicoidal para Uso em Conjunto com o Ensaio CPT.** 2015. 156 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

A reflectometria no domínio do tempo permite estimar o teor de umidade de um meio através da sua correlação com a constante dielétrica. Uma sonda helicoidal TDR, que pode ser cravada em conjunto outros ensaios de penetração in situ para a estimativa do teor de umidade em diversas profundidades, tem aplicação interessante para a investigação geotécnica do subsolo. No presente trabalho, uma sonda TDR foi adaptada e utilizada em conjunto ao ensaio CPT para caracterização de um perfil de solo arenoso não saturado que ocorre na região de Bauru (SP). A calibração dessa sonda foi feita em laboratório especificamente para esse solo. As equações de calibração que mostraram os melhores resultados foram definidas correlacionando a constante dielétrica, condutividade elétrica aparente e a massa específica seca com o teor de umidade. Com o intuito de melhorar a acurácia na determinação do teor de umidade em campo e eliminar possíveis interferências no registro da onda eletromagnética, foram efetuadas modificações em algumas características do projeto original dessa sonda. Tais modificações consistiram em separar os eletrodos condutores e as partes metálicas da sonda, e eliminar o cabo coaxial de extensão, conectando a sonda diretamente a um cabo coaxial de 12 m de comprimento. Tais mudanças levaram a uma melhoria significativa na determinação do perfil de teor de umidade do local estudado. Os valores de teor de umidade de campo determinados usando o TDR ao longo de 8 m de profundidade foram comparados com os valores de referência obtidos de amostras deformadas retiradas com trado mecânico. O erro médio na estimativa do perfil de teor de umidade gravimétrico utilizando a sonda TDR helicoidal foi de 1.61%, na última campanha de ensaios realizados. Os resultados dessa pesquisa indicam que esta ferramenta é adequada para estimar do perfil de teor de umidade para uso em conjunto com o ensaio CPT.

Palavras chave: Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), Sonda helicoidal, Ensaio de penetração de cone (CPT), Teor de umidade, Constante dielétrica.



# ABSTRACT

---

DORIA, K.G. Developing a Coil TDR probe to use together with the CPT test. 2015. 156 p. Master thesis – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2015.

The time domain reflectometry allows estimating the moisture content of a medium by means of its correlation with the dielectric constant. A coil TDR probe, which can be driven into the ground together with others in situ penetration tests, can be used to estimate the moisture content at different depths. It is an interesting approach for geotechnical site characterization. In this work, a coil TDR probe was adapted and used in combination with the CPT test for the site characterization of an unsaturated sandy soil profile which occurs in the region of Bauru (SP). The probe calibration was performed in laboratory specifically for that soil. The calibration equation, which presented the best results, were defined correlating the dielectric constant, electrical conductivity and dry density with the moisture content. In order to improve the accuracy for determining the water content in the field and to eliminate possible interference on the electromagnetic wave registration, modifications were made in some characteristics of the original design of this probe. Such modifications consisted in separating the conductive electrodes from the metal parts of the probe, and eliminating the coaxial extension cable, connecting the probe directly to a coaxial cable 12 m long. Such changes have led to a significant improvement in the determination of the moisture content profile of the studied site. The moisture content values determined in situ by using the TDR along 8 m depth were compared with reference values obtained from disturbed soil samples collected using mechanical augers. The root mean square error of the gravimetric water content profile using the TDR coil probe was 1.61% in the last test campaign. The results of this research indicate that this tool is suitable to estimate the gravimetric moisture content together with the CPT test.

Keywords: Time Domain Reflectometry (TDR), Coil probe, Cone penetration test (CPT), Water content, Calibration, Dielectric constant.



# Lista de Figuras

---

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Representação esquemática de ensaios de campo que podem ser utilizados na investigação do subsolo .....  | 35 |
| Figura 2. Sistema de Reação Empregado nos Primeiros Ensaios de Cone Holandês .....                                 | 36 |
| Figura 3. Detalhe das características de um piezocone.....   | 37 |
| Figura 4. Ábaco de classificação de Robertson et al. (1986).....   | 38 |
| Figura 5. Zonas de solo saturado e solo não saturado.....  | 42 |
| Figura 6. Curva de retenção de água no solo .....  | 46 |
| Figura 7. Envoltória de ruptura para os solos não saturados .....  | 48 |
| Figura 8. Perfil de variação do teor de umidade entre junho/2011 a outubro/2012.....                               | 53 |
| Figura 9. Resultados de ensaios CPT e perfil de em Janeiro/2012 e Agosto/2012 .....                                | 53 |
| Figura 10. Esquema da interpretação da técnica TDR.....  | 54 |
| Figura 11. Exemplo de um registro de ensaio TDR (trace) .....  | 56 |
| Figura 12. Métodos para a determinação dos pontos de inflexão .....  | 58 |
| Figura 13. Diferentes equipamentos TDR.....  | 60 |
| Figura 14. Esquema de aquisição de dados com o TDR .....   | 60 |
| Figura 15. Representação esquemática de um cabo coaxial .....  | 61 |
| Figura 16. Representação esquemática de campos magnéticos em diferentes modelos de sonda TDR. ....                 | 62 |
| Figura 17. Detalhe da sonda helicoidal desenvolvida por Vaz e Hopmans (2001). ....                                 | 63 |
| Figura 18. Sonda Helicoidal, Esquivel e Giacheti (2007).....   | 64 |
| Figura 19. Caracterização do solo (a) Granulometria e (b) curva de retenção da amostra de 1 m de profundidade..... | 76 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 20. Esquema detalhado da sonda TDR helicoidal.....  | 78  |
| Figura 21. Detalhes do projeto do cilindro de Poliacetal e eletrodos condutores de cobre. ...                            | 79  |
| Figura 22. Construção da sonda helicoidal .....  | 79  |
| Figura 23. Sistema multifunção para ensaios de campo .....   | 82  |
| Figura 24. Procedimento do ensaio de calibração.....   | 84  |
| Figura 25. Janela inicial do programa WinTDR 6.1. ....   | 85  |
| Figura 26. Forma total de onda. ....   | 86  |
| Figura 27. Aproximação para visualização das duas inflexões da onda.....   | 86  |
| Figura 28. Análise final da onda.....  | 87  |
| Figura 29. Janela de ajuste de configurações. ....   | 88  |
| Figura 30. Localização dos ensaios para cada campanha. ....  | 89  |
| Figura 31. Ilustração de uma das campanhas de campo realizadas. ....   | 91  |
| Figura 32. Teste de avaliação do desempenho da sonda helicoidal.....   | 94  |
| Figura 33. Modelo Misto Dielétrico de duas fases, ajuste pela equação 21.....  | 94  |
| Figura 34. Tipos diferentes de sondas TDR empregadas. ....   | 95  |
| Figura 35. Comparação entre a forma de onda na água utilizando uma sonda de quatro<br>hastes e uma sonda helicoidal..... | 96  |
| Figura 36. Determinação das constantes de calibração a e b. ....   | 97  |
| Figura 37. Determinação das constantes de calibração c e d.....  | 97  |
| Figura 38. Determinação das constantes de calibração f e g. ....   | 97  |
| Figura 39. Relação entre o teor de umidade de referência e estimados usando a técnica<br>TDR.....                        | 98  |
| Figura 40. Determinação das constantes de calibração a, b, c e d segundo a correlação<br>$K_a$ versus $w$ .....          | 99  |
| Figura 41. Relação entre o teor de umidade de referência e a umidade estimada pela técnica<br>TDR.....                   | 100 |
| Figura 42. Determinação das constantes de calibração a, b, c e d segundo a correlação $K_a$<br>versus $\theta$ . ....    | 100 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 43. Relação entre o teor de umidade volumétrico de referência e a estimada pela técnica TDR.....                       | 101 |
| Figura 44. Determinação das constantes de calibração a, b, c e d segundo a correlação $K_a$ versus $w$ . .....                | 101 |
| Figura 45. Relação entre o teor de umidade de referência e estimada pela técnica TDR. .                                       | 102 |
| Figura 46. Exemplo do ruído nos registros de duas ondas típicas. ....   | 103 |
| Figura 47. Perfil de umidade da primeira campanha de ensaios realizados. ....   | 105 |
| Figura 48. Resultados da primeira campanha de ensaios de campo .....  | 105 |
| Figura 49. Conectores coaxiais utilizados .....   | 106 |
| Figura 50. Forma de onda gerada em água no solo na segunda campanha.....  | 109 |
| Figura 51. Comparação entre os valores de teor de umidade de referência e a calculada usando a técnica TDR. ....              | 111 |
| Figura 52. Determinação das constantes de calibração a, b, c e d segundo a correlação $K_a$ versus $w$ .....                  | 112 |
| Figura 53. Comparação entre os valores de teor de umidade gravimétrico de referência e determinados pela técnica TDR.....     | 113 |
| Figura 54. Determinação das constantes de calibração a, b, c e d segundo a correlação $K_a$ versus $\theta$ . ....            | 113 |
| Figura 55. Comparação entre a umidade volumétrica de referência e a umidade volumétrica TDR.....                              | 114 |
| Figura 56. Determinação das constantes de calibração a, b, c e d segundo a correlação $K_a$ versus $w$ . .....                | 114 |
| Figura 57. Comparação entre os valores de teor de umidade de referência e teores de umidade TDR. ....                         | 115 |
| Figura 58. Espaçamento de 5 mm entre os eletrodos de cobre e a cabeça e ponta de aço (Sonda 2).....                           | 116 |
| Figura 59. Elementos da sonda utilizados em cada leitura. ....  | 117 |
| Figura 60. Ondas registradas com as sondas 1 e 2. ....  | 119 |
| Figura 61. Ondas registradas utilizando a sonda helicoidal e a sonda helicoidal acoplada a uma haste CPT (sondas 1 e 2). .... | 120 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 62. Ondas registradas em água com os diferentes filtros de ruído do software WinTDR.....                                     | 121 |
| Figura 63. Solda do cabo coaxial com os eletrodos condutores.....   | 121 |
| Figura 64. Ondas registradas com a sonda e com o conjunto sonda/haste.....  | 122 |
| Figura 65. Onda registradas com o conjunto sonda/haste utilizando diferentes filtros de ruído. ....                                 | 122 |
| Figura 66. Tela com a interpretação do registro de onda típico no programa winTDR da quinta campanha .....                          | 123 |
| Figura 67. Haste do ensaio CPT utilizada na calibração. ....  | 124 |
| Figura 68. Determinação das constantes de calibração a e b, sondas 1 e 3. ....  | 125 |
| Figura 69. Determinação das constantes de calibração c e d, sondas 1 e 3. ....  | 126 |
| Figura 70. Determinação das constantes de calibração f e g, sondas 1 e 3. ....  | 126 |
| Figura 71. Comparação entre valores de teor de umidade de referência e estimados usando a técnica TDR, para as sondas 1 e 3.....    | 128 |
| Figura 72. Determinação das constantes de calibração a, b, c e d para as sondas 1 e 3, pela correlação $K_a$ versus $w$ . ....      | 129 |
| Figura 73. Comparação entre valores de teor de umidade gravimétrico de referência e determinados com o TDR, sondas 1 e 3.....       | 130 |
| Figura 74. Determinação das constantes de calibração a, b, c e d para as sondas 1 e 3, pela correlação $K_a$ versus $\theta$ . .... | 131 |
| Figura 75. Comparação entre os valores de teores de umidade volumétricos de referência e determinados com o TDR, sondas 1 e 3.....  | 132 |
| Figura 76. Determinação das constantes de calibração a, b, c e d para as sondas 1 e 3, pela correlação $K_a$ versus $w$ . ....      | 133 |
| Figura 77. Comparação entre os valores de teores de umidade gravimétrico de referência e determinados com o TDR, sondas 1 e 3.....  | 134 |
| Figura 78. Perfis de variação da umidade determinados na quarta campanha de ensaios de campo.....                                   | 136 |
| Figura 79. Resultados da quarta campanha de ensaios de campo .....  | 137 |
| Figura 80. Perfil de variação de umidade determinados na quinta campanha de campo. ...  | 139 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 81. Resultados da quinta campanha de ensaios de campo .....  | 139 |
| Figura 82. Perfil de variação de massa específica seca ( $\rho_d$ ) com a profundidade, para a quinta campanha de ensaios. .... | 140 |
| Figura 83. Perfil de variação do teor de umidade volumétrico da quinta campanha de ensaios de campo. ....                       | 142 |
| Figura 84. Perfis de umidade de referência e resistência de ponta. ....   | 144 |



# Lista de Tabelas

---

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 1. Parâmetros que podem ser estimados a partir de dados de $q_c$ , $f_s$ e $u$ . .....                                      | 39  |
| Tabela 2. Aplicabilidade do CPTu na obtenção de parâmetros do solo .....   | 39  |
| Tabela 4. Propriedades de alguns solos estudados por Assis (2008). .....   | 64  |
| Tabela 5. Equações de calibração empíricas sugeridos por diversos autores .....  | 68  |
| Tabela 6. Modelos Dielétricos Mistos, adaptado de Klemunes (1998). .....   | 73  |
| Tabela 7. Índices físicos da amostra coletada a 1 m de profundidade. ....  | 75  |
| Tabela 8. Constituição dos ensaios realizados em cada campanha de campo. ....  | 88  |
| Tabela 9. Comparação das medidas da constante dielétrica empregando sondas diferentes e os valores considerados como padrões. .... | 95  |
| Tabela 10. Resultados do ensaio de calibração. ....  | 96  |
| Tabela 11. Valores de teores de umidade e massa específica seca determinados usando a técnica TDR e valores de referência. ....    | 98  |
| Tabela 12. Cálculo do erro padrão para a correlação $K_a$ versus $w$ . ....  | 100 |
| Tabela 13. Cálculo do erro padrão para a correlação $K_a$ versus $\theta$ . ....   | 101 |
| Tabela 14. Cálculo do erro padrão para a correlação $K_a$ versus $w$ . ....  | 102 |
| Tabela 15. Resultados do Ensaio 1. ....  | 104 |
| Tabela 16. Resultados do Ensaio 2. ....  | 104 |
| Tabela 17. Solo estudado por Souza et al. (2001) .....   | 107 |
| Tabela 18. Resultados de ensaios químicos. Campo experimental da Unesp de Bauru ....   | 108 |
| Tabela 19. Resultados correspondentes à segunda campanha de campo. ....  | 109 |
| Tabela 20. Propriedades dos cabos RGC-58 e RG-58 . ....  | 110 |
| Tabela 21. Resultados da calibração com o novo cabo. ....  | 110 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 22. Constantes de calibração obtidas pelo método de Yu e Drnevich (2004). .....  | 111 |
| Tabela 23. Valores de teor de umidade gravimétrica e massa específica seca, determinados usando a técnica TDR e valores de referência. .... | 111 |
| Tabela 24. Cálculo do erro padrão para a correlação $K_a$ versus $w$ . .....  | 112 |
| Tabela 25. Cálculo do erro padrão para a correlação $K_a$ versus $\theta$ . .....   | 113 |
| Tabela 26. Cálculo do erro padrão para a correlação $K_a$ versus $w$ . .....  | 114 |
| Tabela 27. Umidades gravimétricas de referência e estimadas pela técnica TDR. ....  | 115 |
| Tabela 28. Variabilidade da constante dielétrica para diferentes sondas. ....   | 124 |
| Tabela 29. Resultados da calibração da Sonda 1. ....  | 124 |
| Tabela 30. Resultados da calibração da Sonda 3. ....  | 125 |
| Tabela 31. Valores de teor de umidade gravimétrico e massa específica seca de referência e estimados com a sonda 1. ....                    | 127 |
| Tabela 32. Valores de teor de umidade gravimétrico e massa específica seca de referência e estimados com a sonda 3. ....                    | 127 |
| Tabela 33. Constantes de calibração determinadas pelo método de Yu e Drnevich (2004) para as sondas 1 e 3. ....                             | 128 |
| Tabela 34. Erro padrão e estimativa do teor de umidade pela correlação $K_a$ versus $w$ , sonda 1. ....                                     | 129 |
| Tabela 35. Erro padrão e estimativa do teor de umidade pela correlação $K_a$ versus $w$ , sonda 3. ....                                     | 130 |
| Tabela 36. Erro padrão e estimativa do teor de umidade pela correlação $K_a$ vs $\theta$ , sonda 1. ....                                    | 131 |
| Tabela 37. Erro padrão e estimativa do teor de umidade pela correlação $K_a$ versus $\theta$ , sonda 3. ....                                | 132 |
| Tabela 38. Erro padrão e estimativa do teor de umidade pela correlação $K_a$ versus $w$ , sonda 1. ....                                     | 133 |
| Tabela 39. Erro padrão e estimativa do teor de umidade pela correlação $K_a$ versus $w$ , sonda 3. ....                                     | 134 |
| Tabela 40. Resultados do Ensaio 1 da quarta campanha. ....  | 135 |
| Tabela 41. Resultados do Ensaio 2 da quarta campanha. ....  | 136 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 42. Resultados do Ensaio 1 da quinta campanha. ....  | 138 |
| Tabela 43. Resultados do Ensaio 2 da quinta campanha. ....  | 138 |
| Tabela 44. Erro padrão das estimativas de massa específica seca e do teor de umidade gravimétrico. .... | 140 |
| Tabela 45. Erro padrão da estimativa para o teor de umidade volumétrico do ensaio 1.....                | 141 |
| Tabela 46. Erro padrão da estimativa para o teor de umidade volumétrico do ensaio 2.....                | 141 |
| Tabela 47. Erro padrão da estimativa do teor de umidade nas campanhas 1, 4 e 5. ....                    | 143 |



# Lista de Símbolos

---

|             |  |
|-------------|--|
| $u$         | Pressão neutra                                   |
| $q_c$       | Resistência de ponta                             |
| $f_s$       | Atrito lateral                                   |
| $R_f$       | Razão de atrito                                  |
| $OCR$       | Razão de pré-adensamento                         |
| $Bq$        | Parâmetro de classificação obtido com piezocones |
| $\psi$      | Parâmetro de estado a partir do ensaio CPT       |
| $q_t$       | Resistência de ponta corrigida                   |
| $D_r$       | Densidade relativa                               |
| $e$         | Índice de vazios                                 |
| $\gamma$    | Peso específico                                  |
| $K_0$       | Coefficiente de empuxo no repouso                |
| $\phi'$     | Ângulo de atrito interno efetivo                 |
| $G_0$       | Módulo de cisalhamento máximo                    |
| $M$         | Módulo edométrico                                |
| $E$         | Módulo de deformabilidade                        |
| $S_u$       | Resistência não drenada                          |
| $S_t$       | Sensibilidade                                    |
| $C_h$       | Coefficiente de adensamento horizontal           |
| $k$         | Coefficiente de permeabilidade                   |
| $\psi_g$    | Potencial gravitacional                          |
| $\psi_m$    | Potencial matricial                              |
| $\psi_{os}$ | Potencial osmótico                               |
| $\psi_{pn}$ | Potencial pneumático                             |

|             |   |
|-------------|---|
| $\psi$      | Potencial total   |
| $P_{atm}$   | Pressão atmosférica   |
| $\mu_w$     | Pressão da água   |
| $\mu_a$     | Pressão do ar   |
| $S_t$       | Sucção Total  |
| $S_m$       | Sucção Matricial  |
| $S_{om}$    | Sucção Osmótica   |
| $\theta_r$  | Teor de umidade residual  |
| $\theta_s$  | Teor de umidade volumétrica de saturação pelo processo de secagem         |
| $\theta'_s$ | Teor de umidade volumétrica de saturação pelo processo de umedecimento    |
| $\sigma'$   | Tensão normal efetiva   |
| $\sigma$    | Tensão normal total   |
| $\tau$      | Resistência ao cisalhamento   |
| $c'$        | Coesão efetiva  |
| $\phi^b$    | Razão do incremento da resistência ao cisalhamento com a sucção matricial |
| $v$         | Velocidade de propagação da onda  |
| $L$         | Comprimento das hastes guia   |
| $t$         | Tempo de percurso da onda na sonda, ida e volta                           |
| $K$         | Constante dielétrica do meio  |
| $c$         | Velocidade da luz no vácuo ( $3 \times 10^8$ m/s)                         |
| $S_{TDR}$   | Comprimento virtual da sonda  |
| $V_p$       | Velocidade de propagação  |
| $L_a$       | Comprimento aparente da sonda   |
| $C_m$       | Constante de calibração do aparelho                                       |
| $K_a$       | Constante dielétrica aparente   |
| $B$         | Distancia aparente correspondente ao ponto de inflexão final              |
| $A$         | Distancia aparente correspondente ao ponto de inflexão inicial            |
| $\rho_d$    | Massa específica aparente seca do solo                                    |
| IP          | Índice de plasticidade  |
| $w_L$       | Limite de liquidez  |

|                    |   |
|--------------------|---|
| $w_P$              | Limite de plasticidade  |
| $n$                | Porosidade do solo  |
| $\theta$           | Teor de umidade volumétrico   |
| $w$                | Teor de umidade gravimétrico  |
| $a, b, c, d, f, g$ | Constantes de calibração específicas para um dado solo  |
| $EC_b$             | Condutividade Elétrica aparente do conjunto   |
| $\rho_w$           | Massa específica da água  |
| $\rho_b$           | Massa específica do solo  |
| $\rho_s$           | Massa específica dos sólidos  |
| $EC_{b,adj}$       | Condutividade elétrica aparente ajustada  |
| $K_{a,f}$          | Constante dielétrica em campo   |
| $K_{a,coil}$       | Constante dielétrica aparente usando uma sonda helicoidal   |
| $K_{a,ref}$        | Constante dielétrica aparente usando uma sonda padrão   |
| $K_{a,probe}$      | Constante dielétrica dos materiais que compõem o corpo da sonda TDR   |
| $p$                | Sensibilidade da sonda  |
| $K_{bw}$           | Constante dielétrica da água adsorvida  |
| $K_{fw}$           | Constante dielétrica da água livre  |
| $K_s$              | Constante dielétrica da parte sólida  |
| $K_{ar}$           | Constante dielétrica do ar  |
| $\theta_{bw}$      | Teor de umidade volumétrica do solo em relação à água adsorvida   |
| $\theta_{fw}$      | Teor de umidade volumétrica do solo em relação à água livre   |
| $\alpha$           | Constante que depende da geometria da fase sólida do solo e da orientação do solo em relação ao campo elétrico aplicado |
| $\beta$            | Constante que depende da composição textural do solo  |
| $\delta$           | Espessura da camada monomolecular da água   |
| $K_w$              | Constante dielétrica da água  |
| $S_r$              | Grau de saturação   |
| $S_{est}$          | Erro padrão da estimativa   |
| $y$                | Valor de referência para o cálculo do erro padrão da estimativa   |
| $y'$               | Valor estimado para o cálculo do erro padrão da estimativa  |

|                |  |
|----------------|--|
| $\theta_{TDR}$ | Teor de umidade volumétrico estimado pelo TDR    |
| $Al_2O_3$      | Óxido de Alumínio                                |
| $Fe_2O_3$      | Óxido de Ferro                                   |
| $SiO_2$        | Óxido de Silício                                 |
| KCl            | Cloreto de Potássio                              |
| $w_{TDR}$      | Teor de umidade gravimétrico estimado pelo TDR   |
| $w_{ref}$      | Teor de umidade gravimétrico de referência       |
| $\rho_{d,TDR}$ | Massa específica aparente seca estimada pelo TDR |

# CONTEÚDO

---

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| <b>1.</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>29</b> |
| 1.1       | OBJETIVOS .....   | 30        |
| 1.2       | ORGANIZAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DOS ASSUNTOS.....  | 31        |
| <b>2.</b> | <b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>   | <b>33</b> |
| 2.1       | A INVESTIGAÇÃO DO SUBSOLO.....  | 33        |
| 2.1.1     | Ensaio CPT e CPTu.....  | 35        |
| 2.2       | solos não saturados .....   | 39        |
| 2.2.1     | Fases da água no solo .....   | 40        |
| 2.2.2     | Estados de Energia e Potencial da água nos solos.....                                   | 43        |
| 2.2.3     | Curva de retenção de água no solo .....   | 45        |
| 2.2.4     | Resistência ao Cisalhamento dos Solos não Saturados .....                               | 47        |
| 2.3       | Determinação do teor de umidade do solo.....  | 48        |
| 2.4       | Influência do teor de umidade na resistência à penetração dos solos não saturados ..... | 50        |
| 2.5       | Reflectometria no Domínio do Tempo-TDR .....  | 54        |
| 2.5.1     | Equipamentos TDR .....  | 59        |
| 2.5.2     | Sonda TDR.....  | 61        |
| 2.5.3     | Calibração .....  | 65        |
| <b>3.</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>  | <b>75</b> |
| 3.1       | MATERIAIS.....  | 75        |
| 3.1.1     | Local de estudo.....  | 75        |
| 3.1.2     | Sonda helicoidal TDR .....  | 77        |
| 3.1.1     | Testador de cabos Tektronix 1502-C.....   | 80        |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| 3.1.2      | Programa WinTDR.....   | 80         |
| 3.1.3      | Sistema multifunção para ensaios de campo .....                      | 82         |
| <b>3.2</b> | <b>MÉTODOS.....</b>  | <b>82</b>  |
| 3.2.1      | Processo de calibração.....  | 83         |
| 3.2.2      | Ensaio de campo .....  | 88         |
| <b>4.</b>  | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                  | <b>93</b>  |
| <b>4.1</b> | <b>CALIBRAÇÃO.....</b>   | <b>93</b>  |
| 4.1.1      | Avaliação do desempenho da sonda helicoidal .....                    | 93         |
| 4.1.2      | Calibração pelo método proposto por Yu e Drnevich (2004) .....       | 96         |
| 4.1.3      | Calibração por correlações alternativas.....                         | 99         |
| <b>4.2</b> | <b>ENSAIOS DE CAMPO .....</b>  | <b>102</b> |
| 4.2.1      | Primeira campanha.....   | 102        |
| 4.2.2      | Segunda campanha.....  | 108        |
| 4.2.3      | Terceira campanha .....  | 115        |
| 4.2.4      | Adequação e avaliação do funcionamento da sonda helicoidal TDR ..... | 116        |
| 4.2.5      | Calibração das sondas 1 e 3 .....                                    | 124        |
| 4.2.6      | Quarta campanha .....  | 135        |
| 4.2.7      | Quinta campanha.....   | 137        |
| 4.2.8      | Síntese dos resultados das principais campanhas de campo .....       | 142        |
| <b>5.</b>  | <b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>                                  | <b>145</b> |
| <b>6.</b>  | <b>REFERÊNCIAS .....</b>   | <b>147</b> |

# Capítulo 1

---

## INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O comportamento geomecânico dos solos tropicais é fortemente influenciado pela sua condição de saturação. Deste modo, o conhecimento do perfil de umidade é uma informação que permite uma melhor avaliação do desempenho de obras geotécnicas instaladas nesses solos. A definição adequada do perfil do subsolo deve fornecer informações suficientes para o desenvolvimento de projetos geotécnicos, de modo a considerar adequadamente os fatores que afetam seu desempenho.

Existem técnicas de ensaios invasivos e não invasivos para a investigação do subsolo e que possibilitam a definição do perfil e a estimativa de parâmetros de projeto. Porém, a escolha da técnica de ensaio que será utilizada depende das exigências de cada obra e dos parâmetros necessários ao projeto. O ensaio de penetração do cone, mais conhecido como ensaio de Cone ou CPT, é uma técnica empregada para a investigação, que possibilita uma rápida e contínua definição do perfil do subsolo, além da estimativa dos parâmetros geotécnicos.

Uma informação indispensável do perfil do subsolo é a profundidade do nível freático, já que o comportamento do solo é diferente se saturado ou não saturado. O nível freático pode sofrer variações dependendo das estações climáticas, diminuindo na temporada de secas e aumentando na temporada de chuvas. Os solos não saturados apresentam o fenômeno físico denominado sucção, que é função da pressão da água e do ar que há nos vazios do solo. Nesse sentido, é também função do conteúdo de água do solo, sendo que quando menor o teor de umidade, maior é a sucção. A expressão gráfica que relaciona a sucção e o teor de umidade de um solo é a curva de retenção de água ou curva característica de sucção que, segundo Fredlund et al. (1997), pode ser utilizada para

descrever o comportamento dos solos não saturados e sua influência nos parâmetros de permeabilidade, resistência ao cisalhamento e deformabilidade.

A determinação do teor de umidade do solo geralmente se faz em laboratório empregando o método da estufa elétrica, onde é necessária a obtenção de uma amostra de solo, seja deformada ou indeformada. Este método é considerado como referência para a determinação do teor de umidade, graças a sua simplicidade e acurácia. No entanto, este apresenta algumas limitações, por exemplo, quando se tem dificuldades em obter amostras, ou quando a definição da umidade deve ser rápida.

Existem outras técnicas de medição do teor de umidade em campo que possibilitam determinar a quantidade de água que existe no solo de forma relativamente rápida, quando comparadas com o método da estufa como, por exemplo, a Sonda de Nêutrons, Radar de Penetração no Solo, Reflectometria no Domínio da Frequência e Reflectometria no Domínio do Tempo.

A técnica de Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) vem sendo muito estudada nas últimas décadas devido a sua praticidade, rapidez e acurácia. O TDR utiliza a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética num meio poroso e a constante dielétrica desse meio para determinar o teor de umidade. As principais vantagens são sua natureza não destrutiva e a obtenção em tempo real do perfil de umidade do subsolo.

Nissen et al. (1998) propuseram o uso de uma sonda TDR helicoidal para aumentar o tempo de percurso da onda eletromagnética. Após, autores como Esquivel e Giacheti (2007) e Esquivel e Vaz (2009) adaptaram essa ponteira helicoidal com o fim de ser utilizada em conjunto com equipamentos de prospecção do subsolo, como é o caso dos ensaios SPT e CPT. Assis (2008) utilizou a ponteira helicoidal junto com o ensaio SPT, obtendo uma boa estimativa do perfil de umidade do terreno.

Equipamentos de prospecção do solo em campo, como ensaio CPT e TDR, podem ser utilizados em conjunto para conhecer de forma mais rápida os parâmetros do terreno sem necessidade de amostragem, e permitam um melhor entendimento do comportamento dos solos não saturados, assim como tratar de forma mais eficiente a variabilidade dos parâmetros de projeto com o efeito da sucção.

## **1.2 OBJETIVOS**

O objetivo principal desta pesquisa é adaptar uma sonda TDR helicoidal para ser utilizada em conjunto com o ensaio CPT para a estimativa *in situ* do teor de umidade e,

consequentemente, avaliar o uso dessa ferramenta na análise da variabilidade dos parâmetros geotécnicos de um solo não saturado. Os objetivos específicos são:

- Adaptar e testar uma sonda helicoidal TDR para uso conjunto com o ensaio CPT.
- Avaliar a acurácia na determinação do teor de umidade utilizando essa sonda, para uma posterior avaliação do efeito da sucção nos parâmetros geotécnicos do solo.
- Melhorar a qualidade dos registros das ondas do sistema TDR, eliminando possíveis interferências eletromagnéticas.
- Dar continuidade as pesquisas sobre o uso da sonda TDR helicoidal em conjunto com ensaios de prospecção geotécnica, agora com aplicação combinada ao ensaio CPT em perfis de solos não saturados.

### **1.3 ORGANIZAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DOS ASSUNTOS**

A presente dissertação foi elaborada iniciando com uma revisão da literatura sobre o tema de pesquisa. A introdução ao conteúdo do trabalho e os objetivos são apresentados no primeiro capítulo. No segundo capítulo é apresentada uma síntese da revisão da literatura que compreende as principais ferramentas de investigação do subsolo, uma breve introdução aos solos não saturados e sua interação com a água. Também são abordados os princípios da técnica de Reflectometria no Domínio do Tempo e os modelos de calibração de natureza empírica e física. O terceiro capítulo descreve os métodos e materiais utilizados durante a realização dos ensaios de calibração em laboratório e na execução das campanhas de campo. O quarto capítulo reúne os resultados da calibração em laboratório e das campanhas de campo realizadas no transcurso da pesquisa. Neste capítulo, além de serem mostrados e discutidos os resultados e as dificuldades encontradas em cada uma das campanhas de campo, apresentam-se e discutem-se as medidas tomadas para corrigir os problemas encontrados. O quinto capítulo apresenta as conclusões e sugestões para continuidade deste trabalho.



# Capítulo 2

---

## REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 A INVESTIGAÇÃO DO SUBSOLO

O conhecimento das características e dos parâmetros dos solos é fundamental para a elaboração de projetos geotécnicos. Neste sentido, a investigação do subsolo deve ser feita de modo a permitir a definição do perfil geotécnico do subsolo, o que inclui identificar as camadas, sua espessura, tipo de solo, a posição do nível d'água e os parâmetros mecânicos e hidráulicos. Em princípio, a determinação das propriedades geotécnicas pode ser realizada através de ensaios de campo ou por meio de ensaios de laboratório. Os ensaios de laboratório permitem um maior controle das condições do ensaio, entretanto a qualidade dos resultados é função da qualidade das amostras utilizadas. Ensaios de campo permitem um maior número de ensaios, e conseqüentemente, uma caracterização mais detalhada do subsolo analisado.

Para a realização de uma investigação do subsolo que satisfaça as necessidades de projeto, inicialmente se deve escolher um método de prospecção o qual, em conjunto com um procedimento adequado de execução, possibilitem uma definição apropriada do perfil do subsolo e dos parâmetros geotécnicos necessários ao projeto. Com a finalidade de se obter uma visualização tridimensional do terreno, em especial quanto a uma possível continuidade das camadas é necessário definir um espaçamento adequado entre sondagens e realizar campanhas de investigação eficientes.

De acordo com Mayne et al. (2001) há cinco métodos de investigação do subsolo em campo:

- Sensoriamento Remoto
- Investigação Geofísica
- Amostras deformadas
- Ensaios In-situ

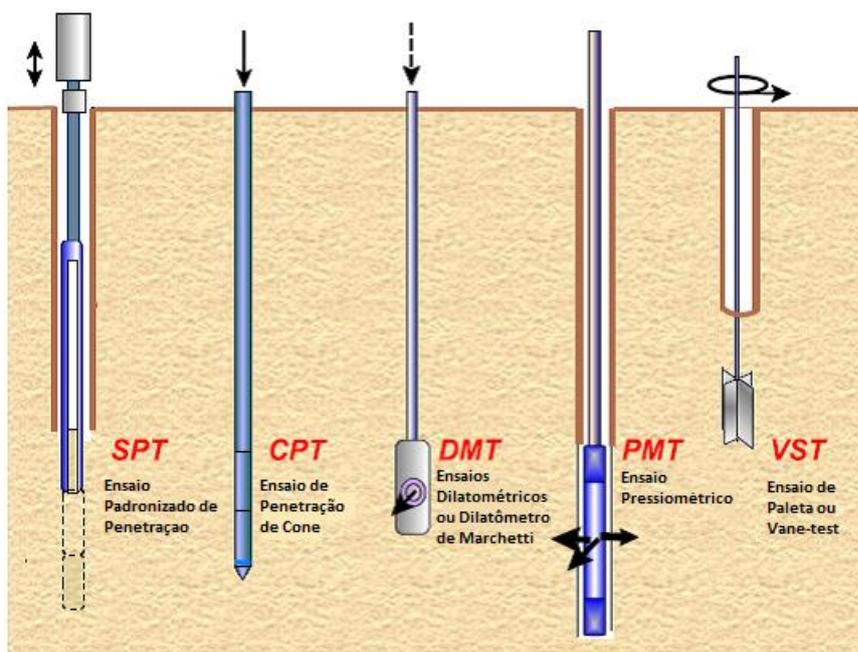
- Amostras indeformadas

Dados de sensoriamento remoto são utilizados na identificação de formações geológicas, falhas e escarpas no perfil geotécnico. A investigação geofísica permite o estabelecimento da estratigrafia do terreno, detectar mudanças bruscas em formações subterrâneas, além de localizar cavidades em formações cársticas, por meio dos métodos elétricos (Eletrorresistividade, Polarização Induzida) ou pelos métodos sísmicos (Reflexão, Refração, Cross-hole e Down-hole). Os métodos sísmicos possibilitam a obtenção das velocidades de propagação de onda (ondas P e S) e proporcionam informação sobre as propriedades elásticas dinâmicas do solo e da rocha.

As amostras deformadas (estrutura natural modificada pelo processo de extração) permitem a determinação do tipo de solo, granulometria, limites de consistência, densidade, presença de contaminantes, estratigrafia, etc. Os métodos de obtenção destas amostras variam desde escavações manuais até técnicas de perfuração por rotação. Enquanto que a amostra indeformada (estrutura original intacta) permite a determinação real das propriedades de resistência, compressibilidade, permeabilidade, além de características físicas do solo (peso específico, índice de vazios). Apesar de essas amostras serem denominadas indeformadas, na realidade elas são deformadas em certo grau dependendo de fatores como o tipo de material, o tipo e condição do equipamento utilizado durante a recuperação, os métodos de transporte e armazenamento das amostras, entre outros.

Ensaio de campo são amplamente utilizados por possibilitar uma caracterização geotécnica mais detalhada do perfil do subsolo. A partir de correlações empíricas e calibrações é possível obter o perfil estratigráfico e as propriedades e parâmetros geotécnicos do solo. Segundo Mayne (2001), os principais ensaios de campo são: a Sondagem de Simples Reconhecimento (SPT), o Ensaio de Penetração do Cone (CPT) e Piezocone (CPTu), o Dilatômetro de Marchetti (DMT), o Pressiômetro (PMT) e o Ensaio de Palheta (VST), todos representados na Figura 1.

O ensaio de campo mais utilizado para a definição do perfil do subsolo e estimativa de parâmetros de projeto é a sondagem a simples reconhecimento (SPT). O procedimento para a execução desse ensaio é normatizado pela norma ASTM D 1586 e AASHTO T-206. Entretanto, o ensaio SPT é bastante questionado para a estimativa de parâmetros de projeto, uma vez que se utiliza um único número para esse fim (Mayne 2000).

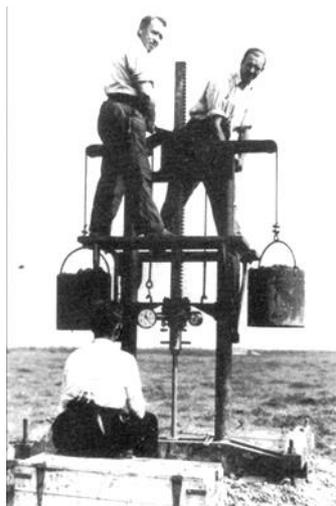


**Figura 1. Representação esquemática de ensaios de campo que podem ser utilizados na investigação do subsolo (Modificado de Mayne, 2001).**

O Ensaio de Penetração do Cone (CPT) permite uma descrição quase contínua do perfil do subsolo, em tempo real e com pouca interferência do operador e equipamento de ensaio. Além disso, o avanço da eletrônica e a rápida evolução da informática permitiu a incorporação de várias medidas num mesmo ensaio, os chamados ensaios híbridos descritos por Mayne (2000). Nesse sentido, um ensaio que una as medidas de cravação com as medidas geofísicas é um recurso muito interessante para a investigação do subsolo. Apesar dessa abordagem moderna, a qual valoriza a realização de mais de uma medida em um único ensaio, muito ainda pode ser feito na direção de incorporar mais técnicas rápidas e eficientes na investigação do subsolo. Um exemplo que vai de encontro a essa inovação seria incorporar aos ensaios CPT ou CPTu a técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR).

### **2.1.1 Ensaio CPT e CPTu**

O primeiro Ensaio de Penetração do Cone foi realizado em 1930, na Holanda, em um projeto do Departamento de Saúde Pública. Em 1935, o primeiro sistema de cravação manual para a realização de ensaios de cone foi desenvolvido (Figura 2). Em 1965 o primeiro cone elétrico foi projetado e desenvolvido, permitindo deste modo a realização de medidas quase que contínuas ao longo do perfil do subsolo. Mais recentemente os sinais foram acondicionados, filtrados, digitalização no interior da própria sonda do CPT (Mayne et al. 1995).



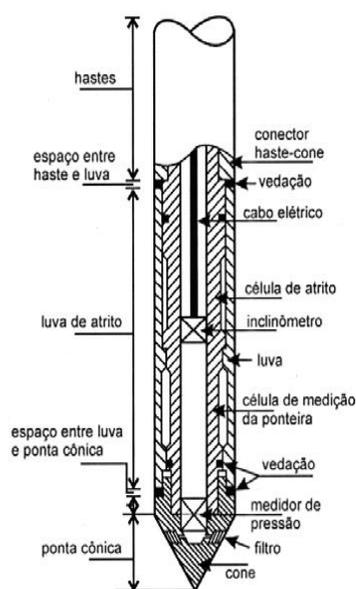
**Figura 2. Sistema de Reação Empregado nos Primeiros Ensaios de Cone Holandês (Lunne et al. 1997).**

Com o avanço da tecnologia, diversos acessórios têm sido desenvolvidos, em especial para serem empregados em conjunto com o ensaio CPTu. Pode-se destacar, como exemplos o módulo para medida de tensões laterais e o cone pressiométrico (CPM), os quais permitem realizar um ensaio específico, ao mesmo tempo em que se realiza um ensaio CPTu. Têm-se, também, dispositivos para estimativa in situ da densidade ou porosidade do solo, baseados em medidas por radio isótopos. Entretanto, as maiores novidades têm surgido para aplicação na área de meio ambiente e incluem medidas dielétricas, sensores de pH e de potencial de óxido redução e fluorescência induzida por laser. Lunne et al. (1997) e Robertson (1998) apresentam vários desses acessórios assim como algumas variações de piezocones disponíveis.

O ensaio CPTu é amplamente utilizado no meio geotécnico, pois permite a rápida e quase contínua definição do perfil do subsolo, os resultados são independentes do operador e há um forte embasamento teórico para sua interpretação (Mayne, 2001). O ensaio é realizado de acordo com a ASTM D-3441-05 (ensaio mecânico) e a ASTM D 5778 (ensaio elétrico) e normalizado no Brasil pela ABNT MB-3406 (1990). De acordo com Mayne (2007), os ensaios de cone e piezocone podem ser usados tanto como substituição ou como complemento de métodos de investigação por perfuração convencionais. Os dados são registrados no campo por meio de um computador e podem ser utilizados pelo engenheiro geotécnico para avaliar o perfil estratigráfico, classificar o tipo de comportamento do solo, identificar a posição do nível do lençol freático e na definição de índices e parâmetros.

Danziger e Schnaid (2000) descrevem o ensaio como, um penetrômetro eletrônico instrumentado em forma cônica que é conectado à extremidade de um conjunto de hastes e introduzido no solo a uma velocidade constante igual a 20 mm/s, a qual permite, de forma

quase que contínua o registro de múltiplas medidas (Schemertmann, 1978; Campanella & Robertson, 1988; Briaud & Miran, 1992). Essa ponteira cônica possui um vértice de  $60^\circ$  e áreas de ponta que podem ser iguais a 2, 10, 15 e 40  $\text{cm}^2$ , sendo a de 10  $\text{cm}^2$  a mais utilizada em investigações geotécnicas. O penetrômetro elétrico possuem células de carga que registram a resistência de ponta ( $q_c$ ) e o atrito lateral ( $f_s$ ). Do mesmo modo, os piezocones (CPTu), são penetrômetros elétricos que possuem um transdutor adicional para a medida da poropressão ( $u$ ), as vezes em mais de uma posição, adicionada as demais medidas (Figura 3).

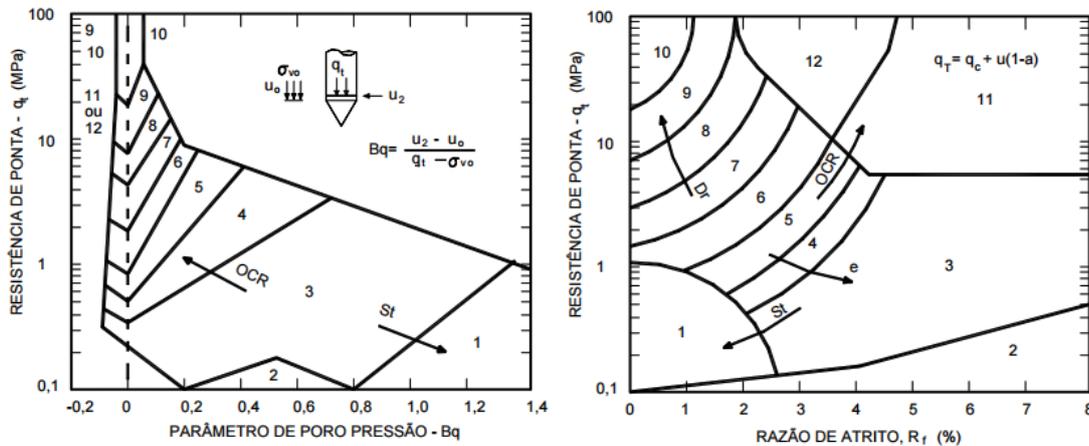


**Figura 3. Detalhe das características de um piezocone (Lunne et al. 1997).**

Uma das principais aplicações dos ensaios CPT e CPTu é a identificação do perfil do subsolo, por meio de cartas de classificação de tipo de comportamento de solo. Estas cartas utilizam a resistência de ponta ( $q_c$ ) e a razão de atrito ( $R_f = f_s/q_c$ ) para esse fim. Robertson et al. (1986) indicam ainda nessa carta as tendências de variação do histórico de tensões (OCR), sensibilidade ( $s_v$ ), densidade relativa ( $d_r$ ) e índice de vazios ( $e$ ). O ensaio de piezocone permite ainda, classificar o solo utilizando a informação da pressão neutra, a partir do índice de poropressão (Bq). Esse recurso é interessante, especialmente para solos moles, nos quais os valores de resistência de ponta são baixos e a geração de poropressão é elevada (Figura 4).

A partir da definição do perfil do subsolo, identificam-se as camadas críticas que podem afetar o comportamento da obra. A interpretação dos resultados dos ensaios CPT é conduzida de duas maneiras distintas: por uma abordagem direta (em geral correlacionando

o comportamento do cone ao de uma estaca), ou por uma abordagem indireta (onde os parâmetros geotécnicos são determinados por correlações semiempíricas).



| Zona | Tipo de comportamento do solo | Zona | Tipo de comportamento do solo   | Zona | Tipo de comportamento do solo |
|------|-------------------------------|------|---------------------------------|------|-------------------------------|
| 1    | Solos finos sensíveis         | 5    | Silte argiloso a argila siltosa | 9    | Areia                         |
| 2    | Solos orgânicos               | 6    | Silte arenoso a silte argiloso  | 10   | Areia pedregulhosa a areia    |
| 3    | Argila                        | 7    | Areia siltosa a silte arenoso   | 11   | Solo fino muito rijo*         |
| 4    | Argila siltosa a argila       | 8    | Areia a areia siltosa           | 12   | Areia a areia argilosa*       |

\*Pré-adensado ou cimentado

Figura 4. Ábaco de classificação de Robertson et al. (1986).

Na abordagem direta se correlaciona diretamente os valores de resistência de ponta ( $q_c$ ) e atrito lateral ( $f_s$ ) com o comportamento observado em fundações, na maioria das vezes estacas, sem a necessidade de estimar parâmetros geotécnicos do solo. Esta abordagem é baseada em resultados de provas de carga realizadas em diferentes tipos de fundação. Essa prática tem sido utilizada, em especial no Brasil, devido à dificuldade de se considerar os diversos fatores que afetam o comportamento do solos não convencionais. Essa forma de abordagem é interessante, pois se pode correlacionar diretamente à resistência de ponta e o atrito lateral mobilizados em uma estaca e em um cone. Um método clássico muito empregado no Brasil é o método de Aoki e Velloso (1975), descrito detalhadamente em Cintra *et al.* (2011). Esse método foi desenvolvido para valores de  $q_c$  e  $f_s$  determinados utilizando o cone mecânico. A abordagem indireta emprega os valores de  $q_c$ ,  $f_s$  e  $u$  em correlações semiempíricas para estimar parâmetros de resistência, compressibilidade e permeabilidade do solo. A Tabela 1 apresenta os parâmetros que podem ser obtidos a partir desta abordagem.

Embora possamos interpretar alguns desses parâmetros seguindo uma abordagem teórica, a maioria é obtida através de correlações com resultados de ensaios de laboratório e/ou ensaios específicos *de campo*. A Tabela 2 mostra a aplicabilidade do CPTu para a

estimativa dos parâmetros do solo, classificados desde não aplicável até alto grau de aplicabilidade, conforme sugerido por Robertson et al. (2009).

**Tabela 1. Parâmetros que podem ser estimados a partir de dados de  $q_c$ ,  $f_s$  e  $u$ .**

| Tipo de Solo   | Parâmetros   |
|----------------|--|
| <b>AREIAS</b>  | Peso específico ( $\gamma$ ), Densidade relativa ( $D_r$ ), Parâmetro de estado ( $\psi$ ), Coeficiente de empuxo no repouso ( $K_0$ ), Ângulo de atrito interno efetivo ( $\phi'$ ), Módulos de deformabilidade ( $E$ ), Odométrico ( $M$ ) e de Cisalhamento máximo ( $G_0$ ). |
| <b>ARGILAS</b> | Peso específico ( $\gamma$ ), Resistência não drenada ( $S_u$ ), Razão de Pré-adensamento (OCR), Sensibilidade ( $S_t$ ), Módulos ( $E$ , $M$ , $G_0$ ), Coeficiente de adensamento ( $C_h$ ) e Coeficiente de permeabilidade ( $k$ ).   |

**Tabela 2. Aplicabilidade do CPTu na obtenção de parâmetros do solo. Robertson et al. (2009)**

| Tipo de solo | $D_r$ | $\psi$ | $K_0$ | OCR | $S_t$ | $S_u$ | $\phi'$ | $E, G^*$ | $M$ | $G_0$ | $k$ | $C_h$ |
|--------------|-------|--------|-------|-----|-------|-------|---------|----------|-----|-------|-----|-------|
| Areia        | 2-3   | 2-3    | 5     | 5   |       |       | 2-3     | 2-3      | 2-3 | 2-3   | 3-4 | 3-4   |
| Silte        |       |        | 2     | 1   | 2     | 1-2   | 4       | 2-4      | 2-3 | 2-4   | 2-3 | 2-3   |

1= Alto, 2= Alto a moderado, 3= moderado, 4= Moderado a baixo, 5= Relativamente baixo,  
Em branco = Não aplicável, \* Aperfeiçoado com SCPT.

## 2.2 SOLOS NÃO SATURADOS

O estudo do comportamento dos solos não saturados teve origem na década de 1970, quando as bases teóricas e as formulações foram desenvolvidas. Atualmente, vários são os avanços no entendimento do comportamento desses solos no que se refere a variações volumétricas, resistência, condutividade hidráulica, além das técnicas para determinação de suas propriedades e parâmetros de projeto. Entretanto, para a maioria dos projetos geotécnicos, a avaliação do efeito da condição não saturada nem sempre é realizada, em especial quando o projeto se baseia apenas em resultados de ensaios de campo.

As condições ambientais e as mudanças climáticas são os principais fatores que intervêm na formação e no comportamento dos solos não saturados. Esta característica faz com que nas regiões de clima tropical, sejam encontradas grandes quantidade e perfis espessos desses solos.

Os solos tropicais são originados da ação do intemperismo físico e químico da rocha devido às variações climáticas. Em um perfil típico de um solo tropical, geralmente ocorre a

presença de dois tipos de solo, o laterítico e o saprolítico. Segundo Nogami et al. (1996) o solo laterítico, residual ou não, é formado na camada mais superficial do subsolo em áreas bem drenadas das regiões tropicais úmidas. Apresentam coloração tipicamente avermelhada, amarela e marrom, devido ao processo de laterização, o qual, acarreta no enriquecimento do solo de óxidos de ferro e/ou alumínio.

O comportamento dos solos lateríticos é influenciado pela sua composição química e mineralógica, gênese, grau de intemperismo e condições ambientais. Segundo Queiroz de Carvalho (1987), eles são altamente dependentes de sua microestrutura (arranjo estrutural e cimentação). De acordo com Nogami et al. (1996), quanto maior o grau de laterização, em estado natural, maior é sua susceptibilidade à erosão, apresentam elevada permeabilidade e deformabilidade, baixa capacidade de suporte, e podem sofrer o fenômeno do colapso quando submetidos a variação do teor de umidade.

Os solos saprolíticos estão localizados na camada subjacente ao solo laterítico. São originados pela decomposição ou degradação in situ da rocha matriz mantendo a estrutura da rocha de origem; são, portanto, solos residuais. Por isso são mais heterogêneos, e sua composição mineralógica pode ser simples ou muito complexa, dependendo da matriz de origem e o grau e tipo de intemperismo predominante.

Os principais fenômenos que ocorrem em solos não saturados e que tem motivado pesquisas na área de geotecnia estão relacionados às deformações volumétricas e variações na resistência desses solos provocadas por variações no grau de saturação, já que processos de evaporação, evapotranspiração e precipitações podem provocar variações no teor de umidade do solo. As deformações volumétricas podem ser tanto positivas como negativas, ou seja, produzindo contração ou expansão.

Autores como Fredlund e Rahardjo (1993) e Alonso et al. (1987) atribuem que o comportamento dos solos não saturados é função do processo de formação, do grau de saturação, do peso específico seco, da granulometria, do estado de tensões, dentre outros.

### **2.2.1 Fases da água no solo**

Os solos secos e os solos saturados são constituídos por um sistema de apenas duas fases; o primeiro é composto por partículas sólidas e ar, enquanto o segundo tem partículas sólidas e água. Nos solos não saturados se deve considerar a presença de uma terceira fase: partículas sólidas, água e ar. No entanto, Fredlund e Morgenstem (1977) propuseram a existência de uma quarta fase em solos não saturados, considerando a interface entre o ar livre e a água livre, chamada de membrana contráctil. Considerando apenas à relação massa-volume, o solo não saturado é um sistema trifásico, na qual a

massa da membrana contráctil está inserido na parcela de água e não é considerada na fração volumétrica. Deste modo, no estudo de solos não saturados, devem ser considerados, além dos princípios da mecânica e hidráulica, os da termodinâmica.

A fase sólida é composta por de partículas com propriedades variáveis como, forma, textura, composição mineralógica, configuração cristalográfica entre outras que influenciam em seu comportamento. Por exemplo, a estrutura das partículas sólidas apresenta uma grande influência no comportamento dos solos não saturados devido ao efeito que tem as interfaces água e ar no estado de tensões. Da mesma forma se observa um comportamento diferenciado quando a compactação é realizada tanto no ramo seco quanto no ramo úmido, já que são formadas estruturas distintas.

A fase líquida é composta fundamentalmente por água, a qual pode ser encontrada de três formas diferentes, ou seja: água higroscópica, água capilar e água gravitacional. A água higroscópica está fixada firmemente por adsorção nas partículas sólidas do solo, formando parte da dupla camada difusa. A água nesta condição só se movimentada ou é retirada do solo na forma de vapor, o que significa que ela não pode ser separada pela ação hidrodinâmica (capilaridade e gravidade). A água capilar está retida ao redor das partículas sólidas graças à tensão superficial. Por último, a água gravitacional se encontra nos poros maiores do solo e pode ser separada ou movimentada apenas por ação da gravidade.

A água intersticial pode conter sais dissolvidos que adicionam diferentes cátions à dupla camada difusa, influenciando no comportamento do solo. Por exemplo; quando o cátion predominante é  $\text{Ca}^{++}$  a água intersticial apresenta um alto conteúdo de sais dissolvidos com uma elevada atividade osmótica, gerando em muitos casos baixa produtividade do solo. Se o cátion predominante é  $\text{Na}^+$  se pode produzir uma destruição da estrutura do solo, causada pela dispersão da argila, o que pode provocar variações volumétricas.

A distribuição das fases água e ar no solo variam em função do seu estado de saturação. Na natureza a relação entre estas fases pode ser encontrada de três formas, dependendo da continuidade da fase água e da fase ar.

Wroth e Houlsby (1985) classificam os solos não saturados da seguinte forma (Figura 5):

1. Fase ar descontínua e fase água contínua: Nesta condição os vazios se encontram preenchidos com água de forma contínua, mas existem algumas partes descontínuas de ar formando pequenas bolhas. Este cenário pode ser encontrado na zona de transição, entre a zona saturada e a zona com baixo grau de saturação dos solos naturais. Segundo Fredlund (2000), estes solos são localizados na faixa mais próxima ao nível freático, chamada de faixa capilar.

Nesta faixa o grau de saturação está próximo a 100%, e, portanto, pode ser considerado como saturado. No entanto, a água que se encontra nos vazios apresenta uma pressão negativa, dominada pela capilaridade.

2. Fases contínuas de água e ar: Esta condição é encontrada em solos com um grau de saturação intermediário. De acordo com Fredlund (2000), este solo ocorre entre a zona de solo seco e a faixa capilar. É denominada como zona de duas fases, onde a água e o ar ocupam os poros de forma contínua e o grau de saturação se encontra entre o 20% e 80%.
3. Fase de ar contínua e fase de água descontínua: Segundo Fredlund (2000), estes solos são encontrados na zona mais próxima à superfície do terreno onde a maioria dos vazios está preenchida por ar de forma contínua, no entanto, existindo algumas seções isoladas que contêm água. Esta parte é chamada de solo seco e o grau de saturação é próximo à zero.

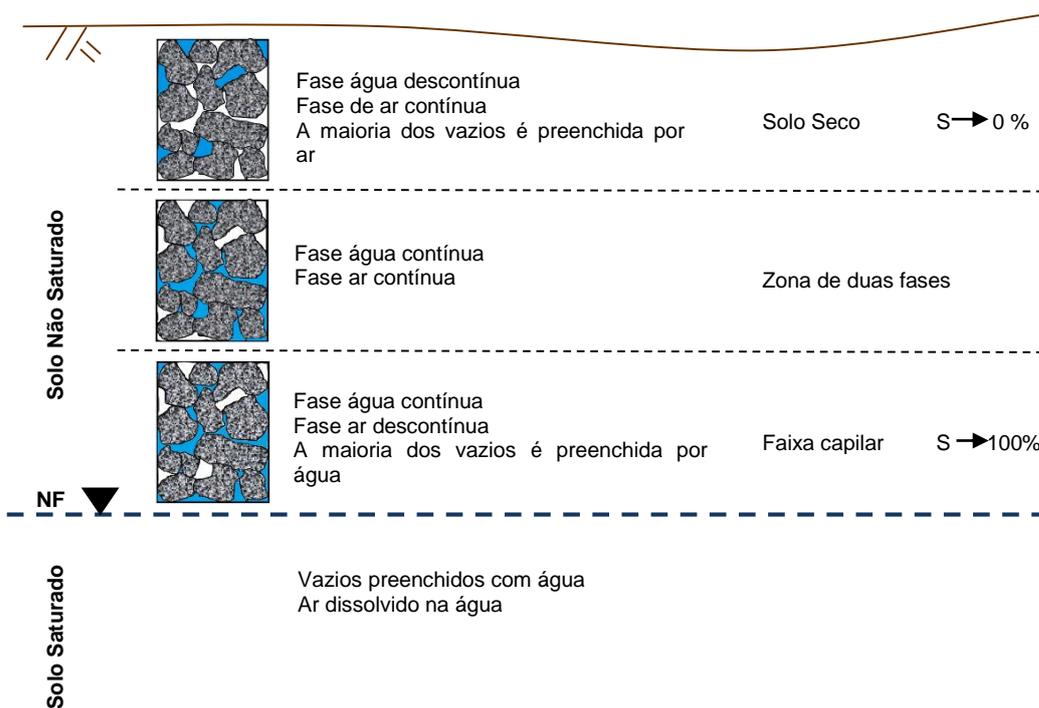


Figura 5. Zonas de solo saturado e solo não saturado, adaptado de Wroth e Houslby (1985) e Fredlund (2000)

Abaixo do nível freático o solo se encontra na condição saturada, uma vez que os vazios estão preenchidos por água e o ar se encontra dissolvido na água. Deste modo, a pressão da água nesta zona é sempre positiva. Nos solos não saturados a pressão de ar é

sempre maior que a pressão da água nos poros. A zona mais próxima à superfície apresenta a fase ar contínua e em contato com a pressão atmosférica, gerando uma igualdade nas pressões atmosférica e pressão de ar ( $\mu_a = P_{atm} = 0$ ).

As fases do solo (ar, água, partículas sólidas) são dependentes do seu grau de saturação, no entanto as diferentes solicitações a que o solo é submetido exercem efeitos no estado de tensões em escala microestrutural dos solos não saturados. Como resultado, a fase sólida experimenta forças normais e tangenciais nos contatos que são transmitidas através das partículas, e forças de atração e repulsão elétrica. As fases líquidas e gasosas experimentam, respectivamente, pressão da água ( $u_w$ ) e pressão do ar ( $u_a$ ) e, por último, na interação entre as fases são desenvolvidos fenômenos de superfície, Barrera e Garnica (2002).

Em solos de textura grossa (areias), a interação entre as partículas está concentrada essencialmente nos contatos, já que as forças elétricas não exercem papel de destaque. Ao contrário, nas argilas as forças elétricas são as que influenciam grande parte de seu comportamento.

### **2.2.2 Estados de Energia e Potencial da água nos solos**

A sucção é um dos parâmetros mais importantes na avaliação do comportamento dos solos não saturados. Lee e Wray (1995) afirmaram que a sucção é a quantidade de energia aplicada sobre as partículas de solo, para desprender uma unidade de volume de água. As partículas de solo retêm ou adsorvem a água livre entre elas. Para desprender esta água é necessário aplicar uma força ou energia externa em sentido contrário às forças de retenção que agem no solo. Essa retenção é influenciada pelas características do solo, como mineralogia, densidade e umidade. Deste modo, quanto mais seco estiver o solo, maior será a sucção.

Segundo Hillel (1971), para melhor compreender o comportamento de um solo não saturado se deve conhecer o estado energético da água presente nos seus poros. A quantificação desse estado energético é realizada a partir de duas formas de energia, a cinética e a potencial. A primeira pode ser desprezada, devido ao movimento lento da água no solo. Já, a segunda é muito importante, pois é função da posição e das condições internas. O mesmo autor afirma que a atuação de forças externas acarreta uma diferença de potencial entre a água intersticial e a água livre pura. Estes campos de força são o resultado da atração da matriz sólida a água, da presença de solutos e da ação de pressão externa e de gravidade, Equação (1).

$$\psi = \psi_m + \psi_{os} + \psi_{pn} + \psi_g \quad (1)$$

Onde;  $\psi$  = Potencial total

$\psi_m$  = Potencial matricial

$\psi_{os}$  = Potencial osmótico

$\psi_{pn}$  = Potencial pneumático

$\psi_g$  = Potencial gravitacional

Segundo Libardi (1995), o potencial matricial é o resultante das interações entre a matriz e a água intersticial, incluindo forças associadas com a adsorção e a capilaridade, responsáveis pela retenção da água no solo.

O potencial osmótico reflete a influência da presença de sais minerais e substâncias orgânicas (solutos) na solução da água do solo. A diferença de potencial osmótico não causa movimento significativo de água no solo (Reichardt, 1987).

O potencial pneumático origina-se de pressões externas de gás diferentes da pressão atmosférica e tem especial importância em ensaios de placa de pressão ou na técnica de translação de eixos (Vilar, 2006).

O potencial gravitacional é o produto da aceleração da gravidade pela diferença de cotas entre o reservatório padrão e a amostra de solo, ou seja, depende da posição em que a água se encontra com relação a um plano referencial.

O potencial de pressão é positivo quando a água dos vazios do solo está submetida a pressões hidrostáticas maiores do que a pressão atmosférica. Ao contrário, quando está submetida a pressões menores do que a pressão atmosférica, esse potencial é considerado negativo e é denominado como sendo sucção.

Quando o potencial gravitacional e pneumático pode ser desprezado, o potencial total da água do solo seria simplesmente a soma dos potenciais matricial e osmótico, e estes últimos podem ser representados como sendo a sucção. Portanto, o potencial total equivale á soma da sucção matricial com a sucção osmótica e sua magnitude corresponde ao trabalho total das forças de capilaridade, adsorção e osmose como definido na Equação (2). Geralmente, a sucção é expressa como pressão e, portanto, as unidades mais utilizadas são kPa, atm e bar.

$$S_t = S_m + S_{om} \quad (2)$$

Onde:  $S_t$  é a Sucção Total,  $S_m$  é a Sucção Matricial e  $S_{om}$  é a Sucção Osmótica.

A sucção matricial é igual à sucção total quando a água do solo é idêntica à água padrão (água pura ou solução com a mesma composição da água do solo), restando apenas o efeito da matriz do solo (capilaridade e adsorção).

Os principais problemas geotécnicos relacionados com os solos não saturados estão relacionados às mudanças climáticas que alteram principalmente a sucção matricial, deixando com menor influência as mudanças na sucção osmótica. No entanto, quando o solo experimenta algum tipo de contaminação química, a componente osmótica passa a ter um papel importante no estudo do comportamento do solo (Fredlund e Rahardjo, 1993).

### **2.2.3 Curva de retenção de água no solo**

Um fator determinante no comportamento dos solos não saturados é o grau de saturação. Isto ocorre em função da relação das fases do solo (sólida, água e ar) variar com o teor de umidade, o que, por sua vez, influencia o estado de tensões do solo. A presença de meniscos nos contatos entre partículas forma um estado de tensão negativo (ou sucção matricial), que aumenta as tensões efetivas do solo e a rigidez no esqueleto sólido. De acordo com Dineen (1997), o valor da sucção matricial depende do tamanho e distribuição das partículas, do tamanho dos poros e do grau de saturação. Quando a quantidade de água diminui, os meniscos interpartículas se contraem até chegar aos poros menores, o que reduz o raio de curvatura e aumenta a sucção matricial.

A relação que existe entre a quantidade de água nos poros do solo e a sucção é representada pela curva de retenção de água no solo ou curva característica (Figura 6). A quantidade de água presente no solo pode ser representada pelo grau de saturação, teores de umidade gravimétrico ou volumétrico. A trajetória da curva de retenção representa graficamente o acréscimo ou decréscimo no conteúdo de água presente no solo, durante os processos de umedecimento ou secagem. No entanto, estas trajetórias podem não coincidir para um mesmo valor de sucção. Este fenômeno é conhecido como histerese.

A determinação da curva de retenção pode ser realizada em laboratório mediante processos de secagem ou de umedecimento. Segundo Miller et al. (2002), um mesmo solo pode apresentar curvas de retenção diferentes se as amostras ensaiadas foram preparadas com diferentes valores de teor de umidade e se possuírem diferentes históricos de tensões. Conseqüentemente, vários são os fatores que podem influenciar a trajetória da curva de retenção, entre eles estão o teor de umidade inicial ou de moldagem, o índice de vazios, o tipo, estrutura e textura do solo, a mineralogia, o histórico de tensões e o método de compactação empregado.

A retenção da água no solo pode ser explicada por fenômenos de adsorção e capilaridade. A adsorção é influenciada pela textura e superfície específica do solo, ocorre quando partículas de água ficam aderidas à superfície dos sólidos, sendo mais importante quando o solo apresenta baixas umidades. Por outro lado, a capilaridade tem maior relevância quando o solo está mais úmido, a qual ocorre nos microporos sendo mais influenciada pela estrutura do solo (Libardi, 1995).

De acordo com Fredlund et al. (1994), a curva de retenção é definida como a variação da sucção em função da capacidade de retenção de água nos micro e macro poros do solo. A curva de retenção para solos muito uniformes mostra que para variações grandes de umidade acontecem pequenas variações na sucção, entretanto para solos bem graduados a relação entre a variação da sucção e a variação da umidade é mais regular. Na Figura 6 são apresentadas algumas das principais características da curva de retenção para trajetórias de secagem e umedecimento. Nessa figura  $\theta_s$  e  $\theta'_s$  são respectivamente, o teor de umidade volumétrica de saturação para a curva obtida pelo processo de secagem e pelo processo de umedecimento. A diferença entre os dois parâmetros anteriores ( $\theta_s - \theta'_s$ ) determina o conteúdo de ar residual. A pressão de entrada de ar corresponde ao início de entrada de ar, ou seja, o diferencial de pressões entre a água e o ar necessário para que os poros maiores iniciem a drenar.  $\theta_r$  é o teor de umidade residual.

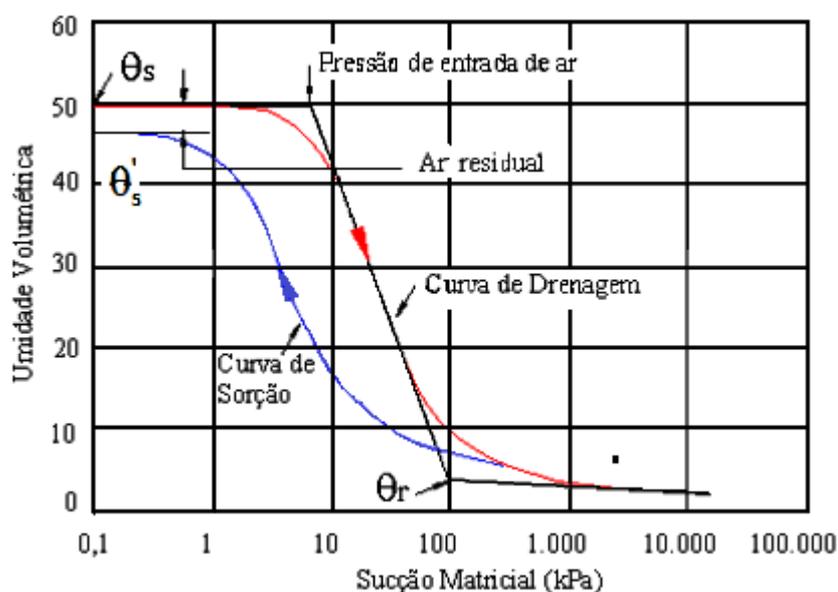


Figura 6. Curva de retenção de água no solo, Adaptado de Fredlund et al. (1994).

De acordo com Oliveira (2012), o ponto onde a sucção é nula representa o solo em estado saturado, onde a porosidade é igual ao teor de umidade volumétrica. A zona capilar é a região onde a sucção aumenta com o teor de umidade constante, no perfil do subsolo é

a região acima do nível freático. A região funicular, se encontra definida pela diminuição acentuada da umidade volumétrica com o aumento da sucção, é a região denominada zona de duas fases (fase ar contínua e água contínua). A porção final da curva onde o teor de umidade volumétrico é constante e atinge um valor residual é a região pendular, onde não há possibilidade de fluxo de água.

#### 2.2.4 Resistência ao Cisalhamento dos Solos não Saturados

O estado de tensões dos solos, incluindo as solicitações externas e internas, é o principal fator que descreve o comportamento mecânico dos solos. Desta forma, as variáveis de estado de tensão para um solo saturado foram definidas por Terzaghi (1936) utilizando o princípio das tensões efetivas, onde a tensão normal efetiva ( $\sigma'$ ) é igual à diferença entre a tensão normal total ( $\sigma$ ) e a pressão neutra ( $u$ ). O comportamento dos solos saturados é controlado pelas tensões efetivas, e rege o comportamento do solo em termos de variações volumétricas e de resistência a cisalhamento. Por isso, a descrição completa do estado de tensões efetivas nas três direções ortogonais, incluindo as componentes de cisalhamento, é necessária.

A condição de menor resistência dos solos saturados é o cisalhamento, já que esta situação revela a condição de mínima resistência. Neste sentido, a resistência ao cisalhamento aumenta com o incremento da sucção, ou seja, com o incremento das tensões efetivas. Fredlund et al. (1978), baseado no critério de ruptura de Mohr-Coulomb, apresentaram uma relação matemática que relaciona a resistência ao cisalhamento dos solos não saturados com a sucção (Equação (3)). Nesta equação, os autores se basearam no conceito de superfície de estado proposto por Mathias e Radhakrishma (1968), que estabeleceram que nos solos não saturados o estado de tensões é descrito totalmente pelas variáveis ( $\sigma - \mu_a$ ) e ( $\mu_a - \mu_w$ ).

$$\tau = c' + (\sigma - \mu_a) \tan \phi' + (\mu_a - \mu_w) \tan \phi^b \quad (3)$$

Onde:  $c'$  é a coesão efetiva,  $\mu_a$  é a poropressão do ar,  $\mu_w$  é a poropressão da água,  $(\mu_a - \mu_w)$  é a sucção matricial,  $\phi'$  é o ângulo de atrito interno efetivo,  $\phi^b$  é a razão do incremento da resistência ao cisalhamento com a sucção matricial.

A resistência ao cisalhamento pode ser representada graficamente no espaço, onde os eixos horizontais são os valores de tensão normal líquida ( $\sigma - \mu_a$ ) e de sucção matricial ( $\mu_a - \mu_w$ ), e no eixo das ordenadas se encontra a resistência ao cisalhamento ( $\tau$ ). Escario e Sáez (1986) demonstraram que a razão do incremento da resistência ao cisalhamento com a sucção matricial ( $\phi^b$ ) não é um parâmetro constante, podendo variar em função da sucção.

Igualmente observaram que a superfície de ruptura não apresenta uma variação linear com a sucção, tornando-se, portanto, curva.

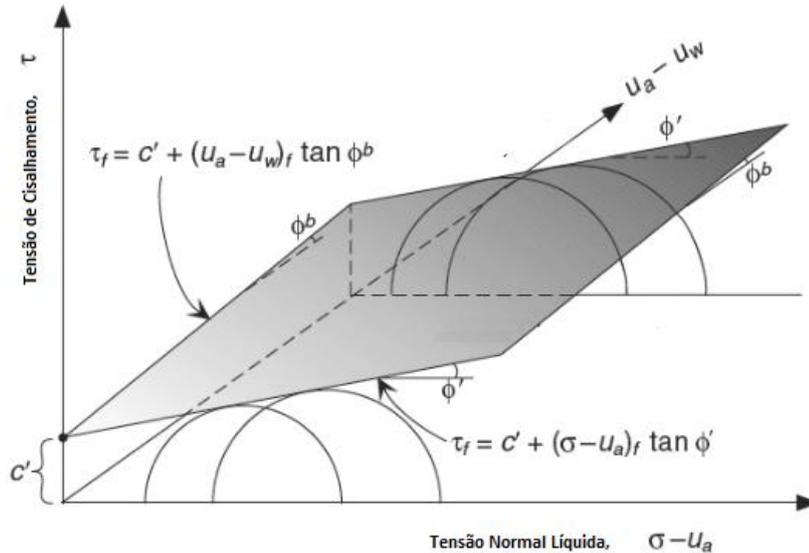


Figura 7. Envoltória de ruptura para os solos não saturados, Lu Ning e Likos (2004).

A realização de ensaios em campo e em laboratório em solos não saturados é muitas vezes demorada e de custo elevado. Neste sentido, autores como Vanapalli et al. (1996) e Fredlund e Xing (1994) tem proposto modelos matemáticos para determinar a resistência ao cisalhamento destes solos a partir da curva de retenção e dos parâmetros  $c'$  e  $\phi'$  do solo. Fredlund (2000) obteve resultados aceitáveis desta relação para aplicações geotécnicas, o que confirma a importância do conhecimento da curva de retenção de água do solo para melhor compreensão do comportamento mecânico de solos não saturados.

### 2.3 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DO SOLO

O conhecimento das propriedades geotécnicas do solo é de fundamental importância para projetos e construções de obras de terra como barragens, fundações, muros de contenção. Do mesmo modo, o teor de umidade do solo é uma das propriedades que influencia diretamente a resistência, a compressibilidade, a condutividade hidráulica guardando uma estreita relação com a sucção do solo.

O teor de umidade do solo pode ser determinado tanto por meio de ensaios de laboratório como de campo. Para a determinação em laboratório do teor de umidade a técnica considerada como padrão é realizada a partir da pesagem e secagem de amostras em estufa elétrica, sendo representada na forma gravimétrica. Esta técnica é simples e

confiável, mas apresenta algumas desvantagens. Dentre elas pode-se considerar sua natureza destrutiva, a umidade pode ser afetada no processo de transporte da amostra até o laboratório, o resultado é demorado (em geral 24 horas). Além disso, quando se tem uma grande quantidade de amostras ou de determinações a serem feitas, pode-se gerar atrasos. Outra forma de determinar o teor de umidade em laboratório é mediante a secagem do solo no forno micro-ondas (FMO) seguindo a norma ASTM D-4643. No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT ainda não estabeleceu uma norma para esse ensaio.

Em campo, o teor de umidade pode ser determinado por meio de métodos, como a sonda de nêutrons, reflectometria no domínio da frequência (FDR), radar de penetração no solo (GPR) e a reflectometria no domínio do tempo (TDR). Este último será abordado com maior detalhe adiante nesse trabalho.

O princípio da sonda de nêutrons baseia-se na propriedade que possuem os átomos de hidrogênio presentes na água do solo, de espalhar e diminuir a velocidade dos nêutrons quando colidem. A sonda de nêutrons compreende uma fonte radioativa de nêutrons rápidos ou de alta energia e um detector. Quando a sonda entra em contato com o solo, os nêutrons de alta energia emitidos pela fonte radioativa diminuem a sua velocidade e mudam de direção por colisões elásticas com os núcleos dos átomos do solo, predominantemente os de hidrogênio da água (Gardner, 1965; Bell, 1956). A densidade dos nêutrons “*lentos*” é função da quantidade de água no solo e o total destes nêutrons é coletado pelo detector de nêutrons dentro da sonda (Bell, 1956). O detector gera pulsos elétricos que são amplificados e mostrados como taxas de contagem média que podem ser traduzidas por meio de curvas de calibração em quantidades volumétricas de água (Araujo, 1994). A principal crítica ao uso da sonda de nêutrons se deve ao seu processo de calibração. Turatti (1990) afirma que ainda não foi possível estabelecer um critério adequado para a calibração da sonda. Além disso, a medida com a sonda de nêutrons é afetada pela variação de peso específico e de porosidade do solo. Isto faz com que as determinações de teores de umidade com essa sonda sejam frequentemente questionáveis e com pouca acurácia (Conciani et al. 1997).

A reflectometria no domínio da frequência (FDR) apresenta melhor acurácia, não é nociva para a saúde do operador e permite um registro contínuo de dados ao longo do perfil do subsolo. O método permite a determinação da constante dielétrica do solo baseado no seu conteúdo de água (Paltineanu e Starr, 1997). Quando a sonda entra em contato com o solo, este último se comporta como parte de um condensador. Desta forma, medindo a sua capacitância, se determina a constante dielétrica do solo e posteriormente seu teor de água (Camargo et al. 2012).

O radar de penetração no solo (GPR) é um método geofísico que utiliza a propagação de ondas eletromagnéticas de alta frequência, onde se descreve o comportamento dos campos eletromagnéticos em um meio poroso. Neste ensaio, uma antena transmissora emite ondas de energia eletromagnéticas em uma faixa entre 10 MHz e 1 GHz. Quando a onda eletromagnética encontra uma variação no material ou nas propriedades elétricas (condutividade elétrica aparente, constante dielétrica e permeabilidade magnética), parte de sua energia é refletida em direção à superfície onde é recebida por uma antena receptora e interpretada (Davis e Annan, 1989).

## **2.4 INFLUÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE NA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DOS SOLOS NÃO SATURADOS**

Nos itens anteriores foram abordadas as principais características dos solos não saturados, como também se descreveu a influência a água que exerce no comportamento mecânico dos solos. Por isto, e devido ao fato que na presente pesquisa será utilizado o ensaio de cone de penetração (CPT) como principal recurso para investigação do subsolo, é necessário buscar informações sobre a influência do teor de umidade ( $w$ ) na resistência à penetração dos solos.

Delgado (2002) estudou a influência da sucção no comportamento de um maciço de solo tropical compactado. O autor realizou ensaios de papel filtro para determinação da sucção, ensaios de Mini-CBR e de Cone adaptado para determinar a capacidade de suporte do solo e a resistência à penetração. O autor verificou que para todas as profundidades e com corpos de prova de densidades variáveis existe uma nítida redução da sucção com o aumento da umidade de compactação. Observou ainda que para a mesma umidade e diferentes índices de vazios, não ocorreram alterações significativas na sucção, colocando a umidade como o principal fator que influencia na sucção. Constatou também que, para uma determinada umidade de compactação, a sucção não sofre grandes variações com o aumento da energia de compactação aplicada. Finalmente, concluiu que de uma maneira geral a sucção influencia a resistência à penetração, sendo mais relevante nos pontos com menores teores de umidades de compactação.

A caracterização e determinação de parâmetros de projeto de solos não saturados exigem a coleta de amostras indeformadas e a realização de ensaios de laboratório, que são caros e demorados. Neste contexto, o ensaio de penetração cone (CPT) surge como uma ferramenta rápida e boa relação custo-benefício para ser empregada na investigação e caracterização desses tipos de solos. No entanto, as correlações que permitem utilizar os resultados desse ensaio para determinar os parâmetros de projeto foram desenvolvidas

para serem empregadas em areias e argilas saturados, podendo, por isso, levar a erros significativos quando utilizadas em perfis de solos tropicais não saturados.

Pournaghiazar et al. (2014) analisaram o efeito da sucção na resistência de ponta do ensaio CPT. Para isto, realizaram ensaios CPT em laboratório utilizando uma câmara de calibração com sucção controlada e um cone elétrico miniatura de 16 mm de diâmetro e 2 cm<sup>2</sup> de área de ponta. Os ensaios foram realizados com duas densidades relativas e cinco tensões de confinamento diferentes. Os autores observaram que em todos os casos a sucção faz com que a resistência de ponta ( $q_c$ ) seja maior quando comparada com o valor medido na condição saturada, para uma determinada combinação de densidades relativas e tensões de confinamento. Da mesma forma, a sucção teve um maior efeito nas amostras com menor densidade relativa e mostrou uma relação inversa com a tensão de confinamento, ou seja, à medida que a tensão de confinamento diminui o efeito da sucção aumenta. Estes autores demonstraram que a não consideração da influência da sucção nos valores de resistência de ponta ( $q_c$ ) medidas podem acarretar em erros significativos na estimativa da densidade relativa e do ângulo de atrito do solo investigado.

Collins e Miller (2014) realizaram um monitoramento contínuo do teor de umidade e da resistência de ponta em dois perfis de solo não saturados próximos à Universidade de Oklahoma, por um período de um ano. Um desses solos é composto por um silte argiloso de baixa plasticidade e o outro por uma argila de alta plasticidade. O principal objetivo desse monitoramento foi registrar as mudanças no teor de umidade do solo originadas pelas variações sazonais ao longo do ano, e avaliar a influência do teor de umidade e da sucção nos resultados de ensaios CPT. Os autores verificaram que o aumento no teor de umidade ( $w$ ), provoca uma redução na resistência de ponta ( $q_c$ ) e um aumento na razão de atrito ( $R_f$ ) para ambos os solos. Com o objetivo de se avaliar o efeito da variação do teor de umidade na classificação do solo, os autores classificaram cada perfil de solo nos dois períodos diferentes segundo a carta de classificação de Robertson et al. (1983). Verificaram-se diferenças no tipo de comportamento do solo, isto é, o mesmo solo no primeiro período teve um comportamento de silte arenoso a areia siltosa e no segundo período teve comportamento de argila. Os autores concluíram que as variações no teor de umidade podem resultar em diferentes classificações do solo, quando se utiliza a carta proposta por Robertson et al. (1983).

O solo que será estudado nesse trabalho é uma areia fina pouco argilosa que ocorre no campo experimental da Unesp de Bauru, localizado no interior do Estado de São Paulo. Neste local vem sendo realizada diversas pesquisas com a finalidade de conhecer e contribuir para uma melhor previsão do comportamento dos solos não saturados. Bezerra (2014) estudou a influência da variação do teor de umidade e da sucção nos resultados dos

ensaios CPT no campo experimental da Unesp de Bauru, onde ocorre um perfil de solo arenoso não saturado. O autor realizou ensaios CPT e monitorou o teor de umidade do perfil do subsolo até 8 m de profundidade por mais de um ano (entre junho/2011 e dezembro/2012), os resultados estão representados na Figura 8. Através da curva de retenção de água determinada para uma amostra desse solo coletada a 1 m de profundidade e assumindo que a mesma é representativa para o solo local até 8 m de profundidade, o autor calculou os valores de sucção correspondentes aos teores de umidade de campo. A variação de teor de umidade observada no campo variou entre 3 e 10% e a sucção entre 10 kPa e 5 Mpa. Ficou constatado ainda que as maiores variações ocorreram nos primeiros 4 m de profundidade. Segundo esse autor, as maiores variações de teor de umidade até 4 m de profundidade podem ser explicadas pela interação do solo com a atmosfera e pela sua porosidade, que faz que os processos de infiltração e evaporação sejam mais intensos.

A Figura 9 é possível observar o efeito do teor de umidade, portanto da sucção, nos valores de resistência de ponta e de atrito lateral determinados em ensaios CPT para um período de seca (agosto de 2012) e outro de chuvas (janeiro de 2012) apresentados por Bezerra (2014). Nessa figura pode-se observar um grande aumento na sucção nos primeiros 1.5 m de profundidade em agosto, provocado pela baixa umidade, o qual causa um aumento significativo na resistência de ponta e no atrito lateral do cone. Para profundidades superiores a 4 e 5 m os valores de sucção nos dois períodos (seca e chuvas) são muito próximos e assim como o perfil de variação de  $q_c$  e  $f_s$  dos dois ensaios são semelhantes, e as maiores diferenças estão correram até 1,5 m de profundidade. Bezerra (2014) concluiu que existe grande diferença nos valores de  $q_c$  e  $f_s$  entre os períodos úmidos e secos do ano, o que comprova a influência do teor de umidade nos resultados de ensaios de penetração de campo, como o CPT. Da mesma forma que Collins e Miller (2014), Bezerra (2014) também constatou que a variação do teor de umidade em diferentes épocas do ano afeta os valores de resistência de ponta e no atrito lateral medidos em ensaio CPT, também pode influenciar na classificação do tipo de comportamento desolo. Esse autor verificou que dependendo da época do ano o solo pode ser classificado como uma areia, areia siltosa, silte arenoso ou silte argiloso.

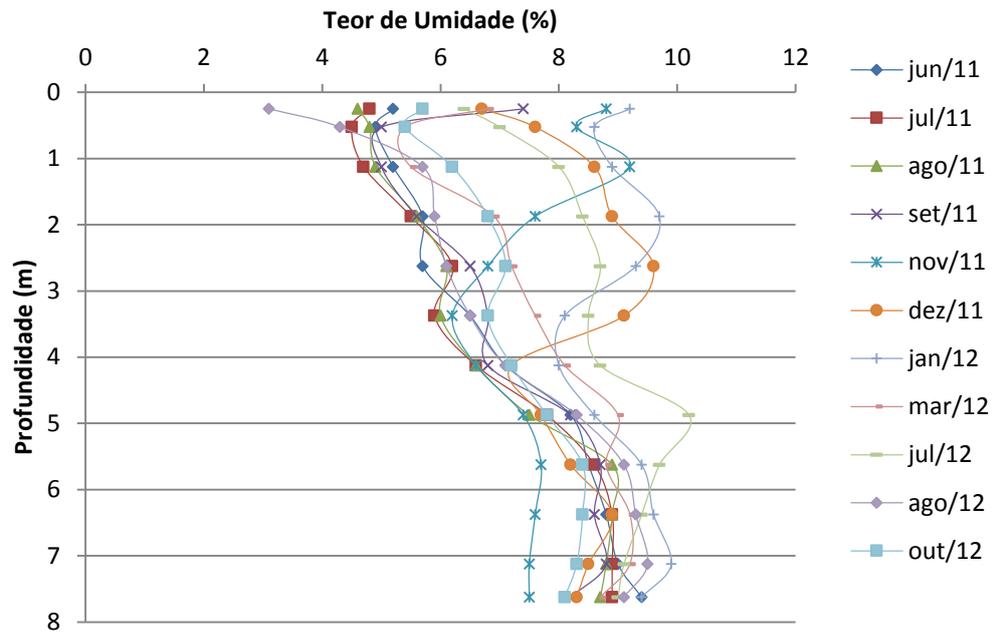
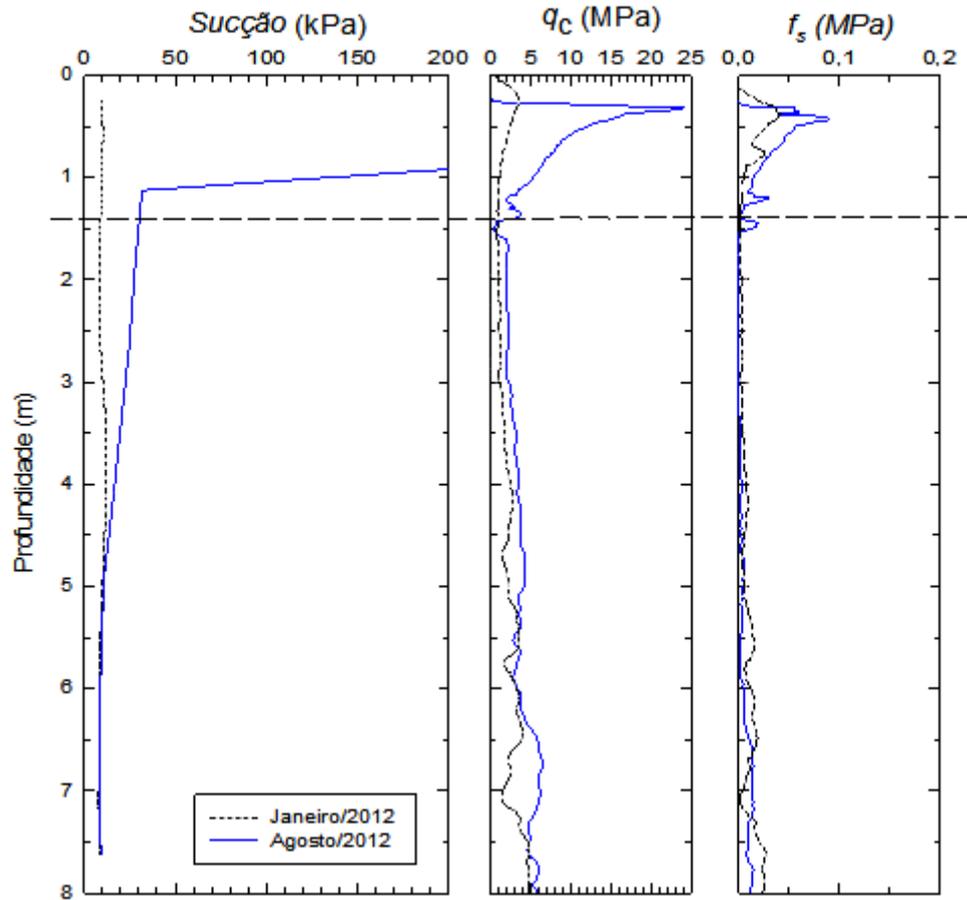


Figura 8. Perfil de variação do teor de umidade entre junho/2011 a outubro/2012, Bezerra (2014).



\* No mês de agosto/2012 o valor da sucção para a profundidade 0.25 m foi de 5843 kPa

Figura 9. Resultados de ensaios CPT e perfil de em Janeiro/2012 e Agosto/2012, Bezerra (2014).

## 2.5 REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO-TDR

A Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) foi originalmente empregada para se avaliar possíveis falhas em linhas de transmissão de companhias de energia elétrica e telefônicas (Ramo et al. 1994). A partir da década de 1970 teve início a aplicação desta técnica para determinação do teor de umidade e solos a partir da medida da constante dielétrica. A aplicação deste método visando a estimativa do teor de umidade dos solos foi introduzida por Topp et al. (1980). Para aplicações geotécnicas esta técnica foi utilizada pela primeira vez por Kujala e Ravaska (1994).

O princípio da Reflectometria no Domínio de Tempo (TDR) é similar àquele utilizado pelos sistemas georadar. A técnica baseia-se na propagação de ondas eletromagnéticas através de hastes condutoras inseridas em um meio. Para isto uma fonte geradora, ou um Testador de Cabos, aplica um pulso através de um cabo coaxial gerando uma onda que percorre todo cabo até alcançar as hastes da sonda inserida no solo (Figura 10). Uma parte do sinal é refletida de volta devido às mudanças nas propriedades elétricas ou alteração de impedância entre o cabo e o início das hastes. Outra parte do sinal continua percorrendo as hastes até o final do hasteamento, onde é refletida novamente devido a outra variação na impedância (Viera et al. 2005).

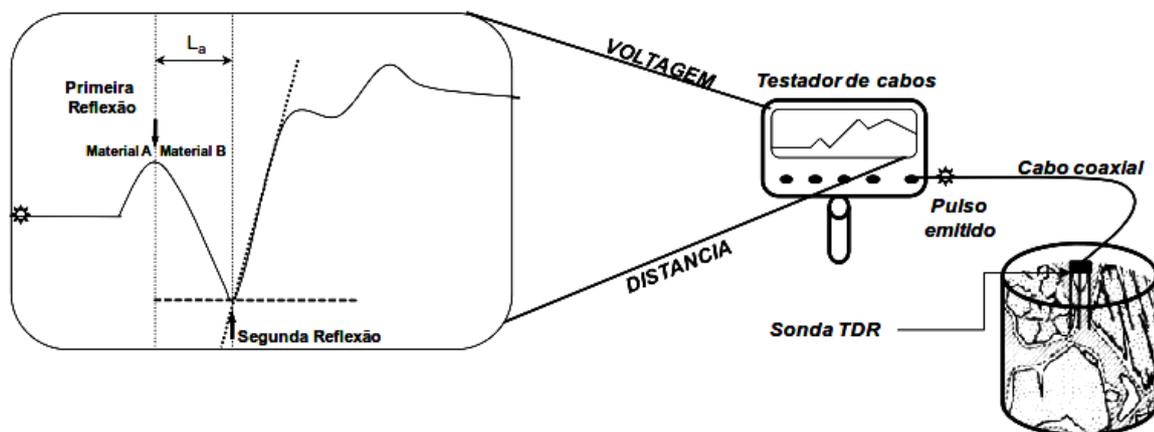


Figura 10. Esquema da interpretação da técnica TDR. Calderón (2010).

O equipamento possibilita que se determine a amplitude das ondas refletidas. A leitura dos pulsos pode ser representada num gráfico da relação entre as variações de impedância e o tempo. O tempo é determinado pelo percurso da onda entre as duas reflexões, a primeira no início das hastes dentro do solo e a segunda no final das hastes, ou guias de ondas (O'Connor e Dowing, 1999; Topp et al. 1980; Topp e Davis, 1985). O registro da onda exibida na tela do testador de cabos Tektronix, apresenta o eixo das

abscissas em forma de distância adimensional. Para transformar essa distância em metros é necessário utilizar o valor da escala de registro da onda.

Para determinar a constante dielétrica é necessário estimar a velocidade de propagação da onda, de acordo com a Equação (4).

$$v = 2L/t \quad (4)$$

onde:  $v$  = Velocidade de propagação da onda,  $L$  = Comprimento das hastes guia (m) e  $t$  = Tempo de percurso da onda na sonda, ida e volta (s)

De acordo com a teoria de eletromagnetismo a velocidade de propagação pode ser expressa em termos da constante dielétrica do meio ( $K$ )<sup>1</sup>, assim;

$$v = c/\sqrt{K} \rightarrow K = (c/v)^2 \quad (5)$$

onde:  $c$  = Velocidade da luz no vácuo ( $3 \times 10^8$  m/s) e  $K$  = Constante dielétrica do meio

Combinando as equações (4) e (5) se obtém:

$$K = \left(\frac{ct}{2L}\right)^2 \quad (6)$$

As variações na impedância se devem a mudança na constante dielétrica ( $K$ ) do meio onde as hastes e o cabo estão inseridos; o cabo no ar e as hastes no solo. A constante dielétrica do ar tem um valor mínimo igual a 1, a água um valor máximo de 81 enquanto a constante dielétrica dos minerais (sólidos) que compreendem o solo varia entre 3 e 5 (Noborio, 2001). Assim, a água tem um valor de constante dielétrica muito superior que a dos sólidos e do ar. Dessa forma, a constante dielétrica da mistura sólido-ar-água sofre maior influência da quantidade de água presente no solo. A constante dielétrica ( $K$ ) da mistura solo-água-ar é denominada constante dielétrica aparente ( $K_a$ ), e pode ser utilizada para se calcular a umidade volumétrica do solo ( $\theta$ ) por meio de curvas de calibração obtidas por meio de ensaios de laboratório ou de campo (Souza e Matsura, 2003). A relação entre a constante dielétrica do solo e o teor de umidade foi estudada por vários autores (Topp et al. 1980; Hallikainen et al. 1985).

Quando um solo está completamente seco o valor de sua constante dielétrica é um pouco inferior aquele dos minerais que o formam. Quando o teor de umidade aumenta, também aumenta o valor da sua constante dielétrica.

---

<sup>1</sup> A constante dielétrica é a razão entre a permissividade absoluta de um material e a permissividade absoluta do vácuo, portanto é um valor adimensional.

Alguns modelos de testadores de cabos não fornecem o tempo de percurso da onda e sim o comprimento da linha de transmissão ou “comprimento virtual”. Para estes casos se utiliza a Equação (7) para se calcular a constante dielétrica:

$$K = \left[ \frac{S_{TDR}}{V_p L} \right]^2 \quad (7)$$

onde  $S_{TDR}$  = Comprimento virtual da sonda lido no aparelho e  $V_p$  = Velocidade de propagação do sinal dada como uma porcentagem da velocidade da luz no vácuo.

Quando se utiliza uma sonda TDR tradicional (de três hastes), se deve determinar a constante dielétrica ( $K$ ) por meio da Equação (8), representada a seguir:

$$K = \left( \frac{L_a C_m}{L V_p} \right)^2 \quad (8)$$

onde:  $L_a$  = Comprimento aparente da sonda (Figura 11);  $C_m$  = Constante de calibração do aparelho,  $L$  = Comprimento da sonda e  $V_p$  = Relação entre a velocidade real de propagação do pulso e a velocidade da luz (aproximadamente 0,99).

Um registro típico do ensaio TDR é apresentado na Figura 11. Uma vez determinada a constante dielétrica ( $K$ ), é possível fazer a correlação com o teor de umidade volumétrico ( $\theta_{TDR}$ ) referido nas equações de calibração.

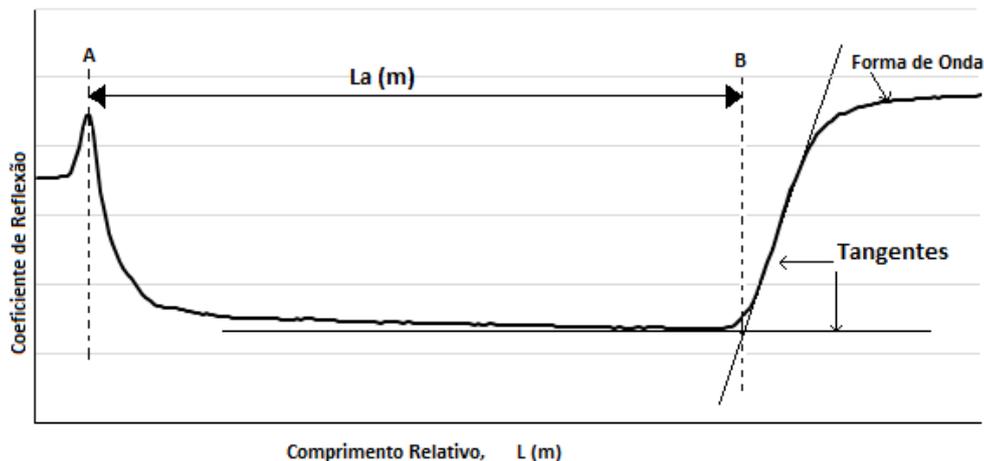


Figura 11. Exemplo de um registro de ensaio TDR (trace)

Quando se utiliza um aparelho que forneça a distância virtual entre o início e o final da sonda, e conhecendo as características do sinal, pode-se empregar a Equação (9) para a determinação da constante dielétrica aparente:

$$K_a = \left[ \frac{L_a}{L V_p} \right]^2 = \left[ \frac{(B - A)}{L V_p} \right]^2 \quad (9)$$

onde:  $K_a$  é a Constante dielétrica aparente,  $L_a = (B-A)$  = Comprimento aparente da sonda (m),  $B$ = Distancia aparente correspondente ao ponto de inflexão final,  $A$ = Distancia aparente correspondente ao ponto de inflexão inicial e  $L$ = Comprimento real da sonda (m).

Na Equação (9) é possível se observar que a constante dielétrica aparente ( $K_a$ ) é função do quadrado do comprimento aparente ( $L_a$ ), portanto é imprescindível que se tenha o melhor valor possível do comprimento  $L_a$ , já que qualquer erro nesta medida pode afetar o valor de  $K_a$ . Portanto, existem alguns métodos padrões para a determinação do valor de  $L_a$ , no entanto cada método adota posições diferentes para os pontos de inflexão inicial e final do registro.

Estes métodos são os seguintes:

- Método das tangentes
- Método dos picos
- Método das linhas divergentes
- Método das tangentes alternativo.

No método das tangentes, o ponto de inflexão inicial (Ponto A) é determinado pela interseção de duas tangentes; a primeira é traçada na horizontal no ponto de máximo valor na curva e a outra é traçada no segmento seguinte, com declividade negativa. Para o ponto de inflexão final se deve traçar uma tangente horizontal no ponto de valor mínimo na curva e outra tangente no segmento seguinte com declividade positiva. A interseção dessas duas tangentes marca o ponto de inflexão final (Figura 12a).

No método dos picos traça-se uma tangente no segmento anterior ao ponto de máximo valor (com declividade positiva) e outra tangente no segmento do meio e com declividade negativa. Na interseção dessas duas tangentes marca o ponto de inflexão inicial (Ponto A). O ponto de inflexão final é determinado pelo ponto de interseção entre a tangente do segmento do meio e a tangente do segmento com declividade positiva seguinte ao ponto de valor mínimo (Figura 12b).

Pelo método das linhas divergentes se traça uma reta tangente ao segmento anterior do ponto de valor máximo. O ponto de inflexão inicial é determinado por o local onde essa tangente diverge da curva. O ponto de inflexão final é determinado no local onde a tangente ao segmento do meio (com declividade negativa) diverge com a curva pelo ponto de menor valor (Figura 12c).

Finalmente, no método das tangentes alternativo, o ponto de inflexão inicial é a interseção entre a reta tangente ao segmento anterior do ponto de valor máximo e a horizontal ao ponto de maior valor na curva. O ponto de inflexão final é definido pela interseção entre a tangente ao segmento do meio (com declividade negativa) e a horizontal ao ponto de menor valor na curva (Figura 12d).

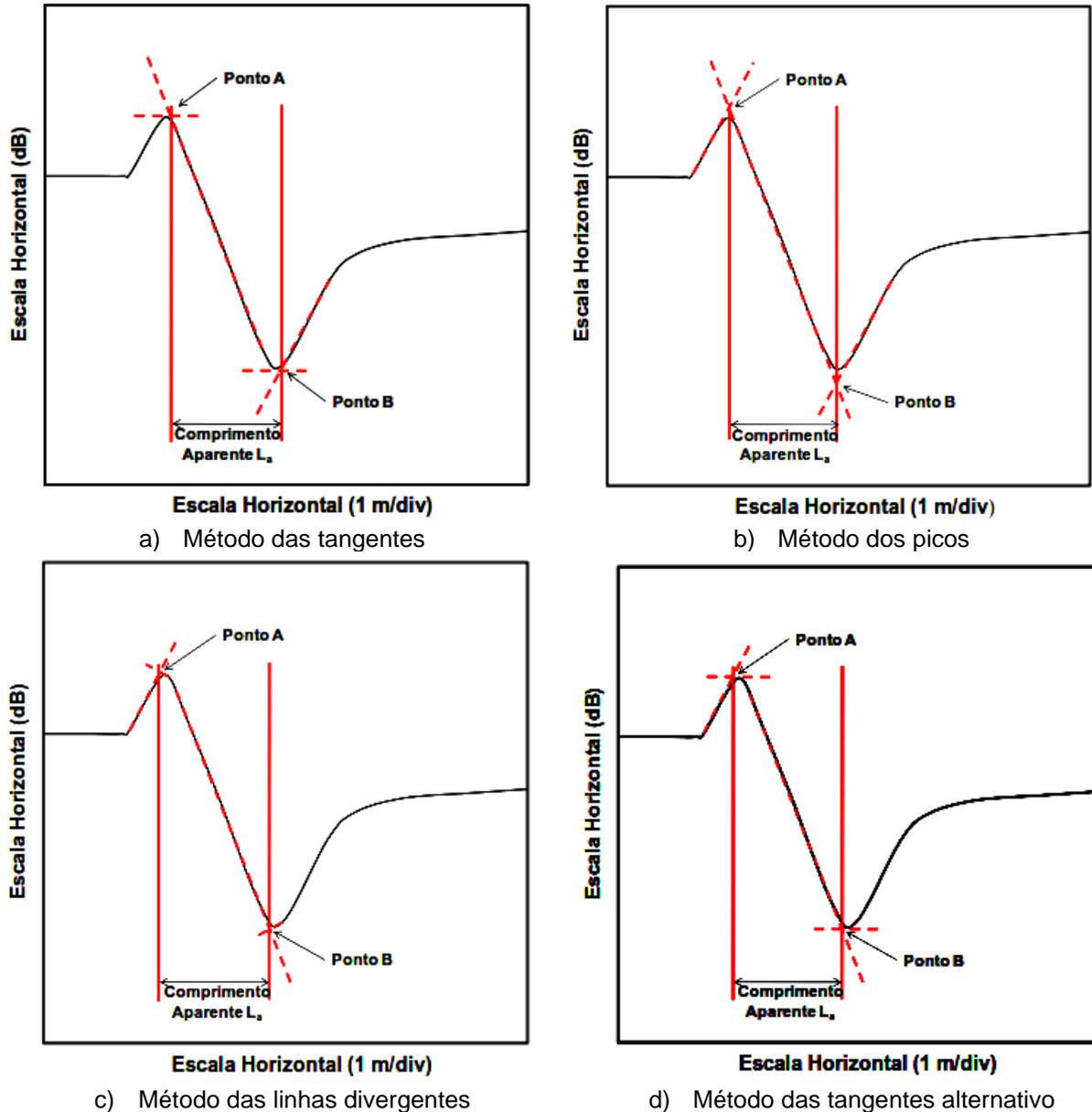


Figura 12. Métodos para a determinação dos pontos de inflexão, adaptado de Klemunes Jr. (1998)

Esquivel (2004) afirma que no estágio atual, a técnica TDR apresenta as seguintes vantagens:

- São geralmente precisos, rápidos e não destrutivos, sendo realizados por meio de equipamentos portáteis,

- Possibilita a realização de medições automaticamente,
- É uma alternativa em relação ao método da sonda de nêutrons, quando for necessário realizar medições próximas à superfície do terreno,
- Determina uma média ponderada espacial do teor de umidade, cobrindo todo o comprimento da sonda,
- Quando utilizado corretamente, produz resultados mais precisos que os outros métodos, mesmo havendo grandes variações de temperatura.

Esquivel (2004) afirma também que a principal limitação dessa técnica se deve ao fato de que a estimativa do teor de umidade está limitada às camadas superficiais do terreno. No entanto, essa limitação não é um problema para aplicação em solos não saturados, uma vez que as maiores variações sazonais de teor de umidade ocorrem nos primeiros metros do perfil do subsolo.

Considerando que reflectometria no domínio do tempo (TDR) pode ser considerada uma das técnicas mais promissoras para a determinação do teor de umidade do solo, seu uso pode proporcionar uma informação adicional para a investigação dos solos não saturados quando se tem a curva de retenção de água no solo. Deste modo é possível fazer uma boa estimativa da sucção ao longo do perfil do subsolo. No entanto, para aplicação na investigação geotécnica de campo é desejável que o uso do TDR esteja associado a outras técnicas de investigação convencionais em geotecnia, como por exemplo o ensaio de penetração de cone (CPT) ou a sondagem de simples reconhecimento (SPT).

### **2.5.1 Equipamentos TDR**

A reflectometria no domínio do tempo é um método relativamente novo para determinar o teor de umidade e a condutividade elétrica aparente em solos. Atualmente, existem vários sistemas TDR disponíveis comercialmente, que podem ser utilizados para a medida da constante dielétrica dos solos, (Figura 13).

O equipamento que gera os pulsos eletromagnéticos que são transmitidos através do cabo coaxial é denominado comumente de testador de cabos. Ele é composto por um osciloscópio, um amostrador e um gerador de pulsos (Figura 14). Este último emite um pulso eletromagnético que viaja através de um meio. O osciloscópio projeta o sinal em forma gráfica. No eixo das abcissas tem-se o tempo de propagação ou comprimento relativo e no eixo das ordenadas tem-se a voltagem, amplitude ou coeficiente de reflexão.



a. Tektronix 1502C

b. Trase System-Soilmoisture  
Equipment Corp.

c. TRD100-Campbell Scientific Inc.

Figura 13. Diferentes equipamentos TDR, Vaz et al. (2004).

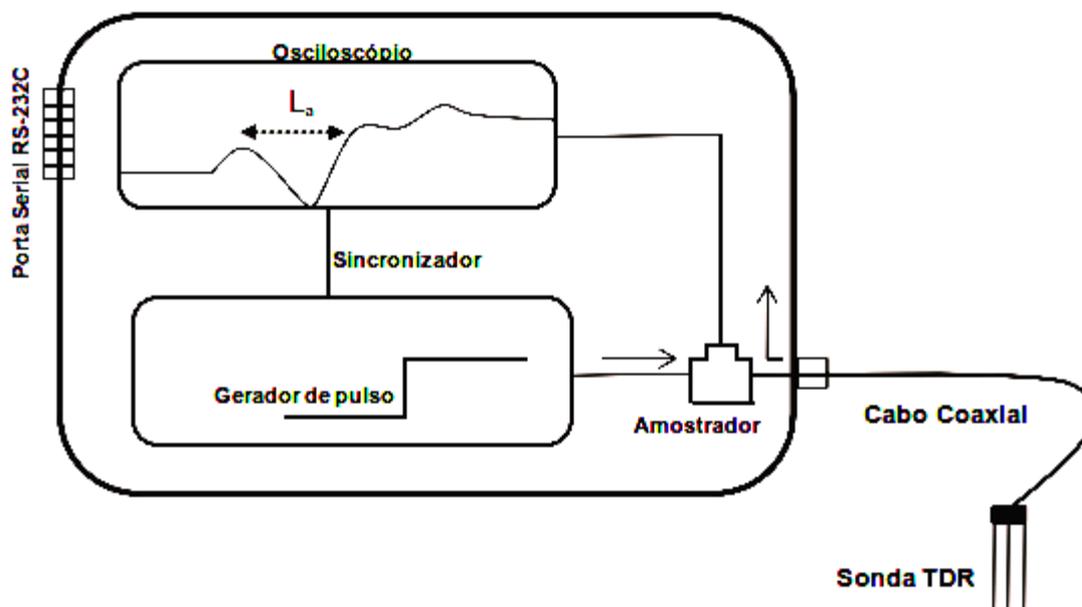
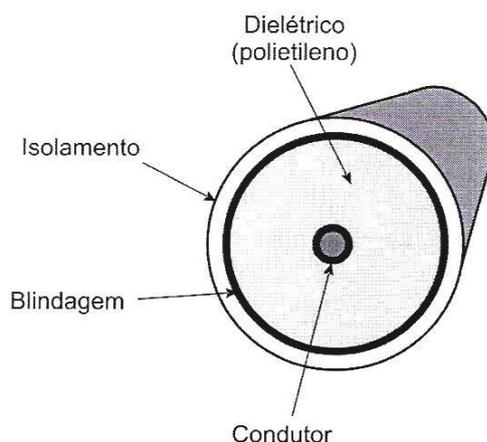


Figura 14. Esquema de aquisição de dados com o TDR, Calderón (2010).

Os pulsos eletromagnéticos se propagam através do condutor do cabo coaxial (Figura 15), com uma voltagem de 0.225 V entre o fio condutor e a malha de blindagem que o envolve. A velocidade da onda varia dependendo do material por onde é transmitida. Por exemplo, se é transmitida pelo vácuo sua velocidade é igual a velocidade da luz, se for transmitido por um material de polietileno a velocidade será de 66% da velocidade da luz.



**Figura 15. Representação esquemática de um cabo coaxial. Assis (2008).**

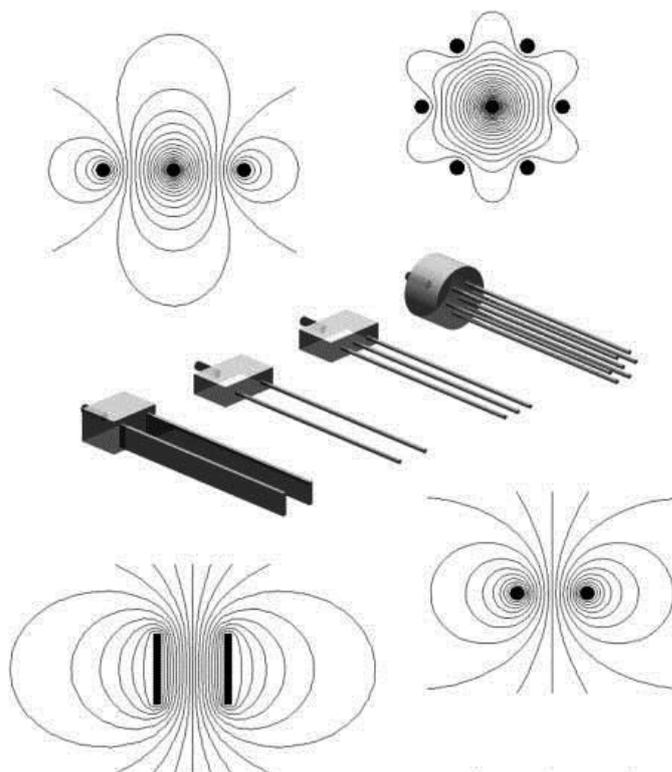
O amostrador tem duas funções, a primeira é detectar e medir o pulso eletromagnético e a segunda é analisar ou contabilizar o tempo de percurso das ondas entre o condutor e a malha de blindagem.

### **2.5.2 Sonda TDR**

São vários os projetos de sondas encontrados na literatura e que podem ser utilizados em diferentes cenários, dependendo da necessidade do usuário. Campbell (1990) e Heimovaara (1994) utilizaram sondas de sete fios para a medição da constante dielétrica em solos e em líquidos. As configurações geométricas variam desde sondas de duas hastes até sondas de várias hastes, as quais possuem um condutor central simples e de uma a seis hastes condutoras externas.

A principal vantagem das sondas de duas hastes é de minimizar a perturbação do solo, entretanto, podem produzir um sinal desequilibrado, captar ruídos e a perda de sinal (White e Zegelin, 1995). Estes problemas podem ser minimizados utilizando um *Balun*<sup>2</sup> instalado na cabeça da sonda para reduzir a perda de sinal e de informação (Spaans e Baker, 1993). Por outro lado, as sondas de duas hastes levam a resultados mais confiáveis nas medições da constante dielétrica do que as sondas de três hastes (Ferre et al. 1996). Na Figura 16 são apresentados os campos elétricos gerados por diferentes modelos de sonda TDR.

<sup>2</sup> Balun é um dispositivo adaptador de impedância que transforma uma linha balanceada em desbalanceada e vice-versa, ou seja, transforma cabo coaxial em paralelo, ou, paralelo em coaxial.



**Figura 16. Representação esquemática de campos magnéticos em diferentes modelos de sonda TDR. Jones et al. (2002).**

Uma proposta de se fazer uma sonda TDR de forma helicoidal não convencional tipo serpentina, que permita diminuir o tamanho da sonda, conservando as características de medições de alta resolução espacial foi idealizada e realizada por Selker et al. (1993). Nela, o condutor e os fios terra da sonda devem ser fixados dentro de uma placa de acrílico. O comprimento físico da sonda pode ser reduzido sem que ocorra alteração no tempo de propagação da onda eletromagnética (Esquivel e Giacheti, 2007). Um conceito similar foi utilizado por Nissen et al. (1998), Vaz e Hopmans (2001) e Persson e Wraith (2002) para aplicações na agricultura. Esses autores projetaram e construíram sondas helicoidais para a determinação do teor de umidade a pequenas profundidades. A sonda helicoidal desenvolvida por Vaz e Hopmans (2001) é apresentada na Figura 17.

Manieri et al. (2007) testaram a sonda helicoidal TDR desenvolvida por Vaz e Hopmans (2001), posicionada na extremidade de uma haste de aço de 60 cm de comprimento e acoplada a um penetrômetro de impacto para possibilitar a sondagem detalhada do teor de umidade ao longo de um perfil de solo. A calibração dessa sonda foi realizada em laboratório com sete solos de diferentes texturas, considerando um ajuste com todos os solos em conjunto e outro separando os solos por texturas ( aqueles com teores de argila + silte < 50% e argila + silte > 50%). Os erros-padrão durante a calibração foram de 0.063 ( $m^3/m^3$ ) com a equação de ajuste para todos os solos, 0.033 ( $m^3/m^3$ ) para o ajuste

da textura argila + silte < 50% e  $0.060 \text{ (m}^3/\text{m}^3\text{)}$  para o ajuste da textura argila + silte > 50%. Entretanto os erros-padrão da estimativa nos ensaios de campo foram de  $0.063 \text{ (m}^3/\text{m}^3\text{)}$  para o ajuste com todos os solos e  $0.054 \text{ (m}^3/\text{m}^3\text{)}$  para o ajuste por classes texturais de solo.

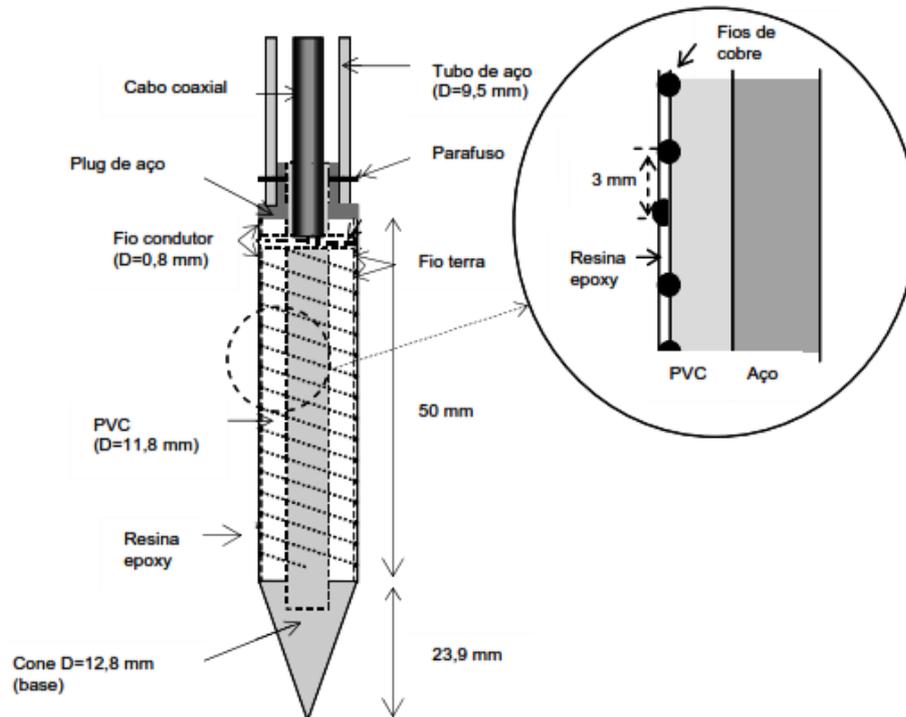
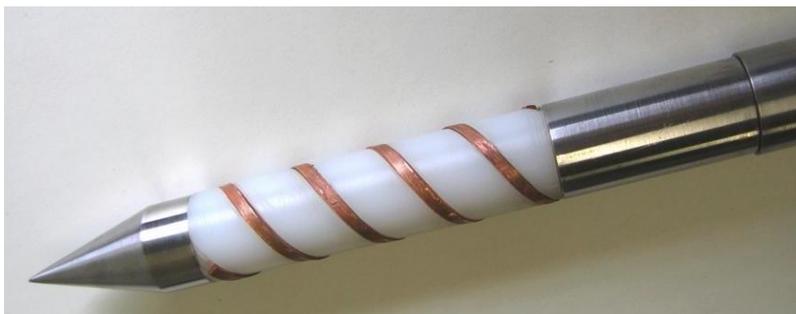


Figura 17. Detalhe da sonda helicoidal desenvolvida por Vaz e Hopmans (2001).

Considerando o sucesso da aplicação da sonda helicoidal para fins agrícolas surgiu a ideia de se desenvolver uma sonda TDR semelhante para aplicação em fins em geotecnia, a qual deveria ser inserida no terreno dinâmica ou quase estaticamente e a maiores profundidades. Esquivel e Giacheti (2007) idealizaram uma sonda (Figura 18) projetada para trabalhar em conjunto com equipamentos de ensaio SPT e CPT, que fosse capaz de determinar o teor de umidade gravimétrico e densidade seca do solo em diferentes profundidades.

Os fios de transmissão (eletrodos) são enrolados em um núcleo de nylon que por sua vez está montado em um núcleo de aço 1040. Cada fio de transmissão tem um comprimento de 280 mm, uma espessura de 3 mm e uma secção transversal retangular com uma área de  $10 \text{ mm}^2$ . Os fios terra e condutor tem um espaçamento de 30 mm entre eles e são fixados com resina epóxi. Um cabo coaxial de  $50 \Omega$  conecta a sonda com o testador de cabos. Uma foto dessa sonda é mostrada na Figura 18.



**Figura 18. Sonda Helicoidal, Esquivel e Giacheti (2007)**

Vários foram os pesquisadores que trabalharam com a sonda helicoidal desenvolvida por Esquivel e Giacheti (2007). Inicialmente Assis (2008) realizou ensaios de campo em três locais diferentes, determinando o teor de umidade do solo com o equipamento TDR e coletando amostras de solo para a determinação da umidade gravimétrica em laboratório. Os ensaios foram realizados em um perfil de areia argilosa, no Campus I e II da USP e no campus da UFSCar, todos na cidade de São Carlos. Os resultados da caracterização e os intervalos de erro padrão encontrados nos ensaios de campo realizados são apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3. Propriedades de alguns solos estudados por Assis (2008).**

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

O autor comparou os valores de teor de umidade estimados com a sonda helicoidal com os valores determinados em laboratório pelo método da estufa elétrica, em quatro campanhas de até 4.5 m de profundidade, em cada local. Os teores de umidades gravimétricos de referência em campo encontravam-se dentro do intervalo de 11.8 e 30.5 %. Após comparação com os teores de umidades determinados em laboratório, se obteve erros-padrão variando entre 1.20 % e 6.19 %.

Essa mesma sonda helicoidal foi utilizada por Lima (2009) como uma ferramenta para avaliar o processo de consolidação de materiais moles em barragens de rejeitos. O autor realizou determinações de teores de umidade empregando a técnica TDR na lagoa de contenção número nove da Mineração Jundu Ltda., no município de Descalvado (SP), e comparou seus resultados com os teores de umidades determinados em laboratório pelo

método da estufa elétrica. O erro padrão médio da estimativa encontrado foi de 4.98%, para valores de teores de umidade gravimétrica de referência que variaram entre 58.1% e 133.8%. O material estudado foi classificado como uma argila siltosa.

### 2.5.3 Calibração

Para que a determinação do teor de umidade com uma boa acurácia por meio da técnica TDR é fundamental realizar uma calibração correta do equipamento a ser empregado. A acurácia nas medidas da  $K_a$  depende do tempo de propagação do sinal ao longo da haste e da eficiência da equação de calibração que relaciona os valores de  $\theta$  e  $K_a$ . Para se obter uma relação entre esses dois parâmetros é necessário realizar simultaneamente, medidas da constante dielétrica aparente e do teor de umidade do meio de interesse. No entanto, o procedimento de calibração pode ser realizado a partir de medidas da constante dielétrica em meios nos quais este valor seja previamente conhecido como, por exemplo, etanol, álcool etílico, água destilada entre outros. Assim é possível correlacionar os valores determinados com os conhecidos por meio de uma equação, chamada de curva de calibração ou simplesmente de calibração.

A correlação entre o teor de umidade volumétrico e  $K_a$  permite encontrar uma curva de calibração, a partir da qual se tem a equação de calibração do equipamento específico para um dado tipo de solo. A equação é obtida utilizando modelos de regressão.

Uma das equações mais conhecidas que correlaciona os parâmetros  $K_a$  e  $\theta$  foi desenvolvida a partir de resultados de ensaios experimentais realizados por Topp et al. (1980).

$$K_a = 3.03 + 9.3 \theta + 146.0 \theta^2 - 76.7 \theta^3 \quad (10)$$

Topp et al. (1980) afirmaram que essa equação polinomial de terceiro grau é válida para todo tipo de solo, mas o tipo de solos utilizados em sua pesquisa foram muito restritos. Dirksen e Dasberg (1993) utilizaram a essa equação na determinação do teor de umidade volumétrico para dois solos brasileiros encontrando diferenças significativas.

Na literatura existem diversos trabalhos que apresentam a calibração do equipamento TDR. Como exemplo, tem-se o trabalho de Coelho et al. (2006), que avaliaram a aplicação de vários modelos de calibração, entre eles: um polinômio do terceiro grau próprio ( $\theta = a + b K_a + c K_a^2 + d K_a^3$ ), os modelos de Topp et al. (1980), Ledieu et al. (1986), Whalley (1993), Roth et al. (1990) e de Malicki et al. (1996). Esses modelos relacionam a constante dielétrica do solo com o seu correspondente teor de umidade volumétrico. Coelho et al. (2006) também usaram duas sondas de três hastes em cada uma,

dois tipos distintos de equipamentos testadores de cabo (Trase System e TDR 100) e três tipos diferentes de solo, avaliando também o uso de multiplexadores na conexão entre a sonda e o testador de cabos. Verificando que o polinômio do terceiro grau próprio foi aquele que apresentou melhor desempenho e acurácia na calibração para cada tipo de solo estudado.

Assis (2008) calibrou uma ponteira helicoidal e avaliou seu desempenho para determinação do teor de umidade ao comparar os valores medidos pelo TDR em campo com os valores de referência de campo, determinados com a estufa elétrica. A calibração foi feita compactando-se o solo em um recipiente cilíndrico com teor de umidade e densidade pré-estabelecidas. Posteriormente foram feitas medidas da constante dielétrica aparente e do teor de umidade gravimétrico dessa amostra de solo. Esse procedimento foi repetido diversas vezes até atingir teores de umidade elevados. Assim, foram obtidos os dados para se traçar a curva de calibração e selecionar aquela com maior acurácia, ao comparar com os valores de teores de umidade de referência. As calibrações se basearam nas correlações entre  $w$  e  $\sqrt{K_a}$ ,  $w$  e  $K_a$ ,  $\theta$  e  $K_a$  e na proposta por Yu e Drnevich (2004), a qual considera também a massa específica do solo. Os melhores resultados foram obtidos quando se empregou a equação de calibração que relaciona  $w$  e  $\sqrt{K_a}$ .

Conforme mencionado anteriormente, a constante dielétrica de um meio poroso é afetada principalmente pelo teor de umidade. No entanto, existem outros fatores que, em menor escala, influenciam o seu valor. Segundo Topp et al. (1980) a constante dielétrica também é afetada pela massa específica, a temperatura, a textura e a estrutura do solo, os sais solúveis e a frequência de mensuração.

Autores como Trintinalha (2000) e Souza et al. (2001), analisaram o efeito da compactação do solo na determinação de  $K_a$ , e concluíram que a massa específica influencia  $K_a$  e, portanto, deveria ser incluída na equação de calibração a ser empregada.

Tommaselli (1997) estudou a influência de algumas características do solo na calibração do TDR. Este autor estudou cinco solos da região de Piracicaba (SP), variando o tamanho das partículas, a superfície específica, o teor de óxido de ferro, a densidade das partículas e o teor de matéria orgânica.

Santos et al. (2010) aplicaram os modelos de calibração de Topp et al. (1980), Ledieu et al. (1986) e Roth et al. (1990), polinômio de terceiro grau e uma função da raiz quadrada da constante dielétrica, com o intuito de avaliar o efeito do tipo de amostras (deformadas ou indeformadas) e do tipo de solo nas determinações da constante dielétrica aparente. Eles concluíram que o tipo de amostra não influencia os valores de teor de umidade volumétrico do solo para um mesmo valor da constante dielétrica. Concluiu que

tanto amostras deformadas como indeformadas podem ser empregadas na calibração. Além disso, a equação de calibração com um polinômio do terceiro grau foi aquela que apresentou o melhor ajuste com o conteúdo de água de referência (determinado por gravimetria) para um solo argilo-arenoso e para uma areia grossa. Para uma argila-siltosa os autores observaram que a equação de uma reta linear foi aquela que apresentou o melhor ajuste. Este estudo destaca a necessidade da realização uma calibração para cada tipo de solo. Do mesmo modo, Tommaselli (1997) demonstrou que o uso de uma única equação de calibração válida para todos os tipos de solo, pode proporcionar erros significativos na determinação do teor de umidade.

A calibração de equipamentos TDR vem sendo amplamente discutida e duas formas de abordagem podem ser encontradas na literatura: uma de natureza empírica e outra de natureza semiempírica ou física. A primeira relaciona por meio de uma função duas variáveis diferentes, sem a necessidade de se ter um significado físico entre elas. Logo essa equação depende das condições específicas do solo de origem e pode ser aplicada a outros solos com características similares. Embora esse tipo de equação possa ser utilizado para dois solos semelhantes, é preferível se ter uma calibração específica para cada tipo de solo. O modelo de calibração de natureza semiempírica (ou física) está baseado no modelo misto dielétrico, que considera a constante dielétrica e a fração volumétrica de cada um dos constituintes do solo (Tinga et al. 1973; Roth et al. 1990). No entanto, Tommaselli (1997) separa os modelos de calibração semiempíricos do modelo físico, sendo que este último assume o solo como uma mistura de quatro substâncias e representa a fase sólida como partículas em forma de placas.

São vários os trabalhos que avaliaram e compararam resultados de diferentes modos para calibrar de equipamentos TDR, dentre eles tem-se Vieira et al. (2005), Tommaselli e Bacchi (2001), Tommaselli (1997) e Santos (2012). No trabalho de Tommaselli (1997) a abordagem que apresentou melhor eficácia na calibração para os diferentes tipos de solo foram os modelos empíricos com polinômios de terceiro grau. Os modelos empíricos derivados de regressões lineares múltiplas também são mencionados, pois apresentaram bons resultados para todos os solos estudados.

### **2.5.3.1 Modelos Empíricos**

Os modelos empíricos estabelecem uma relação matemática determinada pelo ajuste da equação de uma curva com os dados experimentais.

Topp et al. (1980) sugerem que o teor de umidade volumétrico ( $\theta$ ) é uma função polinomial de terceiro grau da constante dielétrica ( $K$ ), sendo que os parâmetros devem ser determinados a partir de uma calibração *in situ*.

$$\theta = -5.30x10^{-2} + 2.92x10^{-2}K - 5.50x10^{-4}K^2 + 4.30x10^{-6}K^3 \quad (11)$$

Segundo Jones et al. (2002) a Equação (11) fornece uma descrição adequada para a determinação do teores de umidade volumétricos inferiores à  $0.5 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , cobrindo a faixa de variação da maioria dos solos minerais com uma estimativa de erro aproximada de  $0.013 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . Contudo, esta equação apresenta limitações nas determinações de constante dielétrica para solos com teores de umidade volumétrica superiores a  $0.5 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , em solos minerais com alto teor de matéria orgânica ou de argila.

Vários autores também propuseram modelos empíricos de calibração para os equipamentos TDR. Na Tabela 4 tem-se uma síntese daqueles mais utilizados.

**Tabela 4. Equações de calibração empíricas sugeridos por diversos autores (adaptado de Klemunes, 1998)**

|   |  |
|---|--|
| 1. Toop et al. (1980)                                   | $\theta = -5.30x10^{-2} + 2.92x10^{-2}K_a - 5.50x10^{-4}K_a^2 + 4.30x10^{-6}K_a^3$<br>$K_a = 3.03 + 9.3 \theta + 146.0 \theta^2 - 76.7 \theta^3$ (4 mineral)                                     |
| 2. Ledieu et al. (1986)                                 | $\theta = 0.1138 \sqrt{K_a} - 0.1758$<br>$\theta = 0.1138 \sqrt{K_a} - 3.38 \rho_d - 0.1529$ (Mineral soil)  |
| 3. Malicki e Skierucha, (1989)                          | $\theta = -19 + \sqrt{(388 K_a - 546.9)}/194$ , $K_a \geq 1.41$ (5 mineral)  |
| 4. Nadler et al. (1991)                                 | $\theta = -7.25x10^{-2} + 3.67x10^{-2}K_a - 12.3x10^{-4}K_a^2 + 15x10^{-6}K_a^3$ (Silty loam)  |
| 5. Roth et al. (1992)                                   | $\theta = -7.28x10^{-2} + 4.48x10^{-2}K_a - 19.5x10^{-4}K_a^2 + 36.1x10^{-6}K_a^3$ (9 mineral)<br>$\theta = -2.33x10^{-2} + 2.85x10^{-2}K_a - 4.3x10^{-4}K_a^2 + 3.0x10^{-6}K_a^3$ (7 organic)   |
| 6. Dasberg e Hopmans, (1992)                            | $\theta = -7.51x10^{-2} + 4.24x10^{-2}K_a - 18.5x10^{-4}K_a^2 + 38.0x10^{-6}K_a^3$ (Sandy loam)<br>$\theta = -10.96x10^{-2} + 5.81x10^{-2}K_a - 22.7x10^{-4}K_a^2 + 32x10^{-6}K_a^3$ (Clay loam) |
| 7. Jacobsen&Schjonning, (1993a)                         | $\theta = -7.01x10^{-2} + 3.47x10^{-2}K_a - 11.6x10^{-4}K_a^2 + 18x10^{-6}K_a^3$ (10 mineral)  |
| 8. Jacobsen&Schjonning, (1993a)                         | $\theta = (-3.41x10^{-2} + 3.45x10^{-2}K_a - 11.4x10^{-4}K_a^2 + 17.1x10^{-6}K_a^3 - 3.7x10^{-2}\rho_d + 7.36x10^{-4} \%clay + 47.7x10^{-4} \%organic\ matter)$ (10 mineral)                     |
| 9. Baran (1994)   | $\theta = -0.062164 + 2.3831x10^{-2}K_a - 5.98x10^{-4}K_a^2 + 6.0x10^{-6}K_a^3$  |
| 10. Malicki et al. (1996)                               | $\theta_{TDR} = \frac{(\sqrt{K_a} - 0.819 - 0.168 \rho_b - 0.159 \rho_b^2)}{(7.17 + 1.18 \rho_b)}$   |
| 11. Teixeira et al. (1997)                              | $\theta_{TDR} = 4.64 \cdot 10^{-2} + 2.04x10^{-2} K_a - 1.68x10^{-4}K_a^2$   |
| 12. Feng (1999), Lin (1999)                             | $\sqrt{ECb} \frac{\rho_w}{\rho_d} = c + dw$  |
| 13. Siddiqui e Drnevich, (1995), Siddiqui et al. (2000) | $\sqrt{K_a} \frac{\rho_w}{\rho_d} = a + bw$  |
| 14. Skierucha e Malachi (2002)                          | $K_a = ((0.573 + 0.582 \rho_d + (7.755 + 0.792 \rho_d)\theta)^2$   |

onde:  $K_a$ : Constante dielétrica aparente,  $EC_b$ : Condutividade Elétrica aparente do Conjunto,  $\theta$ : Umidade Volumétrica,  $\rho_b$ : Massa específica ou Densidade aparente do solo,  $\rho_w$ : Massa específica ou Densidade aparente da água e  $\rho_d$ : Massa específica seca ou densidade específica seca do solo

Alguns autores que estudaram a influência da estrutura do solo na relação entre  $K_a$  e  $\theta$  foram: Wang e Schumugge, (1980), Dobson et al. (1985), Dirksen e Dasberg (1993), Skierucha e Malicki (2002), Yu e Drnevich (2004), Tommaselli e Bacchi (2001). Siddiqui e Drnevich (1995) e Siddiqui et al. (2000) analisaram o efeito da massa específica do solo sobre a constante dielétrica. Eles sugeriram uma correlação entre  $\sqrt{K_a}$  e o teor de umidade gravimétrico considerando a massa específica seca do solo (Equação 12). A norma ASTM D 6780-05 descreve os procedimentos para a aplicação desta calibração em ensaios de campo:

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

onde:  $a$  e  $b$ : Constantes de calibração específicas para o solo e  $w$ : Teor de umidade gravimétrico.

Yu e Drnevich (2004) propõem um novo método para a determinação do teor de umidade gravimétrico ( $w$ ) e a massa específica seca do solo ( $\rho_d$ ) utilizando um único ensaio TDR e uma calibração prévia do equipamento. Eles incluíram na calibração do equipamento a analogia proposta por Sihvola (1999), o qual estabeleceu que a condutividade elétrica aparente do líquido presente nos poros do solo é aquele que, em geral, domina a condutividade elétrica aparente dos solos, analogamente ao que ocorre com a constante dielétrica. Esta relação foi estudada por Feng et al. (1999) e Lin (1999) e está expressa na Equação (13). Para isto, foram realizadas medições simultâneas da constante dielétrica aparente e da condutividade elétrica aparente, na mesma amostra de solo. Em seguida, equações de calibração correlacionam  $EC_b$  e  $K_a$  com o teor de umidade gravimétrico e a densidade seca. Geralmente, a constante dielétrica aparente é utilizada na determinação do teor de umidade e, a condutividade elétrica aparente do solo é utilizada na estimativa da condutividade do fluido presente nos poros do solo.

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

onde  $EC_b$  é a condutividade elétrica aparente. Das Equações (12) e (13) é possível calcular os valores de massa específica seca ( $\rho_d$ ) e do teor de umidade ( $w$ ) do solo, em função de  $K_a$  e  $EC_b$ .

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

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

Esse método requer a utilização de uma equação de calibração para assegurar que os dados gerados pela sonda estejam dentro de limites aceitáveis. Uma vez que o valor da  $K_a$  é determinado para um solo específico, uma equação de calibração é então utilizada para a determinação do teor de umidade. No entanto, a condutividade elétrica aparente depende do fluido que se encontra nos poros do solo e quando se faz a calibração do equipamento em laboratório, o fluido encontrado em campo pode ser diferente. Isto pode dar origem a erros e imprecisões na estimativa da massa específica seca e do teor de umidade quando se emprega o método proposto por Yu e Drnevich (2004). Para solucionar essa problema, a constante dielétrica aparente pode ser relacionada com a condutividade elétrica aparente por meio das Equações (12) e (13), levando em consideração que ambos os parâmetros são dependentes do teor de umidade e da densidade seca do solo. Desta forma, tem-se a seguinte equação:

$$\sqrt{EC_b} = \frac{bc - ad}{b} \left( \frac{\rho_d}{\rho_w} \right) + \frac{d}{b} \sqrt{K_a} \quad (16)$$

ou,

$$\sqrt{EC_b} = f + g \cdot \sqrt{K_a} \quad (17)$$

onde  $f$  e  $g$  são constantes que dependem do tipo de solo e da condutividade do fluido presente nos poros do solo, sendo que  $g$  é fortemente influenciada pela esta última.

A partir da curva de calibração determinada pelas medidas de condutividade elétrica aparente e constante dielétrica do solo, se obtém as constantes de calibração  $f$  e  $g$ . Essas constantes serão utilizadas na correção da condutividade elétrica aparente de campo, melhorando a qualidade das medidas. Para isto a seguinte equação é utilizada:

$$EC_{b,adj} = \left( f + g \cdot \sqrt{K_{a,f}} \right)^2 \quad (18)$$

onde  $EC_{b,adj}$  é a condutividade elétrica aparente ajustada,  $K_{a,f}$  é a constante dielétrica em campo, sabendo que a constante dielétrica aparente não precisa de ser corrigida, no entanto é a mesma tanto em campo como em laboratório. Finalmente, após os cálculos corrigidos

ou ajustados do teor de umidade e massa específica seca do solo, as Equações (14) e (15) ficam assim:

$$\rho_d = \frac{d \sqrt{K_a} - b \sqrt{EC_{b,adj}}}{ad - cb} \rho_w \quad (19)$$

$$w = \frac{c \sqrt{K_a} - a \sqrt{EC_{b,adj}}}{b \sqrt{EC_{b,adj}} - d \sqrt{K_a}} \quad (20)$$

Mais detalhes sobre esse método podem ser encontrados em Drnevich et al. (2003).

### 2.5.3.2 Modelos Dielétricos Mistos

Segundo Vieira et al. (2005), os modelos mistos consideram que a constante dielétrica é uma propriedade particular de cada material. Portanto, estes modelos relacionam a constante dielétrica do meio poroso ou mistura (solo) e as constantes dielétricas de seus componentes, ou seja: as partículas sólidas, a água e o ar. A água intersticial do solo pode ser encontrada como água livre ou como água adsorvida. Esta última ocorre com maior frequência quando as moléculas de água se encontram em contato com a superfície de partículas de argila, dificultando a sua mobilidade.

Nissen et al. (1998) propuseram um Modelo Misto Dielétrico de duas fases, considerando que cada sonda possui sua própria constante dielétrica em função dos materiais que a constituem. Eles compararam as medidas da constante dielétrica aparente empregando uma sonda helicoidal ( $K_{a,coil}$ ) e uma sonda padrão de duas hastes ( $K_{a,ref}$ ). Para isto, realizaram calibrações utilizando ar e sete fluídos e cinco solos diferentes. A correlação entre as duas constantes dielétricas aparentes é expressa através da Equação (21).

$$K_{a,coil} = \sqrt[\beta]{p \cdot K_{a,probe}^\beta + (1 - p) \cdot K_{a,ref}^\beta} \quad (21)$$

onde  $p$  representa a relação entre o material investigado e os materiais que compõem a sonda. Em outras palavras,  $p$  representa a porcentagem que os materiais de fabricação da sonda contribuem para a determinação da constante dielétrica, ou seja,  $p$  reflete a sensibilidade da sonda. Quanto menor o valor de  $p$  maior será a sensibilidade da sonda. Por outro lado  $K_{a,probe}$  representa a constante dielétrica do conjunto de materiais que compõem o corpo da sonda helicoidal e  $K_{a,coil}$ . Representa o valor da constante dielétrica medida usando a sonda helicoidal.

Um estudo sobre as características dielétricas dos solos foi realizado por Dobson et al. (1985). Eles utilizaram misturas de quatro fases: a fase sólida, a água livre, a água adsorvida e o ar, e obtiveram como resultado a Equação (22), a partir da qual é possível calcular a constante dielétrica aparente  $K_a$  da mistura.

$$K_a = \frac{3K_s + 2(\theta - \theta_{bw}) \cdot (K_{fw} - K_s) + 2\theta_{bw} \cdot (K_{bw} - K_s) + 2(\eta - \theta) \cdot (K_{ar} - K_s)}{3 + (\theta - \theta_{bw}) \cdot \left(\frac{K_s}{K_{fw}} - 1\right) + \theta_{bw} \left(\frac{K_s}{K_{bw}} - 1\right) + (\eta - \theta) \cdot \left(\frac{K_s}{K_{ar}} - 1\right)} \quad (22)$$

onde:

$K_s, K_{fw}, K_{bw}, K_{ar}$ : constante dielétrica da parte sólida, da água livre, da água adsorvida e do ar respectivamente,

$n$ : Porosidade do solo,

$\theta, \theta_{fw}, \theta_{bw}$ : Teores de umidade volumétricos do solo em relação à água livre e à água adsorvida.

Dirksen e Dasberg (1993) avaliaram a equação de Dobson et al. (1985) ensaiando oito solos e três argilas. Eles assumiram que os valores de  $K_{bw}, K_{fw}, K_{ar}$  e  $K_s$  são 3.2, 78.3, 1.0 e 5.0, respectivamente. Eles também propuseram que a fração volumétrica da água adsorvida ( $\theta_{bw}$ ) pode ser obtida por meio da equação 23:

$$\theta_{bw} = L \cdot \delta \cdot \rho_d \cdot S \quad (23)$$

onde  $L$ : Número de camadas moleculares da água retida pelas partículas sólidas do solo,  $\delta$ : Espessura da camada monomolecular da água ( $\delta = 3 \times 10^{-10} m$ ), e  $S$ : Superfície específica ( $m^2/kg$ ).

Com base nos resultados experimentais de Hallikainen et al. (1985), Dobson et al. (1985) propuseram uma equação empírica para o cálculo de  $K_s$ , expressa pela Equação 24.

$$K_s = (1.01 + 0.44 \rho_s)^2 - 0.062 \quad (24)$$

Para densidades dos grãos ( $\rho_s$ ) entre 2.56 e 2.70  $g/cm^3$  e utilizando a equação de Dobson et al. (1985) obtém-se valores de  $K_s$  entre 4.6 e 4.9.

De acordo com Topp et al. (1980) a constante dielétrica da água a 20°C é 81.5. A constante dielétrica da água depende da temperatura e pode ser estimada a partir das correlações propostas por Wobschall (1977) ou Zegelin et al. (1992) representadas pela Equações (25) e (26), respectivamente:

$$K_w = 87.8 - 0.37 T \quad (25)$$

onde a temperatura (T) é em (°C).

$$K_w = 78.54[1 - 4.579 \times 10^{-3}(T - 25) + 1.19 \times 10^{-5}(T - 25)^2 - 2.8 \times 10^{-8}(T - 25)^3] \quad (26)$$

onde a temperatura (T) esta dada em °K.

A constante dielétrica do ar ( $K_{ar}$ ) é igual a 1. Na literatura encontra-se que a constante dielétrica da água adsorvida apresenta valores entre 3 (água em forma de gelo) e 40 (Dirksen e Dasberg, 1993; Dobson et al. 1985). Alguns modelos dielétricos mistos são apresentados a seguir na Tabela 5.

**Tabela 5. Modelos Dielétricos Mistos, adaptado de Klemunes (1998).**

| <b>Modelos de três Fases</b>   |  |
|--|--|
| 1. Roth et al. (1990)  | $\theta = [K_a^\alpha - (1-n)K_s^\alpha - n K_{ar}^\alpha] / (K_w^\alpha - K_{ar}^\alpha) \quad , (\alpha = 0.5)$ <p>(11 solos minerais e 2 solos orgânicos)</p>   |
| 2. O Exponente ajustado aos dados de Jacobsen e Schjonning (1993)            | $\theta = [K_a^\alpha - (1-n)K_s^\alpha - n K_{ar}^\alpha] / (K_w^\alpha - K_{ar}^\alpha) \quad , (\alpha = 0.6)$ <p>(10 solos minerais)</p>   |
| 3. Weitz et al. (1997)   | $\theta = \frac{K_a^\alpha - (1-n)K_s^\alpha - n K_{ar}^\alpha}{K_w^\alpha - K_{ar}^\alpha} \quad , (\alpha = \text{geral})$   |
| <b>Modelos de Quatro Fases (fase sólida, água livre, água adsorvida, ar)</b> |  |
| 1. Dirksen & Dasberg (1993)<br>Dobson et al. (1985)<br>Bohl e Roth (1994)    | $K_a = [\theta_{bw} K_{bw}^\beta + \theta_{fw} K_{fw}^\beta + (1-n)K_s^\beta + (n-\theta)K_{ar}^\beta]^{1/\beta} \quad , \theta > \theta_{bw}$   |
| 2. Dobson et al. (1985)  | $K = [(1-n)K_s^\alpha + (n-\theta)K_{ar}^\alpha + \theta K_w^\alpha]^{1/\alpha} \quad (-1 < \alpha < +1)$  |
| 3. De Loor (1964)<br>Dobson et al. (1985)                                    | $K_a = \frac{3K_s + 2(\theta - \theta_{bw})(K_{fw} - K_s) + 2\theta_{bw}(K_{bw} - K_s) + 2(n-\theta)(K_{ar} - K_s)}{3 + (\theta - \theta_{bw})\left(\frac{K_s}{K_{fw}} - 1\right) + \theta_{bw}\left(\frac{K_s}{K_{bw}} - 1\right) + (n-\theta)\left(\frac{K_s}{K_{ar}} - 1\right)}$ |
| 4. Weitz et al. (1997)   | $\theta = \frac{K_a^\alpha - \theta_{bw}^\alpha (K_{bw}^\alpha - K_{fw}^\alpha) - (1-n)K_s^\alpha - n K_{ar}^\alpha}{K_{fw}^\alpha - K_{ar}^\alpha} \quad , \theta > \theta_{bw}$  |

Onde:  $\alpha$ : Depende da geometria da fase sólida do solo e da orientação do solo em relação ao campo elétrico aplicado,  $\beta$ : Depende da composição textural do solo e  $n$ : Porosidade do solo.



# Capítulo 3

## MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 MATERIAIS

#### 3.1.1 Local de estudo

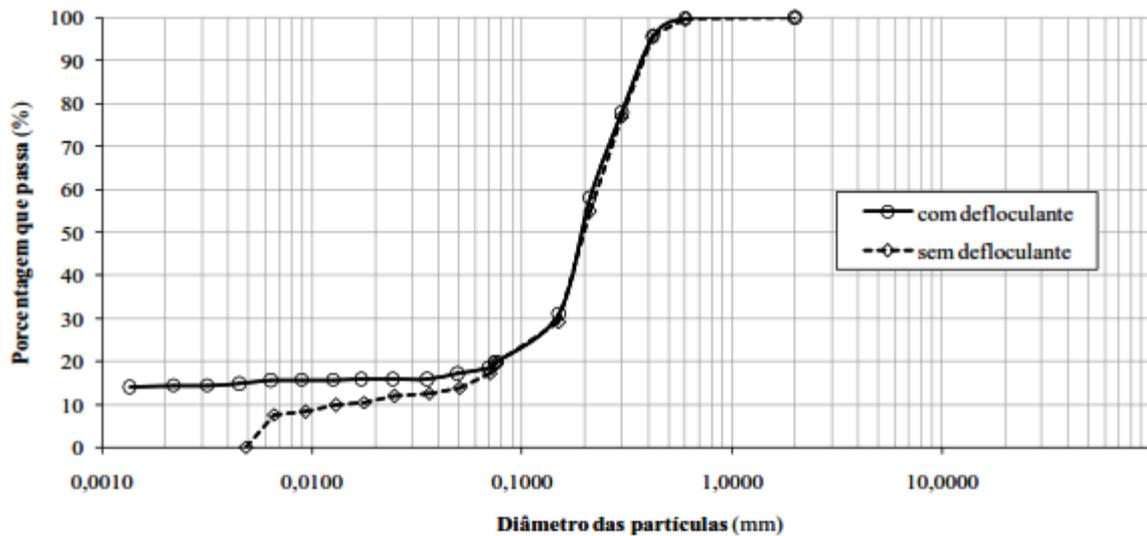
O solo estudado encontra-se no campo experimental da Unesp de Bauru (SP), no centro do Estado de São Paulo. As coordenadas geográficas são: 22°05' a 22°26' latitude sul e 49°00' a 49°16'3 longitude oeste. A cidade de Bauru está situada em faixa tropical, com verões chuvosos e invernos secos, onde a vegetação predominante é o Cerrado. Os dados climáticos mostram tendência de períodos de balanço hídrico negativo em torno dos meses de abril a agosto. Esse município está inserido no Planalto Arenítico-Basáltico do Estado de São Paulo (Planalto Ocidental), que pertence à Bacia Sedimentar do Paraná. A formação geológica regional é composta das rochas do Grupo Bauru (Cretáceo Superior), que recobre as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, aflorante em direção ao rio Tietê (Soares et al. 1979). As rochas sedimentares da Formação Marília são predominantes nesse local e passaram por processo de intemperismo em condições tropicais.

Os índices físicos de uma amostra coletada a 1 m de profundidade nesse local por Paiva et al. (2013) são apresentados na Tabela 6. Esse solo apresentou o Limite de Liquidez de 15,5% e característica não plástica.

**Tabela 6. Índices físicos da amostra coletada a 1 m de profundidade (Paiva et al. 2013).**

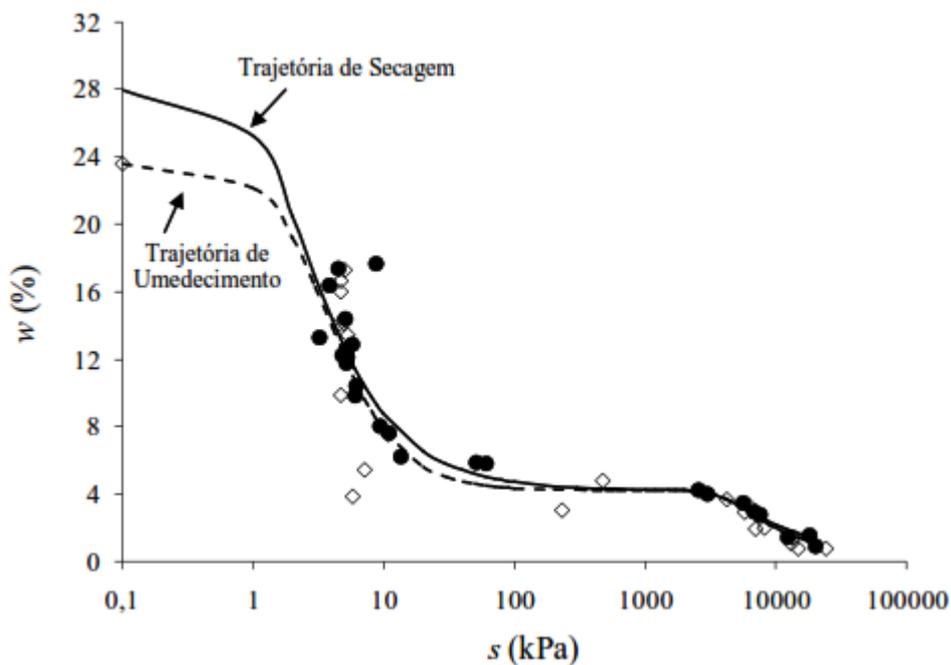
| Propriedades índice          | Símbolo  | Unidade      | Valor |
|------------------------------|----------|--------------|-------|
| Umidade gravimétrica         | $w$      | (%)          | 5,46  |
| Massa específica dos sólidos | $\rho_s$ | ( $g/cm^3$ ) | 2.649 |
| Massa específica do solo     | $\rho$   | ( $g/cm^3$ ) | 1,590 |
| Massa específica seca        | $\rho_d$ | ( $g/cm^3$ ) | 1,508 |
| Índice de vazios             | $e$      | -            | 0.757 |
| Porosidade                   | $n$      | (%)          | 43.08 |
| Grau de saturação            | $S_r$    | (%)          | 19,11 |

As curvas granulométricas com e sem defloculante, assim como as curvas de retenção para a amostra coletada a 1 m de profundidade estão apresentadas na Figura 19 (Paiva et al. 2013).



| ESCALA ABNT NBR 6502/95 |       |  |       |       |        |            |       |        |       |
|-------------------------|-------|--|-------|-------|--------|------------|-------|--------|-------|
| argila                  | silte |  | areia |       |        | pedregulho |       |        |       |
|                         |       |  | fina  | média | grossa | fino       | médio | grosso |       |
| 0,002                   |       |  | 0,060 | 0,200 | 0,600  | 2,00       | 6,00  | 20,0   | 60,00 |

a) Curvas granulométricas com e sem defloculante



b) Curvas de retenção de água ajustadas

Figura 19. Caracterização do solo (a) Granulometria e (b) curva de retenção da amostra de 1 m de profundidade (Paiva et al. 2013).

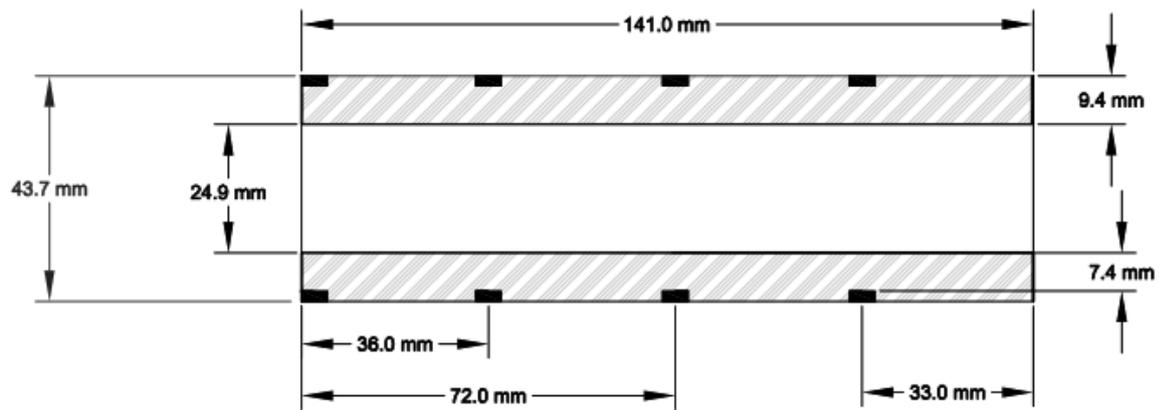
De Mio (2005) destaca que os solos que ocorrem nesse local possuem características da rocha mãe. Assim, o perfil deve refletir características de rochas sedimentares, como a alternância em camadas, e as transformações destes materiais pelos processos de pedogênese e morfogênese, como o amolecimento pela migração de água em regiões de fratura, recobrimento por solos coluviais em diversas fases, entre outros. Uma análise mais abrangente dos resultados dos diversos ensaios de campo realizados por esse autor mostra que existe uma grande variação vertical e horizontal nas características dos materiais identificados nesse local. De Mio (2005) destaca que, nas porções abaixo de 13 m de profundidade, são identificadas, de forma razoavelmente clara, a presença de camadas relacionadas à época de formação dos sedimentos. A porção superior do perfil não evidencia a presença destas “camadas”, devendo estar ligada a uma evolução pedogenética intensa ou a processos de coluvionamento. As grandes heterogeneidades devem estar ligadas aos processos pedogenéticos e morfogenéticos, com diferentes intensidades de cimentação, ou várias fases de coluvionamento.

### **3.1.2 Sonda helicoidal TDR**

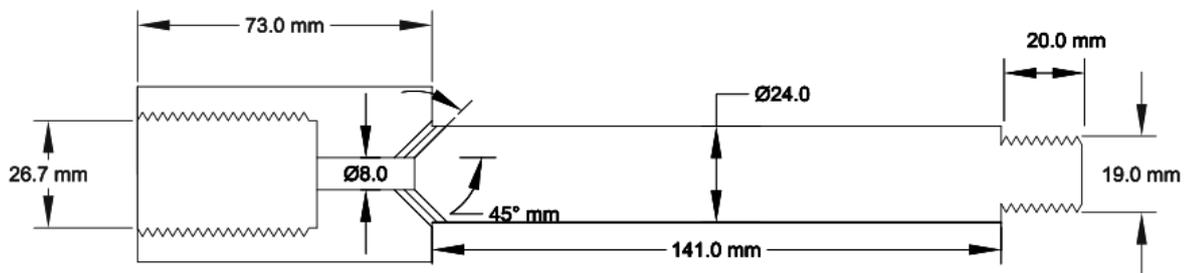
A sonda TDR helicoidal foi projetada com base no modelo proposto por Esquivel e Giacheti (2007) e utilizado por Assis (2008), Lima (2009) e Calderón (2010) mostrando-se como uma ferramenta adequada para a estimativa do teor de umidade em campo. Foram realizadas algumas modificações em suas características geométricas com o objetivo de melhorar seu desempenho no momento da cravação no terreno, a fim de empregá-la pela primeira vez em conjunto com ensaios de penetração de cone.

A sonda é composta de quatro partes distintas, um núcleo interno de aço, uma ponta de aço com ângulo de 60°, um núcleo cilíndrico oco elaborado de Polioximetileno (Poliacetil) e um cabo coaxial de 50 Ω. O projeto detalhado da sonda helicoidal é apresentado na Figura 20.

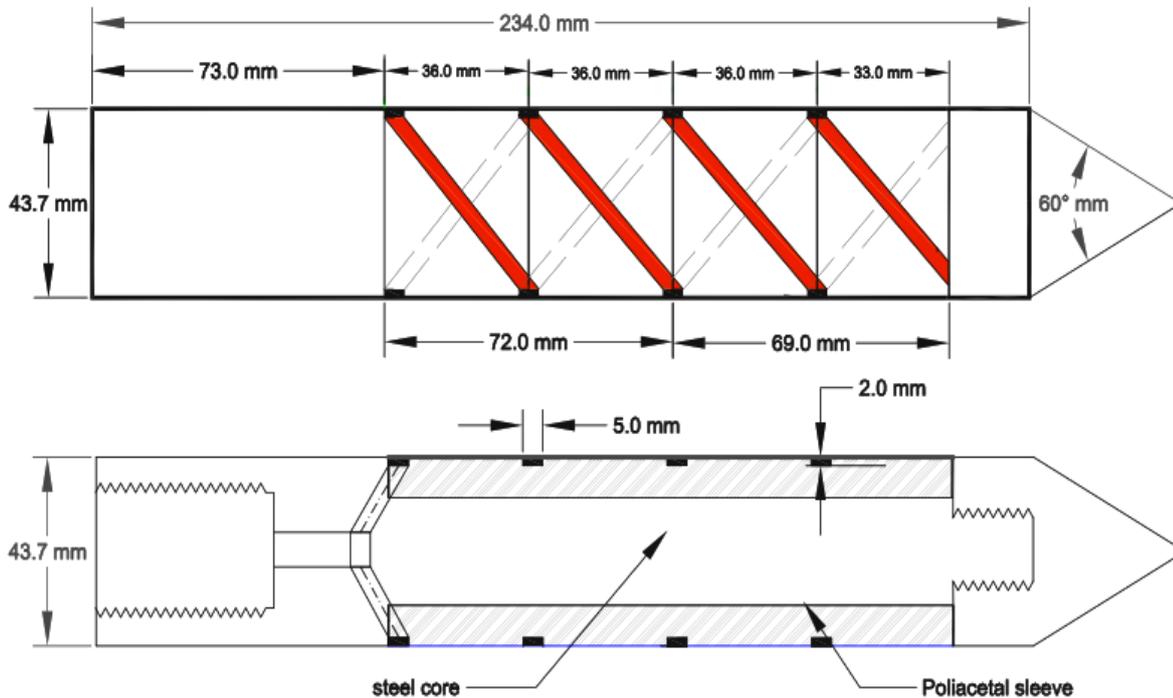
O núcleo cilíndrico oco possui dois canais helicoidais de secção transversal retangular, onde estão os eletrodos condutores de cobre (Figura 21). Esses eletrodos foram conectados por meio de soldadura aos fios condutor e terra do cabo coaxial de 50 Ω. O núcleo cilíndrico de poliacetil é inserido no núcleo interno de aço e finalmente o conjunto é ajustado utilizando o núcleo interno de aço. A sonda helicoidal, como mostrado na Figura 22, foi montada com o apoio do Departamento de Engenharia Mecânica e Geotecnia da EESC-USP.



a) Núcleo cilíndrico oco de poliacetal.



b) Núcleo interno de aço.



c) Sonda helicoidal montada.

Figura 20. Esquema detalhado da sonda TDR helicoidal (baseado no projeto Esquivel e Giacheti, 2007)

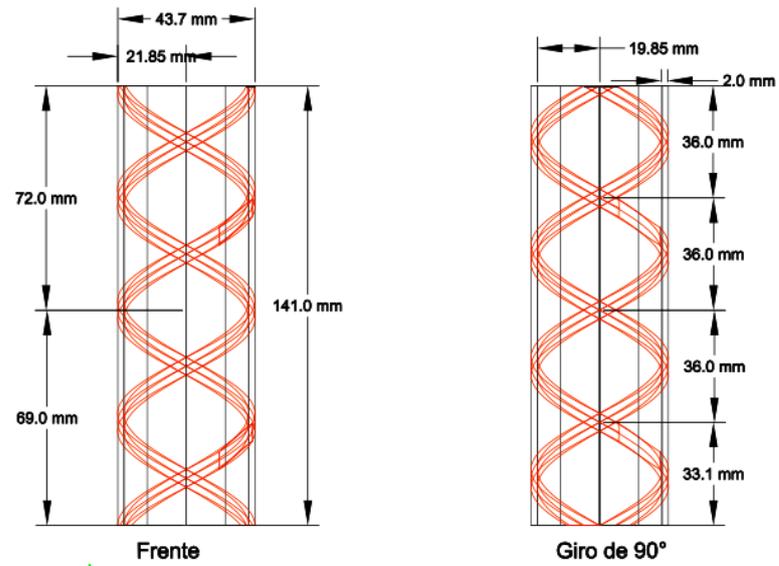


Figura 21. Detalhes do projeto do cilindro de Poliacetal e eletrodos condutores de cobre.



a)



b)



c)



d)



e)

Figura 22. Construção da sonda helicoidal. a) Núcleo interno de aço b) Núcleo cilíndrico de Poliacetal onde se encontram inseridos os eletrodos condutores de cobre. c) Núcleo cilíndrico de Poliacetal sendo inserido no núcleo interno de aço. d) Solda dos fios do cabo coaxial com os eletrodos de cobre. e) Sonda helicoidal finalizada.

### 3.1.1 Testador de cabos Tektronix 1502-C

Na realização dos ensaios TDR foi utilizado o equipamento testador de cabos Tektronix, modelo 1502C. Este equipamento gera uma onda eletromagnética e detecta as mudanças de impedância do meio, registrando graficamente a forma da onda. Para isto o Tektronix conta com uma tela ou display que permite visualizar a forma de onda, além de um painel frontal de comando com várias opções para ajustar e melhor visualizar a imagem. Entre essas opções estão o ajuste da escala vertical e horizontal, da distância por cada divisão, das unidades nas quais se deseja fazer a medição se em metros ou em pés, um filtro de ruído para recuperar a onda e de um ajuste para a velocidade de propagação.

A velocidade de propagação ( $V_p$ ), é a relação entre a velocidade de propagação do sinal pelo cabo e a velocidade de propagação da luz no vácuo ( $3 \times 10^8$  m/s). A  $V_p$  depende da constante dielétrica do material que fica entre o condutor e a malha de blindagem do cabo coaxial. Por esta razão a  $V_p$  não interfere nos valores de  $K_a$  e  $E_c$  para a determinação do teor de umidade, no entanto interfere na visualização da onda (Manual PCTDR). Para o cálculo do teor de umidade é recomendado que a  $V_p$  seja igual a 0.99.

Outra ferramenta importante na utilização do Tektronix 1502C é o filtro de ruído ou “*noise filter*”, já que permite reduzir ruídos que são de natureza aleatória e gerados a partir da fonte de energia. Esta opção possibilita definir o número de medições que serão feitas para definir a média das formas de onda, ou seja, se a opção é 1, o programa apresentará a primeira forma de onda que gerou, mas se a opção for 128 o programa realizará 128 leituras da forma de onda e apresentará a média delas. Esta ferramenta é muito útil no momento de realizar leituras em campo, o software utilizado para realizar a aquisição de dados, no caso o programa Win-TDR, também oferece a possibilidade de controlar o filtro de ruído.

Uma informação importante sobre o Tektronix 1502C é que o número de pontos que são mostrados, e que estão disponíveis em forma de dados para reproduzir a forma de onda, é de 251. O número de pontos é definido dependendo do equipamento testador de cabos utilizado.

### 3.1.2 Programa WinTDR

O programa WinTDR permite a comunicação entre o computador e o equipamento Tektronix 1502C, facilitando a aquisição e interpretação de dados. Este programa de livre acesso foi desenvolvido em 1993 pelo grupo de Física do Solo da Utah State University, sendo compatível com as versões de Windows 9x, Me, NT, 2000 e XP.

Ele permite realizar a determinação da constante dielétrica e da condutividade elétrica aparente, utilizando algoritmos próprios para a análise da onda. Igualmente utiliza a equação polinomial de terceiro grau de Topp et al. (1980) para relacionar a constante dielétrica com o teor de umidade. Permite também que o usuário modifique os valores das constantes dessa equação, a fim de utilizar a equação de calibração correspondente a cada tipo de solo.

Antes de realizar a leitura de  $K_a$  durante o processo de calibração, todos os parâmetros da interface devem ser ajustados:

- O comprimento dos eletrodos condutores (*length - cm*): dependem do tipo de sonda utilizada. Existem sondas com eletrodos de 1cm até 35 cm.
- A impedância (*Imped. - Ohm*): Depende da impedância do cabo coaxial.
- Distância por divisão (*Dist/Div - m*): Permite ajustar o valor de cada uma das divisões da grade na tela. Deve-se procurar que a maior parte da tela mostre a parte da onda que contem as duas inflexões. Isto melhora o cálculo da longitude aparente  $L_a$ .
- Posição do cursor no dispositivo TDR (*Cursor - m*): Ajusta a parte inicial da onda que será mostrado na tela, ou seja, o comprimento a partir do início do cabo coaxial até onde começa a ser visualizada a primeira inflexão.
- A posição do pico (*Peak - m*): Se refere ao comprimento do cabo coaxial utilizado, isto é, a distância desde o início do cabo coaxial até o início dos eletrodos condutores.
- A escala (*scaling - %*): Permite ampliar verticalmente a forma de onda.

Da mesma forma deve-se fixar as configurações de análise da onda. O método de análise (*Analysis Method*) pode ser escolhido entre tangente horizontal (*Flat Tangent*) e tangente inclinada (*Sloped Tangent*). Para o desenvolvimento desta pesquisa foi utilizado o método da tangente horizontal, já que se observou que ele oferece uma menor variação na localização da segunda inflexão. Nas opções básicas (*Basic Options*) pode ser mudada a tolerância na localização do pico (*Peak Tolerance*). É recomendável que a tolerância seja zero ou próxima de zero, uma vez que a primeira inflexão ou pico tem uma localização constante sempre e quando seja trabalhado com o mesmo comprimento do cabo e a mesma sonda. Neste sentido, os dados da interface que devem permanecer constantes para análises da onda são o comprimento dos eletrodos condutores (*length - cm*), a posição do cursor no dispositivo TDR (*Cursor - m*) e a posição do pico (*Peak -m*). Esses dados são determinados no processo de calibração.

Durante a realização da calibração todas estas configurações podem ser gravadas, para serem utilizadas no momento de realizar novas leituras e reduzir o tempo e garantir uma melhor qualidade nas análises (*Open Setup*).

O WinTDR também oferece algumas configurações padrões requeridas pelo Tektronix (*Tektronix Settings*). Entre elas estão, a seleção automática ou manual da Porta de comunicação serial (COM), a velocidade de propagação (preferivelmente 0.99) e o filtro de ruído (*Noise Filter*) entre 1 e 128 formas de onda.

### 3.1.3 Sistema multifunção para ensaios de campo

O sistema multifunção permite a cravação de ferramentas de investigação do subsolo à velocidade constante, especialmente ensaios CPT. Também possibilita a cravação dinâmica com martelo com dimensões e altura de queda padrão para a realização de ensaios SPT. Igualmente pode ser utilizado para a abertura de furos e coleta de amostras com o auxílio de conjuntos de trados helicoidais. O uso deste equipamento no desenvolvimento da presente pesquisa foi possível graças ao auxílio do grupo de pesquisa em geotecnia da Unesp de Bauru (SP).



Figura 23. Sistema multifunção para ensaios de campo, modelo Pagani TG 63-150 DP-CPT

## 3.2 MÉTODOS

O processo de calibração da sonda TDR helicoidal foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos-USP. Porém, o local de investigação e execução dos ensaios de campo da pesquisa foi o campo experimental da Unesp de Bauru (SP).

Durante o desenvolvimento desta pesquisa e buscando melhorar a qualidade das leituras com a sonda helicoidal, foram realizadas cinco calibrações em laboratório, seguindo sempre o mesmo procedimento padrão. As campanhas de campo e ensaios para a determinação da umidade pelo método TDR foram sempre realizadas em conjunto com ensaios CPT e coleta de amostras para a determinação de umidade pelo método da estufa elétrica. A descrição de cada um desses procedimentos será tratada a seguir.

### 3.2.1 Processo de calibração

A calibração foi realizada especificamente para o solo típico dos primeiros 13 m de profundidade do campo experimental da Unesp de Bauru. Estudos realizados por Tommaselli (1997) e Santos et al. (2010) demonstraram que para garantir determinações de umidade do solo pelo método TDR com uma boa precisão é necessário realizar uma calibração específica para cada tipo de solo. Assim, coletou-se uma amostra deformada de solo do primeiro metro de profundidade desse campo experimental, que foi transportada até o Laboratório de Mecânica dos Solos da EESC-USP para a realização da calibração da sonda TDR.

O processo de calibração consiste na leitura da constante dielétrica aparente ( $K_a$ ) e da condutividade elétrica aparente do solo estudado, utilizando amostras do solo em diferentes teores de umidade (entre 2 e 20%), compactadas em um cilindro com massa e volume conhecidos. A compactação das amostras foi realizada tentando atingir uma massa específica seca de  $1.45 \text{ g/cm}^3$  ( $\rho_d = 1.45 \text{ g/cm}^3$ ). Este é o valor de massa específica aparente seca representativo do terreno até os 8 m de profundidade. O procedimento de calibração será descrito a seguir:

1. Deixou-se secar a amostra de solo até atingir a umidade higroscópica. Em seguida, secou-se em estufa a temperatura de  $50^\circ\text{C}$  por 48 horas. A amostra foi destorroada e passada pela peneira No. 4, separada em sacos plásticos com 20 kg para a realização da calibração.
2. Adicionou-se quantidade de água suficiente para alcançar a umidade de 2%, peneirou-se duas vezes e deixou-se homogeneizar em repouso por 12 horas. Nos ensaios de calibração se utilizou água de torneira.
3. A amostra foi compactada num cilindro de PVC com volume e peso previamente conhecidos ( $\phi = 20.3 \text{ cm}$ ,  $h = 24 \text{ cm}$ ). O cilindro conta com uma marca interna para que as camadas tenham 6 cm de espessura. Para isto, calculou-se a massa total de material necessário para preencher cada camada do cilindro, atingindo uma massa específica seca de  $1.45 \text{ g/cm}^3$  ( $\rho_d = 1.45 \text{ g/cm}^3$ ) com um determinado teor de umidade.



a)



b)



c)



d)



e)

**Figura 24. Procedimento do ensaio de calibração. a.) separação do solo para cada camada, b.) compactação do solo, c.) pesagem do cilindro com o solo compactado, d.) realização do pré-furo com trado helicoidal, e.) conjunto de elementos utilizados na calibração.**

4. Cada camada foi compactada com uma base metálica que abrange quase toda a área do cilindro deixando uma folga de apenas 4 mm (Figura 24.b). Utilizou-se

um soquete de 4.95 kg de massa, aplicando-se um número de golpes necessários para se atingir a altura da camada previamente definida.

5. Pesou-se o cilindro com o material compactado em uma balança de capacidade de 30kg (Figura 24.c).
6. Com a ajuda de um trado helicoidal de diâmetro pouco inferior que o da sonda, realizou-se um pré-furo no centro do corpo de prova (Figura 24.d). Logo a seguir inseriu-se a sonda nesse furo procurando manter total contato solo-sonda.
7. Com o auxílio do testador de cabos Tektronix 1502C e do software WinTDR 6.1, as leituras da constante dielétrica e da condutividade elétrica aparente foram feitas (Figura 24.e). Esse procedimento é descrito nos subitens abaixo:
  - a. Conectar o testador de cabos ao computador por meio de um cabo RS232 USB/Serial. No computador conferir o número da porta *COM*, «*COM port*» (também denominada portal serial), em que foi conectado o cabo. Em seguida abrir o programa WinTDR, ir a «*communications*», «*Tektronix Setting*» e conferir que na caixa chamada de «*Port*» apareça o mesmo número de porta *COM* detectado pelo computador.
  - b. Para ativar o programa se deve ir a «*Communication*», «*Activate Tektronix 150XB/C*», aguardar alguns segundos para que a comunicação ocorra.
  - c. Para começar as leituras, ir a «*File*», «*New*», «*Probe*». Assim que a janela de análise se abre o programa está pronto para detectar a forma de onda (Figura 25).

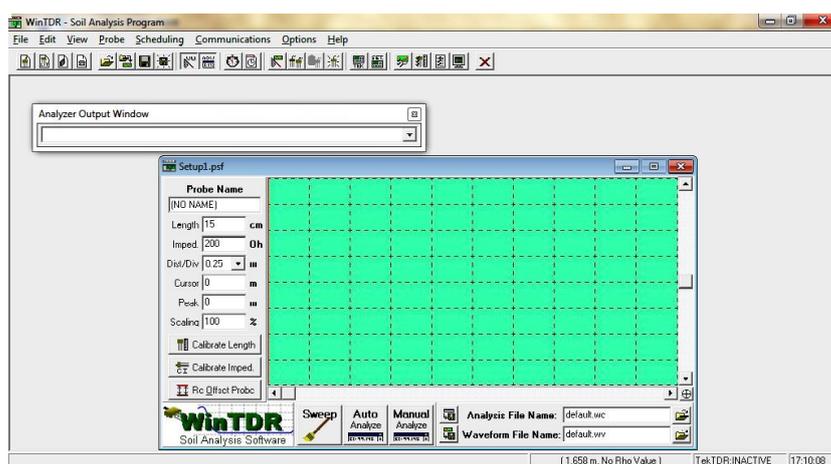


Figura 25. Janela inicial do programa WinTDR 6.1.

- d. Ao ativar o comando «*Sweep*» a onda toda aparecerá na tela (Figura 26). Deve-se ajustar manualmente o cursor (*Cursor*) para que fique próximo à primeira inflexão. Nesse instante deve-se melhorar a distância por divisão

(*Dist/Div*) e a escala (*Scaling*). Isso deve ser feito a fim de localizar na tela as duas reflexões da onda (Figura 27).

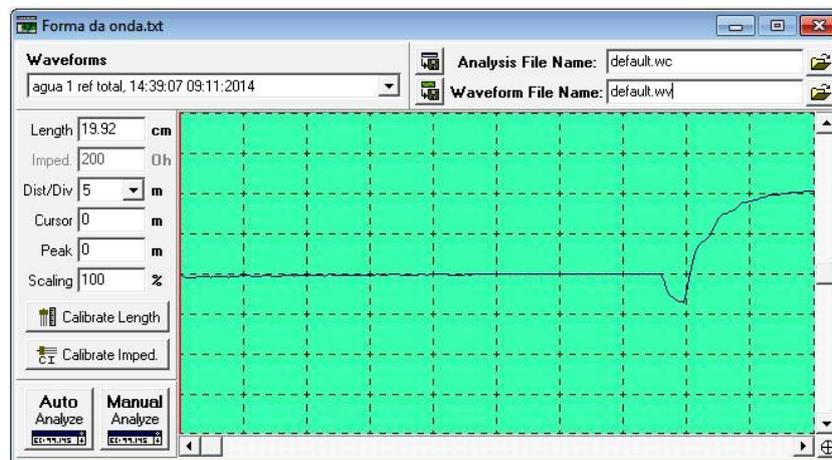


Figura 26. Forma total de onda.

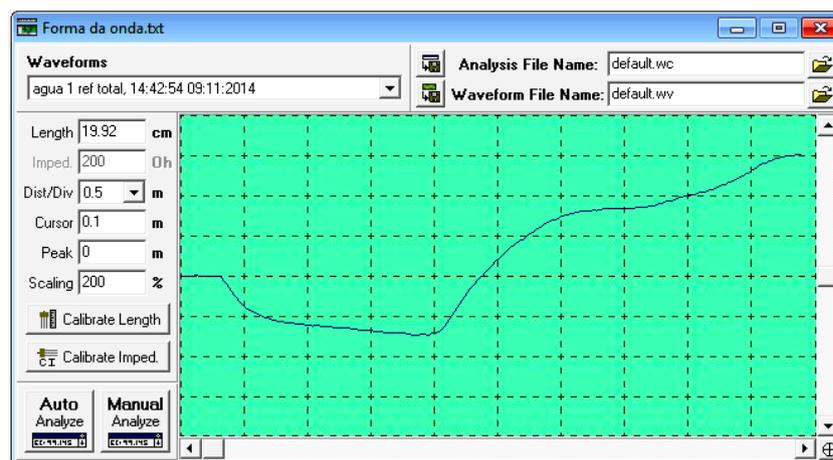


Figura 27. Aproximação para visualização das duas inflexões da onda.

- e. Finalmente se deve posicionar o cursor na primeira inflexão e ativar o comando «*Auto Analyze*». Este comando determinará automaticamente a segunda inflexão e calculará a constante dielétrica aparente ( $K_a$ ) e a condutividade elétrica aparente ( $EC_b$ ) (Figura 28). Os resultados desse ensaio ou seja, o teor de umidade,  $K_a$  e  $EC_b$  serão mostrados na janela denominada «*Analyzer Output Window*».

Os resultados interpretados para essa leitura serão gravados automaticamente no arquivo *Default*. No entanto esta opção pode ser modificada pelo usuário e esses resultados poderão ser gravados em um arquivo definido pelo usuário. É importante gravar as configurações da análise da onda para facilitar a próxima leitura. Desta

forma, sempre que se abrir essa configuração (*Open Setup*), os valores de comprimento dos eletrodos condutores (*length - cm*), a posição do cursor no dispositivo TDR (*Cursor - m*) e a posição do pico (*Peak - m*) serão os mesmos. Isto facilita a realização das leituras, reduzindo o tempo e melhorando a acurácia da medida.

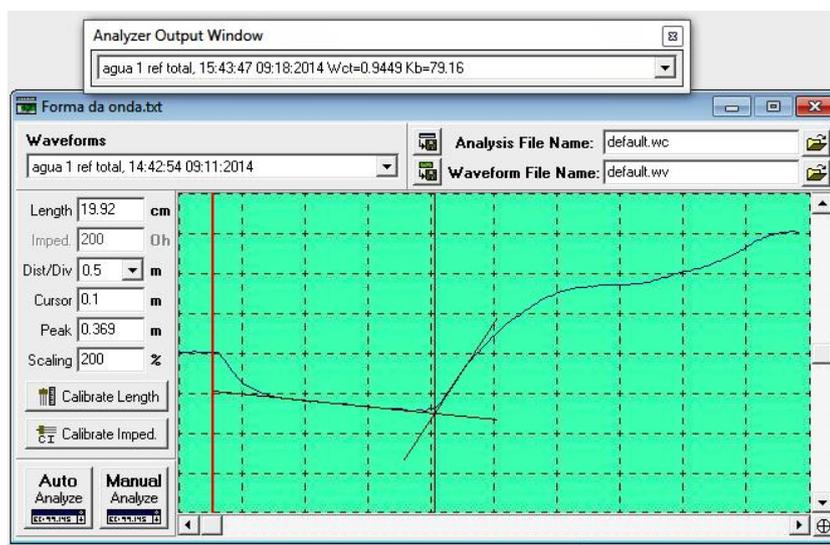


Figura 28. Análise final da onda.

Para iniciar uma nova análise se deve ir a «File», «Open Setup» e escolher a configuração gravada. Continuar com o comando «sweep» e verificar se na forma da onda aparecem claramente e com alguma folga as duas inflexões. Se elas aparecem, fazer o «Auto Analyze»; se elas não aparecerem claramente na tela, realizar o procedimento a partir do item (d).

O programa também conta com o comando «Manual Analyze» para que o próprio usuário, se assim desejar, localize com o cursor os picos da onda para que o cálculo seja feito a partir dessa indicação.

As configurações para a análise da onda onde se encontram as constantes da equação de calibração e o método de análise das inflexões podem ser alteradas entrando em «Options», «Wave Analysis», «Analyzer Settings» (Figura 29).

8. Após a obtenção dos dados, a ponteira foi retirada do corpo de prova e foram tomadas quatro cápsulas com amostras de solo uniformemente distribuídas, utilizadas para a determinação do teor de umidade gravimétrico.
9. O material restante foi retirado do cilindro de PVC e colocado numa bandeja para posteriormente ser umedecido até atingir o próximo valor de umidade desejado.

10. Este processo foi repetido para cada um dos valores de teores de umidade requeridos para obter toda a curva de calibração.

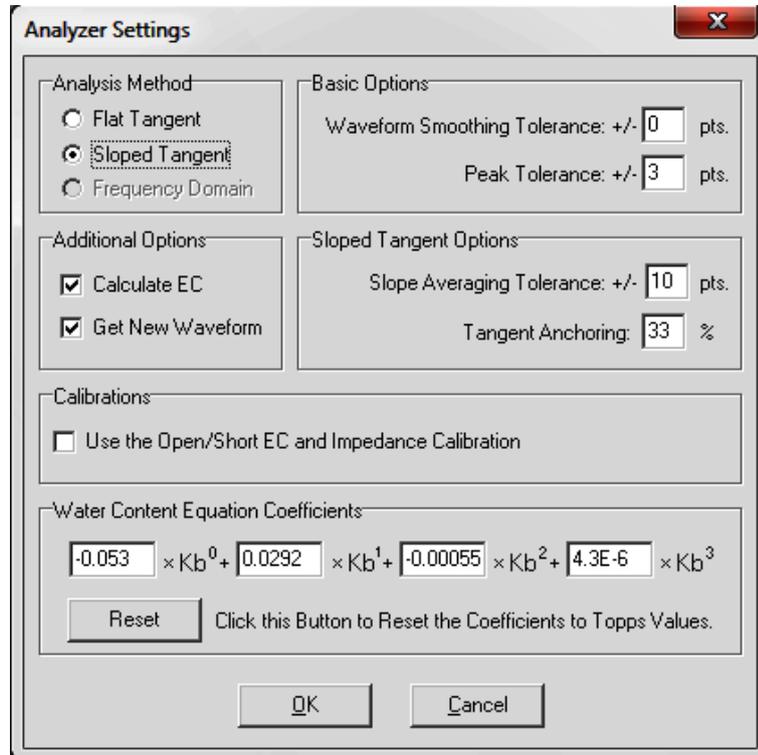


Figura 29. Janela de ajuste de configurações.

### 3.2.2 Ensaios de campo

Durante o desenvolvimento da pesquisa foram realizadas cinco campanhas de ensaios de campo. Em cada uma dessas campanhas foram empregados procedimentos distintos. Nas campanhas No. 1, 4 e 5 foram realizados um ensaio CPT, dois ensaios TDR e uma sondagem empregando um trado helicoidal mecanizado para coleta de amostras e posterior determinação do teor de umidade de referência. Nas campanhas No. 2 e 3 foram realizados apenas ensaios TDR e coleta de amostras para determinação dos valores de umidade de referência (Tabela 7).

Tabela 7. Constituição dos ensaios realizados em cada campanha de campo.

| Campanha No. | Data da campanha | CPT (quantidade) | TDR (quantidade) | Amostragem para determinação de valores de umidade de referência |
|--------------|------------------|------------------|------------------|--|
| 1            | 30 Set. 2014     | 1                | 2                | Trado helicoidal mecanizado                                      |
| 2            | 14 Nov. 2014     | -                | 1                | Trado helicoidal mecanizado                                      |
| 3            | 05 Dez. 2014     | -                | 4                | Trado manual   |
| 4            | 26 Mar. 2015     | 1                | 2                | Trado helicoidal mecanizado                                      |
| 5            | 07 Mai. 2015     | 1                | 2                | Trado helicoidal mecanizado                                      |

Cada uma dessas campanhas tinha um objetivo diferente. As campanhas em que foram realizados ensaios TDR e amostragem para determinação do teor de umidade de

referência, tinham o objetivo de avaliar as mudanças realizadas na geometria da sonda, a fim de uma melhor qualidade na leitura das ondas. Por outro lado, as campanhas que incluíram ensaios TDR, determinação do teor de umidade de referência e ensaio CPT tinham como objetivo avaliar a influência da sucção na resistência à penetração do cone em um solo não saturado. A Figura 30 apresenta a localização dos ensaios de cada campanha no campo experimental.

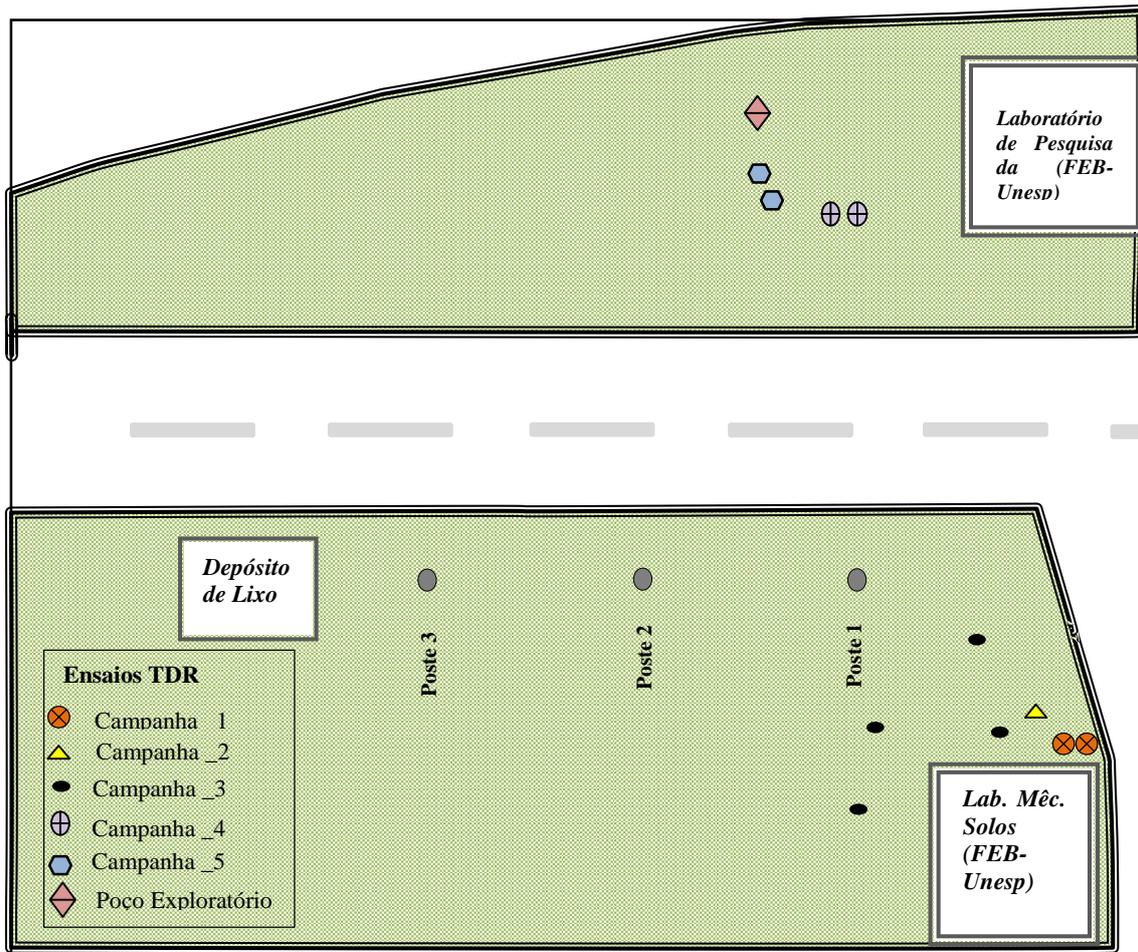


Figura 30. Localização dos ensaios para cada campanha.

Na realização das campanhas de campo No. 1, 4 e 5 foram seguidas as etapas descritas a seguir:

1. Execução de um ensaio CPT com aproximadamente 8 m de profundidade utilizando o sistema multifunção já descrito (Figura 31.a). É importante ressaltar que antes de iniciar esse ensaio foi necessário posicionar o equipamento no lugar indicado e realizar sua respectiva ancoragem utilizando trados helicoidais especiais para esta função. Após a realização do ensaio CPT o hasteamento foi

retirado, deixando no terreno um furo de diâmetro menor do que o da sonda helicoidal.

2. Em seguida, a sonda TDR helicoidal foi acoplada a uma das hastes e com o mesmo sistema multifunção foi inserida no furo anterior até a profundidade desejada (Figura 31.c). O conjunto de hastes não deve estar em contato com a máquina, evitando qualquer contato direto com suas partes metálicas, uma vez que esse contato poderia gerar algum tipo de interferência nas leituras realizadas com o TDR.

Quando a sonda TDR atinge a profundidade indicada são realizadas cinco leituras consecutivas da constante dielétrica e da condutividade elétrica aparente para a determinação do teor de umidade do solo (Figura 31.d). Em seguida, uma nova haste é acoplada ao conjunto e este é inserido até a profundidade seguinte. O processo deve ser repetido até atingir a profundidade final de ensaio.

3. Para a execução de um novo ensaio TDR, o equipamento de cravação foi deslocado aproximadamente 1,0 m para um lado do ensaio anterior e foi novamente ancorado. Neste segundo ensaio TDR não existia o pré-furo do ensaio CPT, ou seja, a sonda foi cravada diretamente no terreno.

A sonda e as hastes foram acopladas ao sistema de cravação, procedendo a inserção do conjunto até atingir a primeira profundidade para a realização das leituras de umidade. Esse procedimento foi repetido até atingir os 8 m de profundidade.

4. Para finalizar cada campanha uma última sondagem coletando amostras de solo para a determinação da umidade de referência foi realizada. Esta sondagem foi realizada mecanicamente também utilizando o sistema multifunção com trados helicoidais, como se observa na Figura 31.b. Ela foi executada entre os ensaios anteriores (CPT/TDR e TDR) a fim de que as amostras coletadas fossem as mais representativas para ambos ensaios.

Na campanha No. 2 o ensaio TDR foi feito utilizando o sistema multifunção e uma sondagem mecanizada para a amostragem e determinar o teor de umidade de referência. Os procedimentos seguidos foram os mesmos já descritos nas etapas 3 e 4 acima.

Na campanha No. 3 foram executados ensaios TDR e posterior coleta de amostra para determinação da umidade de referência em quatro perfurações de aproximadamente 0,4 m de profundidade realizadas com o auxílio de um trado manual.



a) Ensaio CPT



b) Coleta de amostras para umidade



c) Ensaio TDR



d) Equipamento TDR

**Figura 31. Ilustração das diversas etapas de uma das campanhas de campo realizadas.**



# Capítulo 4

---

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CALIBRAÇÃO

Com o intuito de obter a melhor medida de umidade do solo utilizando o TDR foram empregados diferentes modelos, entre eles, o modelo de calibração utilizado por Yu e Drnevich (2004), algumas correlações alternativas ( $\sqrt{K_a}$  versus  $w$ ,  $K_a$  versus  $\theta$ ,  $K_a$  versus  $w$ ) e o modelo misto dielétrico utilizando-se a equação proposta por Nissen et al. (1998). Este último foi aplicado para avaliar o desempenho da ponteira TDR quando comparada com uma sonda de referência de quatro hastes.

#### 4.1.1 Avaliação do desempenho da sonda helicoidal

Uma primeira calibração foi realizada com a finalidade de testar o funcionamento da sonda helicoidal. Para isto, as leituras da constante dielétrica aparente em fluidos diferentes, utilizando a sonda desenvolvida foram comparadas com as medidas empregando uma sonda de referência de quatro hastes. Tomaram-se seis leituras contínuas da  $K_a$  em cada meio: ar, água destilada, etanol, mistura de 75% etanol - 25% água destilada, 50% etanol - 50% água destilada, 25% etanol - 75 % água destilada (Figura 32).

A Figura 33 mostra a relação entre a constante dielétrica de um meio ao se utilizar a sonda helicoidal e a sonda de referência. Para isto o Modelo Misto Dielétrico de duas fases proposto por Nissen et al. (1998) foi usado (Equação (21)), onde,  $K_{a,coil}$  representa a leitura da constante dielétrica aparente usando da sonda helicoidal e  $K_{a,ref}$  a leitura da constante dielétrica aparente usando da sonda de referência. Nesse gráfico se observa um bom ajuste da curva de calibração com um coeficiente de correlação  $R^2 = 0.9978$ , o que reflete o bom desempenho da sonda helicoidal. Por outro lado a sensibilidade da sonda é observada no baixo valor da constante  $p$  ( $p = 0.45$ ) na equação proposta por Nissen et al. (1998). Isto

significa que no valor da constante dielétrica medido usando a sonda helicoidal, 45% corresponde à materiais de construção da sonda e 55% corresponde ao meio circundante.

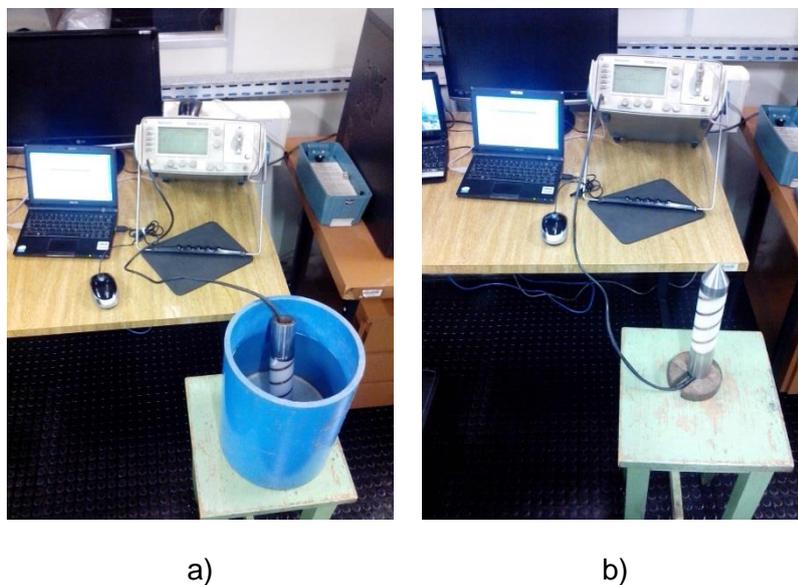


Figura 32. Teste de avaliação do desempenho da sonda helicoidal. a) em meio aquoso, b) ao ar.

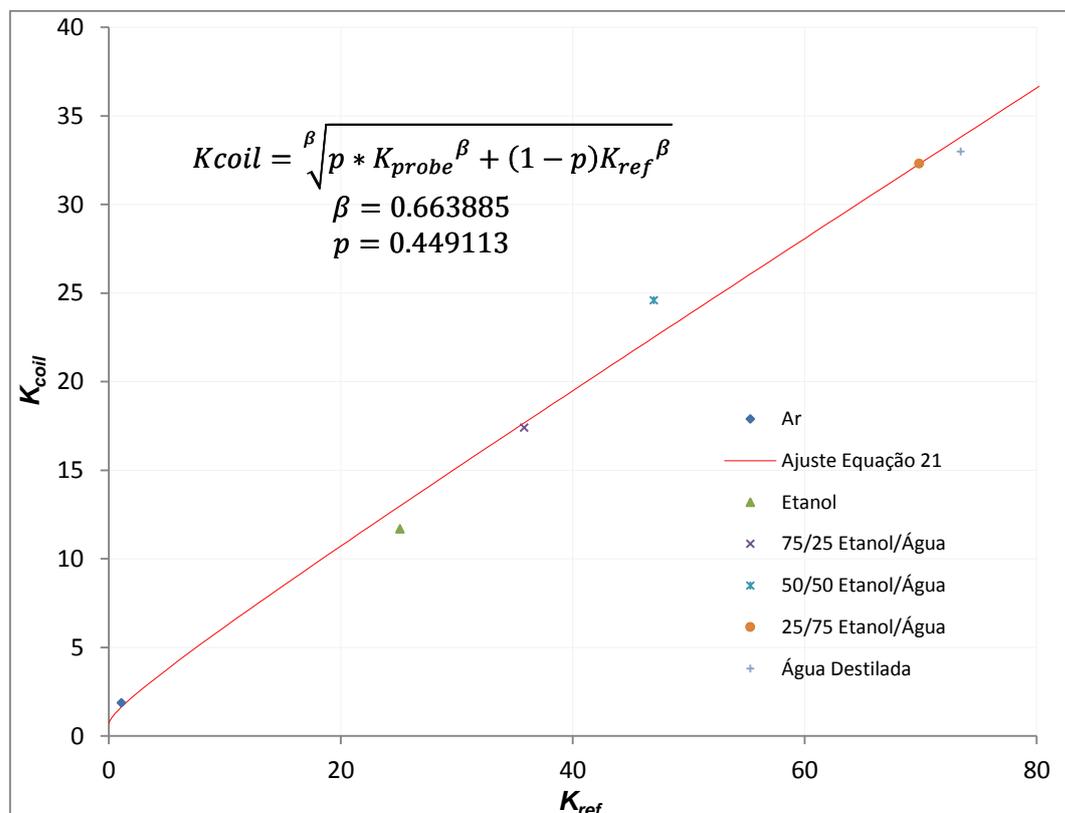


Figura 33. Modelo Misto Dielétrico de duas fases, ajuste pela equação (21).

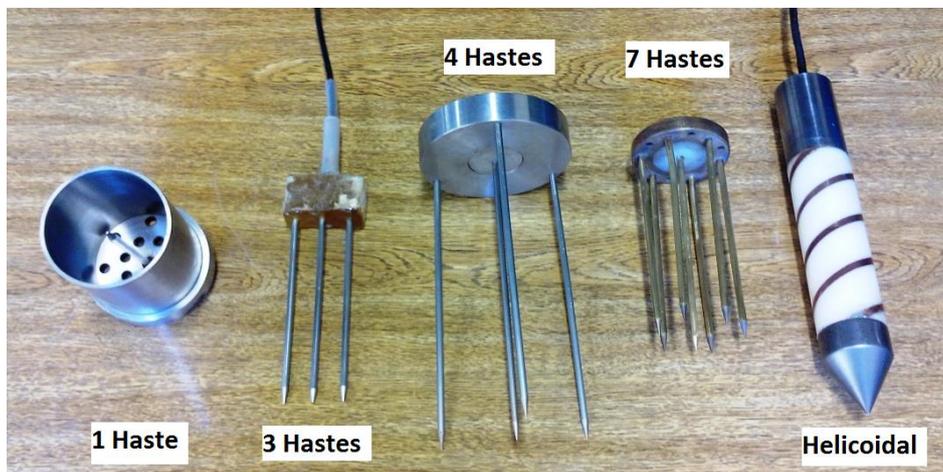
Na literatura se pode encontrar um valor padrão de constante dielétrica para alguns meios ou fluidos solventes. No entanto, quando se utiliza uma sonda helicoidal, composta

por vários materiais, tais como poliacetal, cobre e aço, os valores da  $K_a$  tendem a ser diferentes daqueles encontrados na literatura. Isto se deve à geometria da sonda e o valor da constante dielétrica de cada um dos materiais que a constituem. Por isto, é fundamental que a calibração do equipamento seja realizada de forma cuidadosa e no mesmo meio que o ensaio será realizado.

Para observar melhor a variação nos valores de  $K_a$  num mesmo meio quando são utilizadas sondas diferentes, realizando leituras da constante dielétrica ao ar, etanol e água deionizada, com quatro tipos distintos de sonda. Na Tabela 8 tem-se os valores da constante dielétrica de cada meio, utilizando as diferentes sondas e o valor padrão que se pode encontrar na literatura. A Figura 34 mostra as sondas utilizadas para este ensaio.

**Tabela 8. Comparação das medidas da constante dielétrica empregando sondas diferentes e os valores considerados como padrões.**

| Sonda                | 1 Haste<br>$K_a$ | 3 Hastes<br>$K_a$ | 4 Hastes<br>$K_a$ | 7 Hastes<br>$K_a$ | Helicoidal<br>$K_a$ | Padrão<br>$K_a$ |
|----------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------|-----------------|
| <b>A. Deionizada</b> | 86.47            | 76.50             | 75.14             | 75.61             | 34.60               | 80              |
| <b>Etanol</b>        | 27.13            | 24.30             | 25.10             | 22.18             | 11.70               | 25              |
| <b>Ar</b>            | 1.17             | 1.26              | 1.28              | 1.16              | 1.91                | 1               |



**Figura 34. Tipos diferentes de sondas TDR empregadas.**

Para efeito ilustrativo foram registradas no mesmo as formas de onda em água usando a sonda helicoidal e a sonda de referência. A Figura 35 mostra duas formas de onda na água, uma com a sonda de quatro hastes e a outra com a sonda helicoidal.

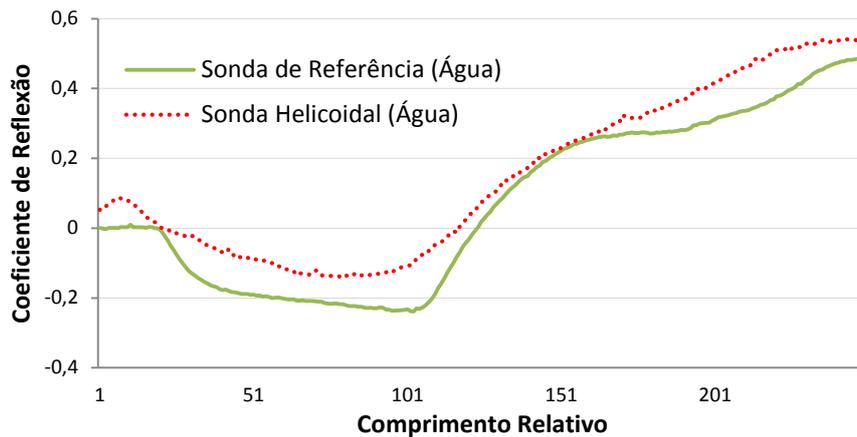


Figura 35. Comparação entre a forma de onda na água utilizando uma sonda de quatro hastes e uma sonda helicoidal.

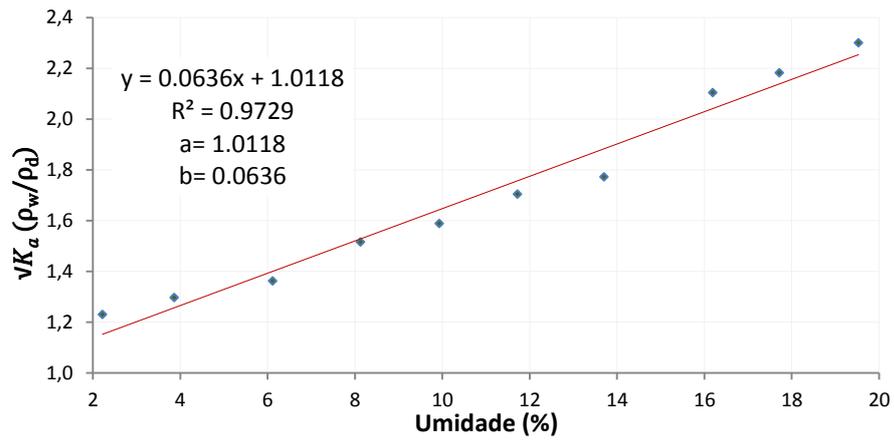
#### 4.1.2 Calibração pelo método proposto por Yu e Drnevich (2004)

O método de calibração proposto por Yu e Drnevich (2004) é baseado nas leituras simultâneas da Constante Dielétrica Aparente ( $K_a$ ) e da Condutividade Elétrica aparente ( $EC_b$ ). A Tabela 9 apresenta os resultados da calibração descrito no item 3.2.1. No entanto, para a determinação das constantes de calibração  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$ , é necessário correlacionar o teor de umidade com  $\sqrt{K_a}$  e  $\sqrt{EC_b}$ . Da relação entre as duas últimas se obtêm as constantes  $f$  e  $g$ . Estas correlações são apresentadas nas Figura 36, Figura 37 e Figura 38.

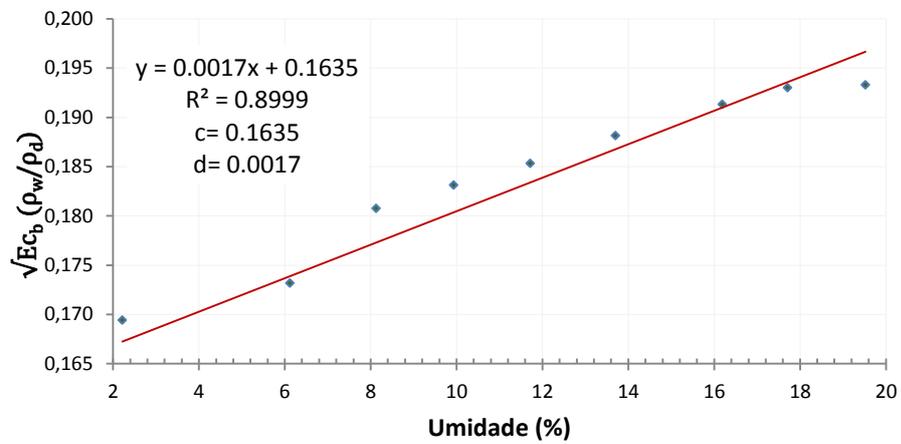
Tabela 9. Resultados do ensaio de calibração.

| $w_{ref}$ (%) | $K_a$ | $EC_b$<br>S/m | $\rho_d$<br>g/cm <sup>3</sup> | $\theta$<br>m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> | e    | n (%) | Sr (%) |
|---------------|-------|---------------|-------------------------------|--|------|-------|--------|
| 2.22          | 3.15  | 0.0597        | 1.442                         | 0.03                                       | 0.84 | 46    | 7      |
| 3.86          | 3.52  | 0.0552        | 1.446                         | 0.06                                       | 0.83 | 45    | 12     |
| 6.12          | 3.90  | 0.0630        | 1.449                         | 0.09                                       | 0.83 | 45    | 20     |
| 8.13          | 4.79  | 0.0682        | 1.445                         | 0.12                                       | 0.83 | 45    | 26     |
| 9.93          | 5.35  | 0.0711        | 1.456                         | 0.14                                       | 0.82 | 45    | 32     |
| 11.72         | 6.12  | 0.0724        | 1.452                         | 0.17                                       | 0.82 | 45    | 38     |
| 13.70         | 6.61  | 0.0745        | 1.451                         | 0.20                                       | 0.82 | 45    | 44     |
| 16.19         | 9.33  | 0.0771        | 1.451                         | 0.23                                       | 0.82 | 45    | 52     |
| 17.71         | 10.05 | 0.0787        | 1.454                         | 0.26                                       | 0.82 | 45    | 57     |
| 19.53         | 11.34 | 0.0801        | 1.464                         | 0.29                                       | 0.81 | 45    | 64     |

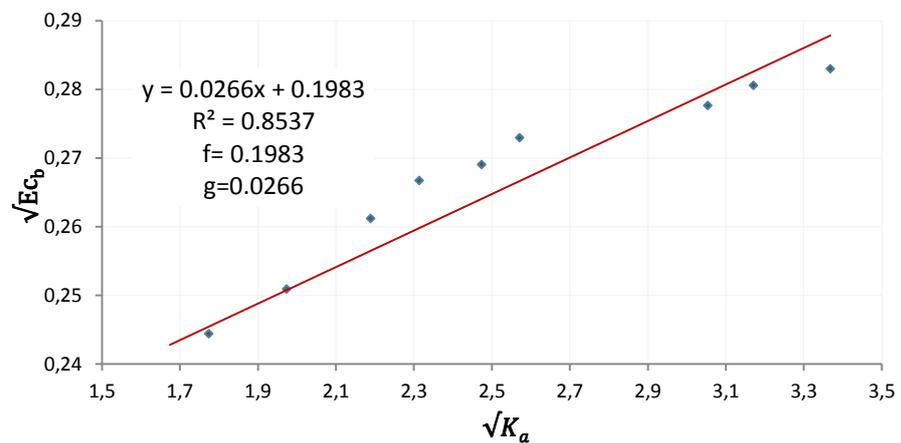
A correção da condutividade elétrica aparente de campo ( $EC_{b,adj.}$ ) foi feita tal como apresentado na revisão bibliográfica (Equação (18)). Substituindo os valores das constantes de calibração ( $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $f$  e  $g$ ) e da condutividade elétrica aparente ajustada nas Equações (19) e (20), foram determinados o teor de umidade e a massa específica seca utilizando a técnica TDR ( $w_{TDR}$  e  $\rho_{d,TDR}$ ). Estes valores foram comparados com os teores de umidade de referência, empregando o método da estufa elétrica, e a massa específica seca calculada a partir da pesagem do molde com o solo úmido (Tabela 10).



**Figura 36. Determinação das constantes de calibração  $a$  e  $b$ .**



**Figura 37. Determinação das constantes de calibração  $c$  e  $d$ .**



**Figura 38. Determinação das constantes de calibração  $f$  e  $g$ .**

A Figura 39 mostra a reta de ajuste entre os valores de teor de umidade de referência e os calculados utilizando a ponteira TDR, obtendo um coeficiente de determinação de 0.97.

Tabela 10. Valores de teores de umidade e massa específica seca determinados usando a técnica TDR e valores de referência.

| $W_{ref}$<br>(%)   | $W_{TDR}$<br>(%) | $\rho_{d,ref}$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $\rho_{d,TDR}$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) |
|--------------------|------------------|--|--|
| 2.22               | 3.31             | 1.442                                  | 1.452                                  |
| 3.86               | 4.41             | 1.446                                  | 1.451                                  |
| 6.12               | 5.48             | 1.449                                  | 1.451                                  |
| 8.13               | 7.81             | 1.445                                  | 1.451                                  |
| 9.93               | 9.16             | 1.456                                  | 1.451                                  |
| 11.72              | 10.90            | 1.452                                  | 1.451                                  |
| 13.70              | 11.96            | 1.451                                  | 1.451                                  |
| 16.19              | 17.20            | 1.451                                  | 1.450                                  |
| 17.71              | 18.47            | 1.454                                  | 1.450                                  |
| 19.53              | 20.61            | 1.464                                  | 1.450                                  |
| <b>Erro Padrão</b> | <b>1.07</b>      | <b>Erro Padrão</b>                     | <b>0.007</b>                           |

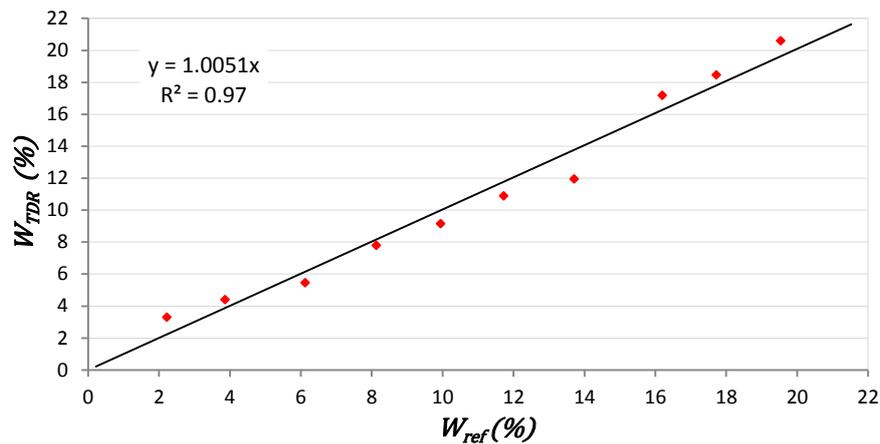


Figura 39. Relação entre o teor de umidade de referência e estimados usando a técnica TDR.

Para uma melhor avaliação dos resultados calculou-se o Erro Padrão da Estimativa para uma amostra de dados, a partir da Equação (27):

$$S_{est} = \sqrt{\frac{\sum(y - y')^2}{n - 2}} \quad (27)$$

Onde  $S_{est}$  é o erro padrão da estimativa,  $y$  é valor atual,  $y'$  é o valor previsto,  $n$  é o total da amostra e  $(y - y')$  o erro da previsão. O erro padrão da estimativa ou desvio padrão dos resíduos mede a dispersão dos resíduos ao redor da linha de regressão. A unidade do  $S_{est}$  é a mesma de  $y$ .

### 4.1.3 Calibração por correlações alternativas

Com o objetivo de obter um melhor ajuste nas equações de calibração, foram analisadas as correlações alternativas  $\sqrt{K_a}$  versus  $w$ ,  $K_a$  versus  $\theta$  e  $K_a$  versus  $w$ , apresentando para cada uma, o melhor ajuste quando se utiliza o método dos mínimos quadrados para um polinômio de terceiro grau. Tem-se:

$$\sqrt{K_a} \text{ versus } w \quad w (\%) = a \sqrt{K_a}^3 + b \sqrt{K_a}^2 + c \sqrt{K_a} + d \quad (28)$$

$$K_a \text{ versus } \theta \quad \theta (\%) = a K_a^3 + b K_a^2 + c K_a + d \quad (29)$$

$$K_a \text{ versus } w \quad w (\%) = a K_a^3 + b K_a^2 + c K_a + d \quad (30)$$

As Figura 40, Figura 42 e Figura 44 mostram os gráficos de análise para cada correlação e os respectivos valores das constantes de calibração  $a, b, c$  e  $d$ . Essas constantes definiram a equação de calibração para cada correlação.

Em seguida, usando as equações de calibração foram calculadas as umidades pelo método TDR. Estas foram comparadas com as umidades de referência e o erro padrão da estimativa foi calculado. Esses valores são mostrados a continuação na Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13, e representados graficamente nas Figura 41, Figura 43 e Figura 45.

#### a) Correlação $\sqrt{K_a}$ versus $w$ :

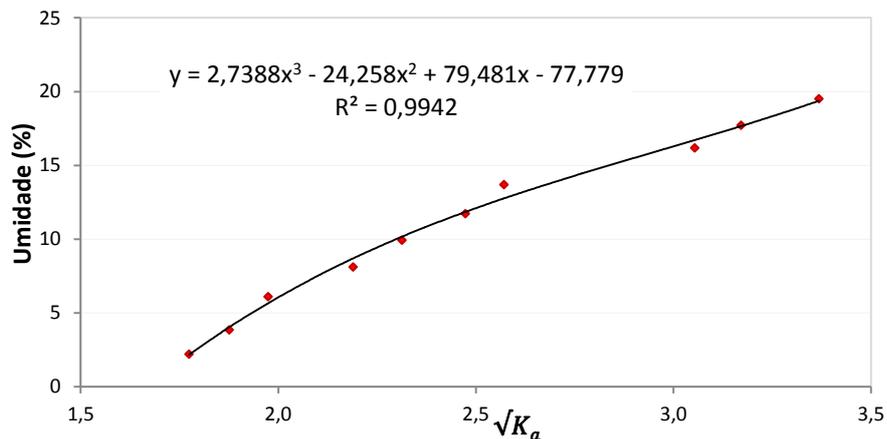


Figura 40. Determinação das constantes de calibração  $a, b, c$  e  $d$  segundo a correlação  $\sqrt{K_a}$  versus  $w$ .

Tabela 11. Cálculo do erro padrão para a correlação  $\sqrt{K_a}$  versus  $w$ .

| $\sqrt{K_a}$       | $w_{ref}$ (%) | $w_{TDR}$ | $w_{ref} - w_{TDR}$ | $(w_{ref} - w_{TDR})^2$ |
|--------------------|---------------|-----------|---------------------|-------------------------|
| 1.774              | 2.22          | 2.17      | -0.05               | 0.0                     |
| 1.876              | 3.86          | 4.03      | 0.17                | 0.0                     |
| 1.974              | 6.12          | 5.66      | -0.46               | 0.2                     |
| 2.189              | 8.13          | 8.70      | 0.57                | 0.3                     |
| 2.313              | 9.93          | 10.18     | 0.24                | 0.1                     |
| 2.474              | 11.72         | 11.85     | 0.13                | 0.0                     |
| 2.571              | 13.70         | 12.77     | -0.93               | 0.9                     |
| 3.054              | 16.19         | 16.71     | 0.52                | 0.3                     |
| 3.171              | 17.71         | 17.66     | -0.05               | 0.0                     |
| 3.368              | 19.53         | 19.38     | -0.15               | 0.0                     |
| $\Sigma =$         |               |           |                     | 1.8                     |
| <b>Erro Padrão</b> |               |           |                     | <b>0.48</b>             |

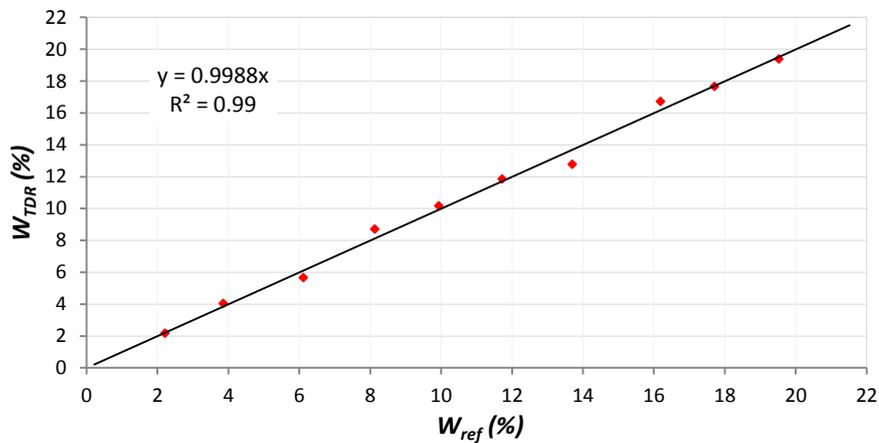


Figura 41. Relação entre o teor de umidade de referência e a umidade estimada pela técnica TDR.

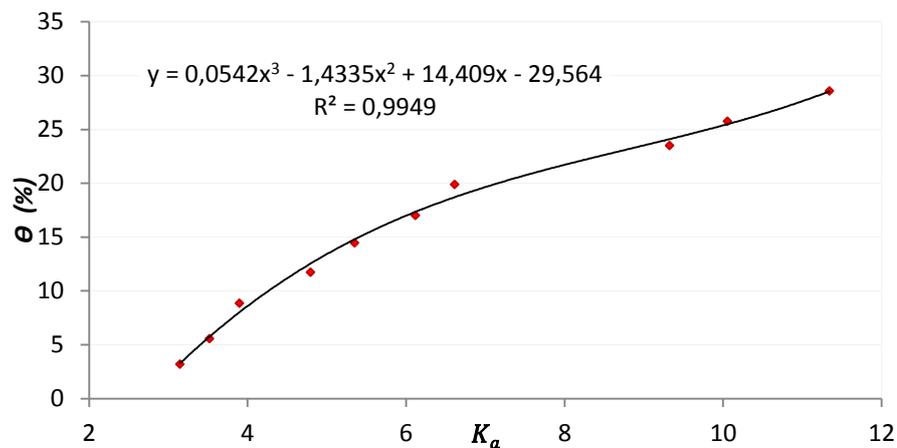
b) Correlação  $K_a$  versus  $\theta$ :Figura 42. Determinação das constantes de calibração  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  segundo a correlação  $K_a$  versus  $\theta$ .

Tabela 12. Cálculo do erro padrão para a correlação  $K_a$  versus  $\theta$ .

| $K_a$              | $\theta_{ref} (m^3/m^3)$ | $\theta_{ref} (%)$ | $\theta_{TDR} (%)$ | $(\theta_{ref} - \theta_{TDR})^2$ |
|--------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------------|
| 3.147              | 0.032                    | 3.20               | 3.27               | 0.0057                            |
| 3.519              | 0.056                    | 5.58               | 5.75               | 0.0284                            |
| 3.897              | 0.089                    | 8.86               | 8.02               | 0.7005                            |
| 4.793              | 0.117                    | 11.74              | 12.53              | 0.6296                            |
| 5.352              | 0.145                    | 14.47              | 14.80              | 0.1106                            |
| 6.118              | 0.170                    | 17.01              | 17.35              | 0.1124                            |
| 6.612              | 0.199                    | 19.88              | 18.70              | 1.3787                            |
| 9.325              | 0.235                    | 23.49              | 24.10              | 0.3654                            |
| 10.054             | 0.257                    | 25.75              | 25.48              | 0.0693                            |
| 11.343             | 0.286                    | 28.59              | 28.54              | 0.0022                            |
| $\Sigma=$          |                          |                    |                    | 3.4028                            |
| <b>Erro Padrão</b> |                          |                    |                    | <b>0.65</b>                       |

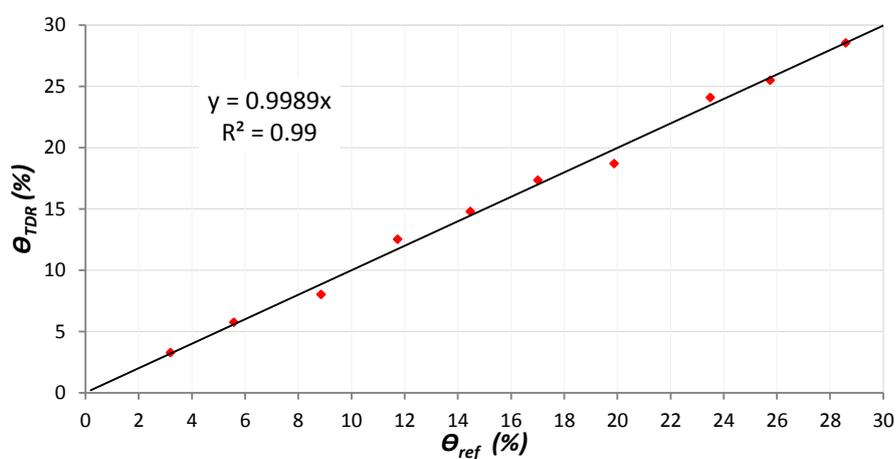


Figura 43. Relação entre o teor de umidade volumétrica de referência e a estimada pela técnica TDR.

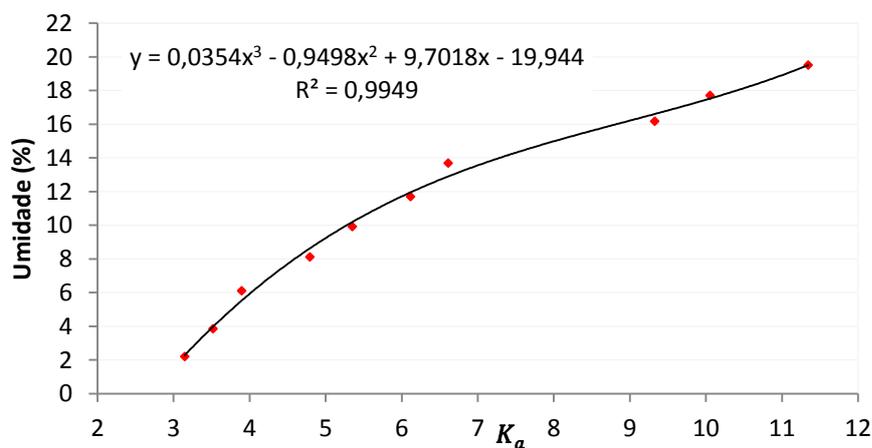
c) Correlação  $K_a$  versus  $w$ :Figura 44. Determinação das constantes de calibração  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  segundo a correlação  $K_a$  versus  $w$ .

Tabela 13. Cálculo do erro padrão para a correlação  $K_a$  versus  $w$ .

| $K_a$              | $w_{ref}$ (%) | $w_{TDR}$ (%) | $(w_{ref} - w_{TDR})^2$ |
|--------------------|---------------|---------------|-------------------------|
| 3.147              | 2.22          | 2.28          | 0.005                   |
| 3.519              | 3.86          | 3.98          | 0.014                   |
| 3.897              | 6.12          | 5.53          | 0.339                   |
| 4.793              | 8.13          | 8.63          | 0.258                   |
| 5.352              | 9.93          | 10.20         | 0.071                   |
| 6.118              | 11.72         | 11.97         | 0.062                   |
| 6.612              | 13.70         | 12.91         | 0.623                   |
| 9.325              | 16.19         | 16.64         | 0.201                   |
| 10.054             | 17.71         | 17.57         | 0.022                   |
| 11.343             | 19.53         | 19.56         | 0.001                   |
| $\Sigma =$         |               |               | 1.595                   |
| <b>Erro Padrão</b> |               |               | <b>0.45</b>             |

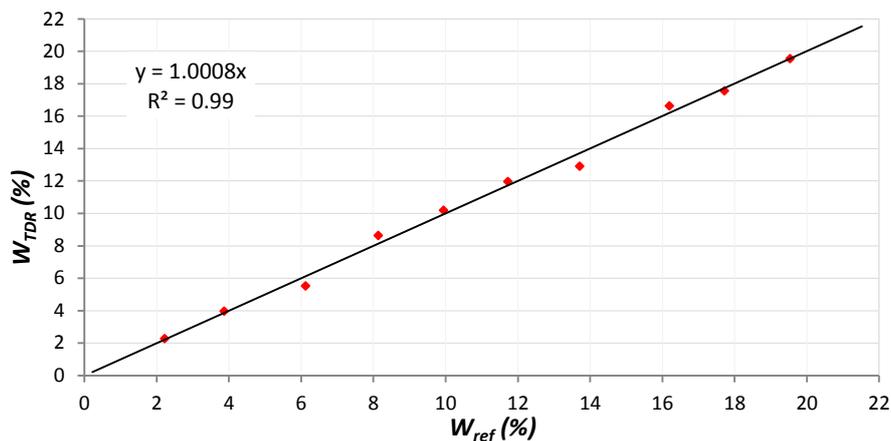


Figura 45. Relação entre o teor de umidade de referência e estimada pela técnica TDR.

## 4.2 ENSAIOS DE CAMPO

### 4.2.1 Primeira campanha

Durante a execução dos ensaios TDR as leituras da forma de onda apresentaram algum tipo de ruído, sobretudo nas leituras mais próximas da superfície do terreno, dificultando a determinação dos valores de  $K_a$  e  $EC_b$  e, portanto do teor de umidade. Esse excesso de ruído pode ser causado por diversos fatores que serão enumerados a seguir para facilitar a sua referência mais adiante e as respectivas soluções aplicadas. Eles são:

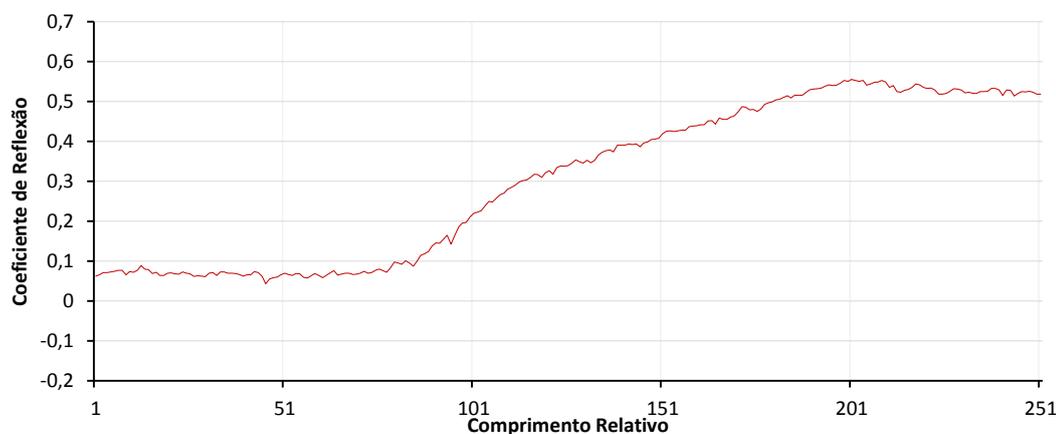
- **Fator 1.** Interferência de aterramento das edificações próximas ao local do ensaio.
- **Fator 2.** Interferência elétrica proveniente da tomada.

- **Fator 3.** Contato entre as conexões e parte metálica do equipamento (hastes, sistema de cravação multifunção).
- **Fator 4.** Variação na temperatura do cabo coaxial.
- **Fator 5.** Campos magnéticos originados nos solos com teores elevados de óxidos de ferro.

A fim de melhorar a qualidade desses sinais, foram realizadas algumas modificações no equipamento, tais como: isolar os conectores coaxiais que poderiam ficar em contato com o hasteamento de cravação e, da mesma forma, garantir que esse hasteamento não entrasse em contato com partes metálicas do equipamento de cravação. Esses procedimentos possibilitaram a continuidade do ensaio, pois se observou uma melhora significativa na qualidade dos sinais. No entanto, não eliminou totalmente o ruído nos registros das ondas. A Figura 46 mostra formas de onda típicas adquiridas a 1.12 m e 7.87 m de profundidade.



a.) Registro de onda a 1.12 m de profundidade.



b.) Registro de onda a 7.87 m de profundidade.

Figura 46. Exemplo do ruído nos registros de duas ondas típicas.

Na Tabela 14 e na Tabela 15 são apresentados os valores de constante dielétrica, condutividade elétrica aparente, teor de umidade gravimétrico de referência e os valores de teores de umidade gravimétrico, estimados por meio das calibrações TDR para cada um dos ensaios realizados em campo. A medida realizada na profundidade mais rasa (0.38 m) do ensaio 1 apresentou grande diferença do valor de umidade de referência e por isto não foi considerada. Além disso, é apresentado o erro padrão da estimativa calculado para cada calibração. Vale ressaltar que o cabo coaxial empregado nas duas primeiras campanhas de ensaios TDR foi um RG 58 de 50  $\Omega$ , de 24.82 m de comprimento.

Tabela 14. Resultados do Ensaio 1.

| Prof. (m)          | Ensaio 1 |        |               | Correlação ( $Ka, w$ ) | Correlação ( $\sqrt{Ka, w}$ ) | Yu e Drnevich (2004) |
|--------------------|----------|--------|---------------|------------------------|-------------------------------|----------------------|
|                    | $K_a$    | $Ec_b$ | $W_{ref}$ (%) | $w_{TDR}$ (%)          | $w_{TDR}$ (%)                 | $w_{TDR}$ (%)        |
| <b>0.38</b>        | -        | -      | 5.98          | -                      | -                             | -                    |
| <b>1.13</b>        | 7.00     | 0.0612 | 5.08          | 13.56                  | 13.43                         | 12.77                |
| <b>1.88</b>        | 5.92     | 0.0483 | 5.64          | 11.54                  | 11.45                         | 10.46                |
| <b>2.63</b>        | 5.09     | 0.0461 | 6.44          | 9.50                   | 9.52                          | 8.54                 |
| <b>3.38</b>        | 5.19     | 0.0470 | 6.48          | 9.76                   | 9.77                          | 8.78                 |
| <b>4.13</b>        | 5.22     | 0.0477 | 7.06          | 9.86                   | 9.85                          | 8.85                 |
| <b>4.88</b>        | 5.17     | 0.0597 | 7.64          | 9.72                   | 9.72                          | 8.73                 |
| <b>5.63</b>        | 5.83     | 0.0521 | 8.51          | 11.34                  | 11.26                         | 10.26                |
| <b>6.38</b>        | 6.23     | 0.0414 | 8.55          | 12.19                  | 12.07                         | 11.14                |
| <b>7.13</b>        | 6.60     | 0.0535 | 8.60          | 12.89                  | 12.75                         | 11.93                |
| <b>7.88</b>        | 6.27     | 0.0502 | 8.74          | 12.27                  | 12.14                         | 11.23                |
| <b>8.63</b>        | 6.99     | 0.0520 | 8.54          | 13.55                  | 13.41                         | 12.75                |
| <b>Erro Padrão</b> |          |        |               | <b>4.90</b>            | <b>4.81</b>                   | <b>3.96</b>          |

Tabela 15. Resultados do Ensaio 2.

| Prof. (m)          | Ensaio 2 |        |               | Correlação ( $Ka, w$ ) | Correlação ( $\sqrt{Ka, w}$ ) | Yu e Drnevich (2004) |
|--------------------|----------|--------|---------------|------------------------|-------------------------------|----------------------|
|                    | $K_a$    | $Ec_b$ | $W_{ref}$ (%) | $w_{TDR}$ (%)          | $w_{TDR}$ (%)                 | $w_{TDR}$ (%)        |
| <b>0.38</b>        | 4.76     | 0.0846 | 5.98          | 8.52                   | 8.60                          | 4.84                 |
| <b>1.13</b>        | 4.66     | 0.0396 | 5.08          | 8.21                   | 8.31                          | 6.04                 |
| <b>1.88</b>        | 5.60     | 0.0434 | 5.64          | 10.82                  | 10.76                         | 9.51                 |
| <b>2.63</b>        | 5.54     | 0.0442 | 6.44          | 10.66                  | 10.62                         | 9.94                 |
| <b>3.38</b>        | 5.35     | 0.0361 | 6.48          | 10.20                  | 10.17                         | 9.27                 |
| <b>4.13</b>        | 4.32     | 0.0491 | 7.06          | 7.11                   | 7.22                          | 6.00                 |
| <b>4.88</b>        | 4.94     | 0.0505 | 7.64          | 9.06                   | 9.11                          | 8.01                 |
| <b>5.63</b>        | 4.98     | 0.0517 | 8.51          | 9.19                   | 9.22                          | 7.69                 |
| <b>6.38</b>        | 4.63     | 0.0530 | 8.55          | 8.14                   | 8.21                          | 6.37                 |
| <b>7.13</b>        | 4.73     | 0.0477 | 8.60          | 8.45                   | 8.51                          | 6.47                 |
| <b>7.88</b>        | 5.27     | 0.0471 | 8.74          | 9.98                   | 9.98                          | 8.29                 |
| <b>8.63</b>        | 5.06     | 0.0475 | 8.54          | 9.41                   | 9.44                          | 7.24                 |
| <b>Erro Padrão</b> |          |        |               | <b>2.8</b>             | <b>2.82</b>                   | <b>2.24</b>          |

A Figura 47 representa o perfil de umidade para os dois ensaios TDR realizados no campo experimental, além do perfil de teor de umidade gravimétrico de referência. Visando reduzir a interferência nos registros da forma de onda causadas por ruído foram trocadas todas as conexões entre a sonda e o Tektronix (**Fator 3**), ou seja um total de três conexões coaxiais (um conector na sonda e dois no cabo de extensão).

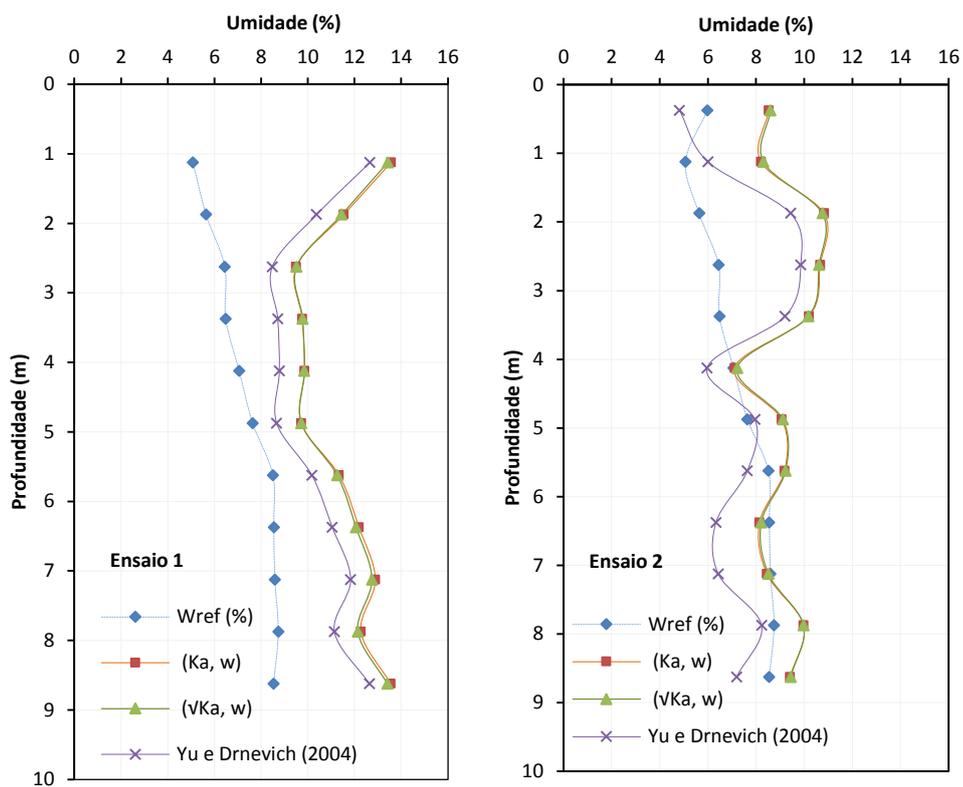


Figura 47. Perfil de umidade da primeira campanha de ensaios realizados.

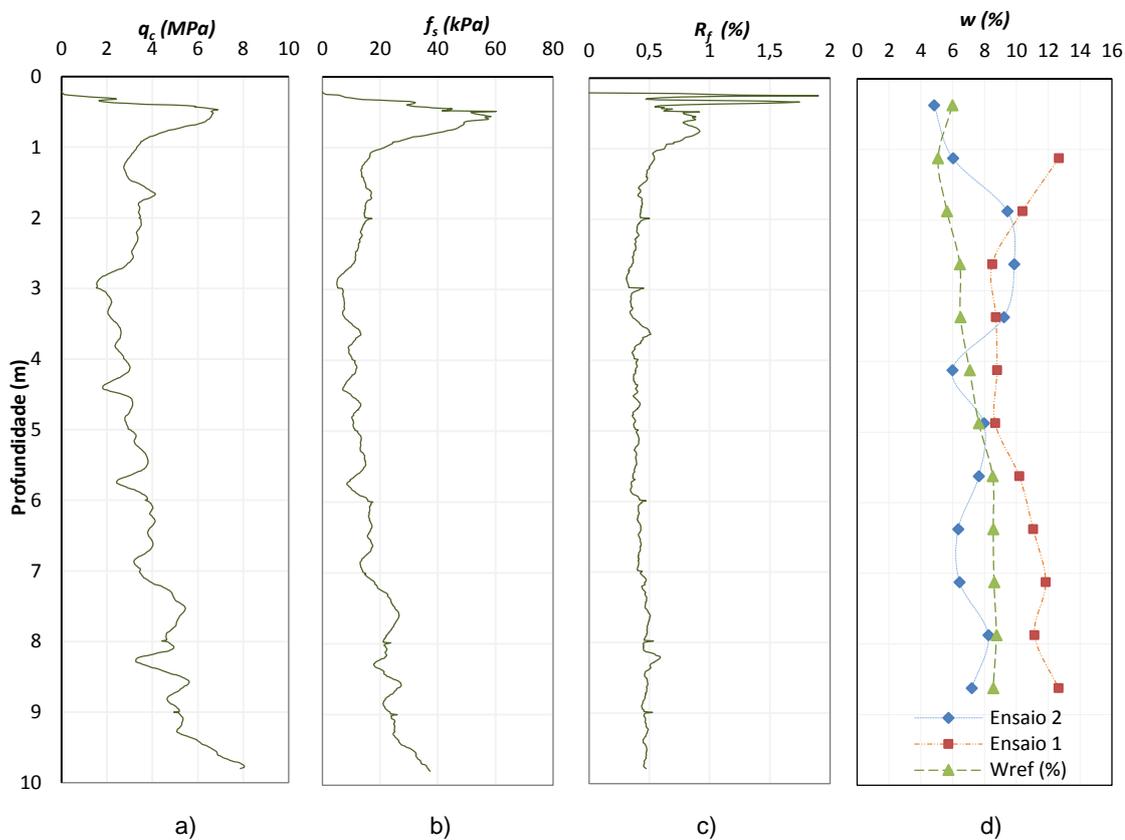
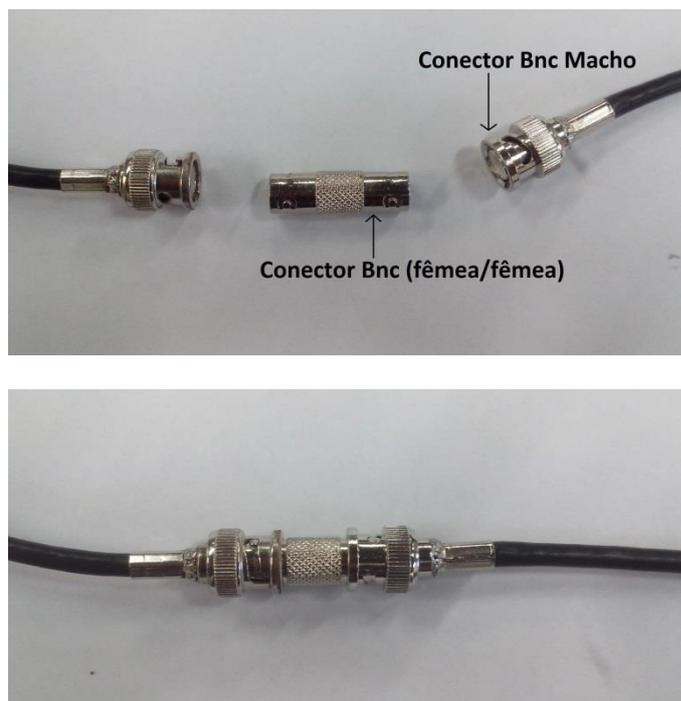


Figura 48. Resultados da primeira campanha de ensaios de campo a) resistência de ponta, b) atrito lateral, c) razão de atrito, d) teor de umidade de referência e estimado (Yu e Drnevich (2004)).

Tendo em vista as grandes diferenças observadas entre os valores estimados para teores de umidade pela técnica TDR (Figura 48) para os dois ensaios dessa campanha, foram feitas modificações no equipamento de ensaio, descritos a seguir:

- O conector BNC (fêmea/fêmea) utilizado para conectar a sonda TDR e o cabo coaxial de extensão ficava dentro das hastes CPT utilizadas no ensaio, portanto em contato com as paredes internas destas hastes (**Fator 3**). Por isto, foi necessário proteger essa conexão com fita isolante para reduzir o ruído.



**Figura 49. Conectores coaxiais utilizados**

- Para evitar as interferências da rede elétrica (**Fator 2**), o Tektronix e o computador foram ligados a um filtro de linha.
- Realizaram-se várias leituras no laboratório, mas não foi constatado nenhum tipo de ruído nelas.
- Uma pesquisa bibliográfica foi feita para avaliar a possível influência dos altos teores de óxido de ferro nas determinações do teor de umidade utilizando a técnica TDR e se isso poderia causar algum ruído no sistema (**Fator 5**).

Robertson et al. (1994) observaram que a presença de minerais de ferro no solo pode causar grandes incertezas na estimativa do teor de umidade pelo método TDR, superestimando-o quando se utiliza a calibração padrão. Eles observaram que a presença de 15% de magnetita causa um aumento de 60% na determinação do teor de umidade utilizando a calibração padrão de laboratório. Os autores evidenciaram um incremento no tempo de propagação de 1 ns para 1.5 ns para areia seca,

correspondente a um aumento de 2.5 na constante dielétrica quando o solo sofreu um incremento de 15% de magnetita. Hashiguti et al. (2012) estudaram a influência de diferentes teores de óxido de ferro na estimativa de umidade de um solo usando a técnica TDR, e explicaram que o efeito da presença destes sobre a relação entre teor de umidade e constante dielétrica aumenta com o acréscimo do teor de óxidos. Os autores concluíram que é notória a necessidade de uma calibração local de o uso de um modelo específico para cada situação.

Silva (1998) observou que a presença de óxidos de ferro pode afetar o campo magnético criado pelo pulso elétrico do TDR afetando o tempo de propagação da onda eletromagnética emitida.

Souza et al. (2001) definiu a equação de calibração para um equipamento TDR para um latossolo vermelho distroférrico, seguindo duas metodologias diferentes. A primeira foi feita em laboratório usando uma amostra deformada de solo e a segunda foi realizada em campo. Os autores compararam essas equações com outras três disponíveis na literatura. Eles concluíram que a calibração realizada em laboratório não explicou satisfatoriamente a variação do teor de umidade volumétrico ( $\theta$ ) encontrado no campo, porém não é recomendável o uso de uma metodologia de calibração baseada em amostras de solo deformadas para o solo que eles estudaram. Esse solo apresenta as seguintes características:

**Tabela 16. Solo estudado por Souza et al. (2001)**

|  |                                       |
|--|---------------------------------------|
| Argila= 560 g/kg                                 | PH= 5.7                               |
| Silte= 90 g/kg                                   | MO=3.9%                               |
| Areia= 350 g/kg                                  | F <sub>3</sub> O <sub>2</sub> = 21.3% |
| Peso específico natural= 12.40 kN/m <sup>3</sup> | Porosidade= 53.2%                     |

Trintinalha et al. (2005) mostrou a necessidade do desenvolvimento de outros métodos de calibração do TDR quando este for utilizado em diferentes solos tropicais, os quais apresentam diferentes teores de óxido de ferro.

A quantidade de água adsorvida pelas partículas do solo aumenta com o aumento do teor de óxidos de ferro, matéria orgânica e argila alterando os valores de teor de umidade determinados com o uso da técnica TDR. Isto ocorre porque a matéria orgânica e o óxido de ferro aumentam a superfície específica, (Roth et al. 1992). No entanto, no trabalho de Tommaselli (1997), o valor de superfície específica mostrou ter uma pequena influência no ajuste dos modelos de regressão linear múltipla, o que implica que os teores de  $Fe_3O_2$  e matéria orgânica não foram variáveis significativas nas análises realizadas.

As características químicas e mineralógicas do solo de Bauru também foram investigadas por Agnelli (1997) e os resultados estão na Tabela 17. Esses resultados mostram que para

os quatro primeiros metros de profundidade um conteúdo de matéria orgânica (MO) menor do que 0.5%, óxidos de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) em torno de 10% e alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) variando entre 36.33 e 20.46 %. Considerando que a calibração foi realizada para o solo específico do campo experimental, acredita-se que os teores de óxidos de ferro e de alumínio não geram um campo magnético suficientemente grande que possa provocar ruído na onda eletromagnética.

**Tabela 17. Resultados de ensaios químicos. Campo experimental da Unesp de Bauru (SP), Agnelli (1997).**

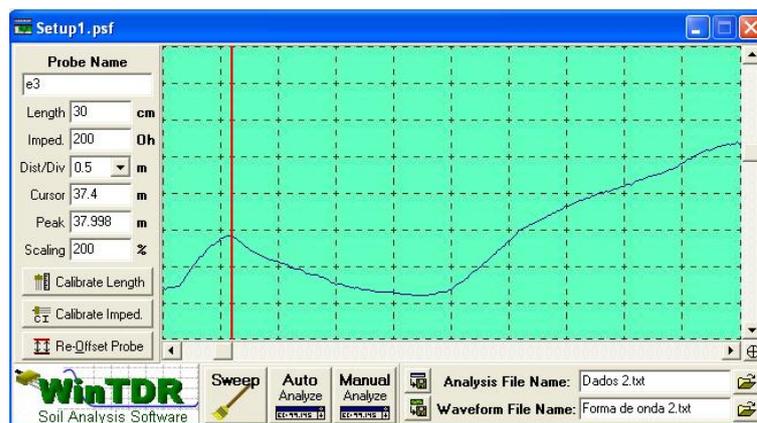
| <b>Condição e prof. da amostra (m)</b> | pH<br>H <sub>2</sub> O | pH<br>KCl | MO<br>(%) | SiO <sub>2</sub><br>(%) | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>(%) | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>(%) |
|--|------------------------|-----------|-----------|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Natural 1.00                           | 4.24                   | 3.87      | 0.5       | 47.89                   | 8.70                                  | 36.33                                 |
| Natural 2.00                           | 4.59                   | 4.15      | 0.3       | 45.30                   | 10.52                                 | 27.54                                 |
| Natural 3.00                           | 4.80                   | 4.24      | 0.2       | 47.67                   | 9.73                                  | 20.46                                 |
| Natural 4.00                           | 4.64                   | 4.02      | 0.2       | 48.61                   | 10.55                                 | 28.84                                 |

#### 4.2.2 Segunda campanha

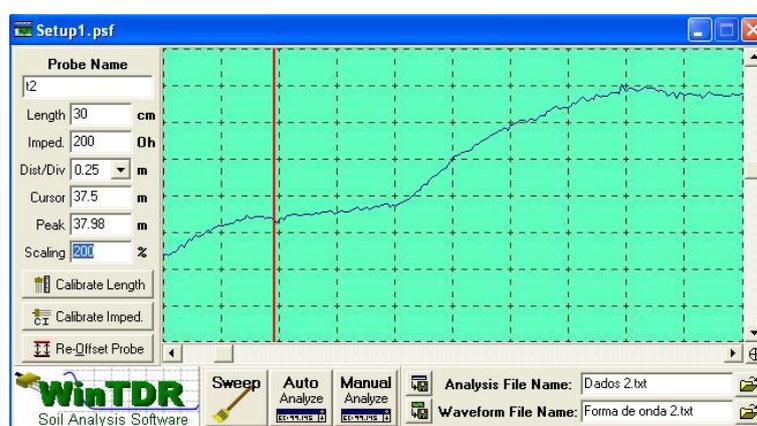
Após realizadas as modificações e verificações necessárias na campanha 1, foi executada a segunda campanha de campo. No entanto, as formas de onda continuaram apresentando ruído, dificultando assim a definição da primeira inflexão e portanto, o cálculo da constante dielétrica. Destaca-se que nessa campanha o cabo utilizado foi o mesmo da primeira.

Antes de começar o ensaio TDR foram realizadas várias leituras com a sonda dentro da água para verificar seu funcionamento e determinar a primeira inflexão, sem observar nenhum tipo de interferência. No entanto, quando a sonda era inserida no terreno, com o cabo coaxial passando no interior das hastes de cravação, as ondas passavam imediatamente a apresentar ruído. A configuração de filtro de ruído do Tektronix foi modificado tentando diminuir a interferência, o que ajudou um pouco, mas a primeira inflexão da onda continuava pouco visível. A Figura 50 mostra a onda gerada em água e no solo durante a segunda campanha de ensaios.

Na Tabela 18 são apresentados os dados coletados no ensaio TDR e os respectivos valores dos teores de umidades de referência. O erro padrão da estimativa determinado nesta campanha foi superior a 6%, evidenciando a grande diferença entre os valores de umidade estimada usando a sonda TDR ( $w_{TDR}$ ) e umidade de referência ( $w_{ref}$ ).



a.) Forma de onda em água



b.) Forma de onda no solo

Figura 50. Forma de onda gerada em água no solo na segunda campanha.

Tabela 18. Resultados correspondentes à segunda campanha de campo.

| Prof. (m)   | $K_a$ | $Ec_b$ | $W_{ref}$ (%) | Correlação ( $K_a, w$ ) |               | Correlação ( $\sqrt{K_a, w}$ ) | Yu e Drnevich (2004) |
|-------------|-------|--------|---------------|-------------------------|---------------|--------------------------------|----------------------|
|             |       |        |               | $w_{TDR}$ (%)           | $w_{TDR}$ (%) | $w_{TDR}$ (%)                  |                      |
| 0.38        | 3.93  | 0.0656 | 9.10          | 5.64                    | 5.77          | 7.95                           |                      |
| 1.13        | 3.52  | 0.0718 | 13.30         | 4.00                    | 4.06          | 6.78                           |                      |
| 1.88        | 3.52  | 0.0683 | 11.70         | 3.97                    | 4.03          | 6.76                           |                      |
| 2.63        | 3.62  | 0.0594 | 10.60         | 4.40                    | 4.48          | 7.06                           |                      |
| 3.38        | 3.65  | 0.0596 | 8.80          | 4.52                    | 4.61          | 7.15                           |                      |
| 4.13        | 3.55  | 0.0623 | 8.40          | 4.11                    | 4.18          | 6.86                           |                      |
| 4.88        | 3.49  | 0.0668 | 10.20         | 3.87                    | 3.92          | 6.69                           |                      |
| 5.63        | 3.87  | 0.0666 | 8.50          | 5.43                    | 5.55          | 7.80                           |                      |
| Erro Padrão |       |        |               | 6.87                    | 6.79          | 4.05                           |                      |

Na segunda campanha as ondas não mostraram uma primeira inflexão visível. Uma das razões que pode explicar esse fato foram os baixos teores de umidade do solo, além dos ruídos já discutidos. Uma nova calibração da sonda utilizando um cabo coaxial RGC 58 de 50 ohms de 13.85 m de comprimento foi realizada. Esse cabo possui um isolamento

entre o condutor interno e a malha de blindagem um pouco melhor do que um cabo RG 58. O material dielétrico de um cabo coaxial é um fator muito importante na qualidade do cabo, pois é o responsável pelas características elétricas que determinam a intensidade do sinal e a distância de transmissão. Essas características elétricas são impedância, capacitância, velocidade de propagação e atenuação. O comprimento do cabo também foi reduzido, uma vez que, segundo Herkelrath et al. (1991), a resolução dos sinais de reflexão decresce com o aumento do comprimento do cabo e que cabos até os 27 m não causam problemas na reflexão do sinal. No entanto, Assis (2008) demonstrou que a constante dielétrica não sofre variações significativas como o aumento do cabo, mas afeta significativamente o valor da condutividade elétrica aparente. A Tabela 19 mostra as principais características do cabo coaxial RG-58 e RGC-58.

**Tabela 19. Propriedades dos cabos RGC-58<sup>3</sup> e RG-58<sup>4</sup>.**

| <b>Cabo</b>   | <b>Condutor Interno/(<math>\phi</math>, mm)</b> | <b>Material Dielétrico/(<math>\phi</math>, mm)</b> | <b>Blindagem/ (<math>\phi</math>, mm)</b>       | <b>Capa/ (<math>\phi</math>, mm)</b> | <b>*Atenuação (dB/100m)</b> |
|---------------|---|--|---|--------------------------------------|-----------------------------|
| <b>RG-58</b>  | Corda de cobre estanhado classe 4/ 0.9          | Polietileno expandido/ 2.90                        | Trança de cobre estanhado/ 3.55                 | PVC / 5                              | 4.8                         |
| <b>RGC-58</b> | Fio de cobre nu/ 1.06                           | Polietileno expandido/ 2.95                        | Fita metalizada+ Trança de cobre estanhado/ 3.6 | Polietileno expandido/ 5             | 3.7                         |

\*Frequência de 10 Mhz à 20°C.

O procedimento de calibração usando o cabo RGC-58 de 50 ohms foi o mesmo realizado na primeira calibração. De maneira idêntica, as correlações alternativas e a calibração proposta por Yu e Drnevich (2004) foram determinadas. A Tabela 20 apresenta os resultados dessa calibração.

**Tabela 20. Resultados da calibração com o novo cabo.**

| $w_{ref}$ (%) | $K_a$ | $E_{c_b}$<br>S/m | $\rho_d$<br>g/cm <sup>3</sup> | $\theta$<br>m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> | e    | n (%) | Sr (%) |
|---------------|-------|------------------|-------------------------------|--|------|-------|--------|
| <b>0.49</b>   | 2.75  | 0.1180           | 1.375                         | 0.0067                                     | 0.92 | 48    | 1      |
| <b>3.48</b>   | 2.77  | 0.1179           | 1.379                         | 0.0480                                     | 0.92 | 48    | 10     |
| <b>5.47</b>   | 2.80  | 0.1178           | 1.450                         | 0.0793                                     | 0.83 | 45    | 18     |
| <b>7.25</b>   | 3.55  | 0.1231           | 1.447                         | 0.1049                                     | 0.83 | 45    | 23     |
| <b>8.73</b>   | 4.12  | 0.1369           | 1.450                         | 0.1266                                     | 0.83 | 45    | 28     |
| <b>9.32</b>   | 4.61  | 0.1247           | 1.452                         | 0.1354                                     | 0.82 | 45    | 30     |
| <b>10.57</b>  | 5.23  | 0.1264           | 1.454                         | 0.1536                                     | 0.82 | 45    | 34     |
| <b>12.93</b>  | 6.01  | 0.1277           | 1.464                         | 0.1893                                     | 0.81 | 45    | 42     |
| <b>16.08</b>  | 7.58  | 0.1404           | 1.507                         | 0.2424                                     | 0.76 | 43    | 56     |
| <b>17.67</b>  | 9.18  | 0.1505           | 1.600                         | 0.2826                                     | 0.65 | 40    | 71     |
| <b>20.22</b>  | 10.19 | 0.1468           | 1.650                         | 0.3336                                     | 0.60 | 38    | 89     |

<sup>3</sup> Adaptado de [http://www.rfsworld.com/userfiles/brasil/tabelas\\_radioflex\\_rgc.pdf](http://www.rfsworld.com/userfiles/brasil/tabelas_radioflex_rgc.pdf)

<sup>4</sup> Adaptado de [http://www.rfsworld.com/userfiles/brasil/tabelas\\_radioflex\\_rg.pdf](http://www.rfsworld.com/userfiles/brasil/tabelas_radioflex_rg.pdf)

#### 4.2.2.1 Calibração pelo método proposto por Yu e Drnevich (2004)

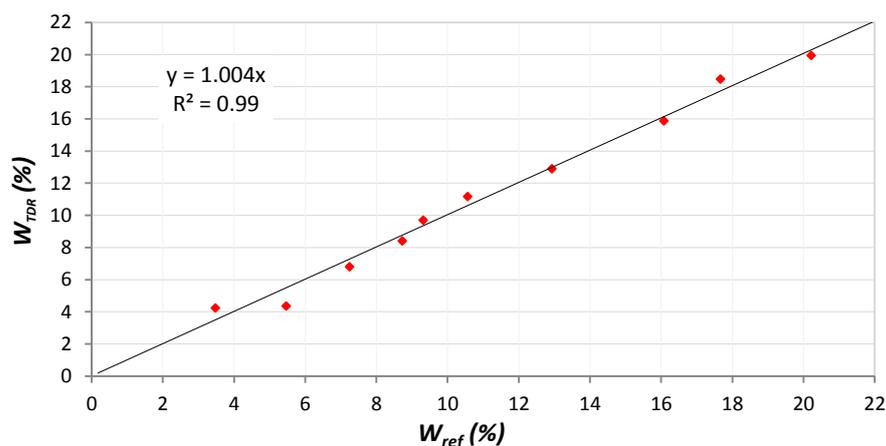
As constantes de calibração obtidas por este método são apresentadas na Tabela 21. Os valores de teor de umidade gravimétrico e de massa específica seca, determinados usando a técnica TDR e os valores de referência são mostrados na Tabela 22. A Figura 51 mostra os valores de umidade TDR e de umidade de referência.

**Tabela 21. Constantes de calibração obtidas pelo método de Yu e Drnevich (2004).**

| Constante de calibração | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>f</i> | <i>g</i> |
|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Yu e Drnevich (2004)    | 0.9756   | 0.0509   | 0.2485   | -0.0004  | 0.2999   | 0.0268   |

**Tabela 22. Valores de teor de umidade gravimétrica e massa específica seca, determinados usando a técnica TDR e valores de referência.**

| $W_{ref}$<br>(%)   | $W_{TDR}$<br>(%) | $\rho_{d,ref}$<br>( $g/cm^3$ ) | $\rho_{d,TDR}$<br>( $g/cm^3$ ) |
|--------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 3.48               | 4.25             | 1.379                          | 1.396                          |
| 5.47               | 4.35             | 1.450                          | 1.397                          |
| 7.25               | 6.81             | 1.447                          | 1.426                          |
| 8.73               | 8.41             | 1.450                          | 1.445                          |
| 9.32               | 9.70             | 1.452                          | 1.461                          |
| 10.57              | 11.18            | 1.454                          | 1.480                          |
| 12.93              | 12.90            | 1.464                          | 1.502                          |
| 16.08              | 15.87            | 1.507                          | 1.543                          |
| 17.67              | 18.49            | 1.600                          | 1.581                          |
| 20.22              | 19.96            | 1.650                          | 1.603                          |
| <b>Erro Padrão</b> | 0.65             | <b>Erro Padrão</b>             | 0.035                          |



**Figura 51. Comparação entre os valores de teor de umidade de referência e a calculada usando a técnica TDR.**

#### 4.2.2.2 Correlações alternativas

Os resultados da calibração utilizando as correlações alternativas são apresentados a seguir. As Figura 52, Figura 54 e Figura 56 mostram os gráficos e os respectivos valores das constantes de calibração  $a, b, c$  e  $d$ . As Tabela 23, Tabela 24 e Tabela 25 mostram os valores dos teores de umidade determinados empregando a técnica TDR e os teores de umidades de referência, além do cálculo do erro padrão da estimativa. As Figura 53, Figura 55 e Figura 57 mostram a comparação entre as umidades estimadas e de referência.

- Correlação  $\sqrt{K_a}$  versus  $w$ :

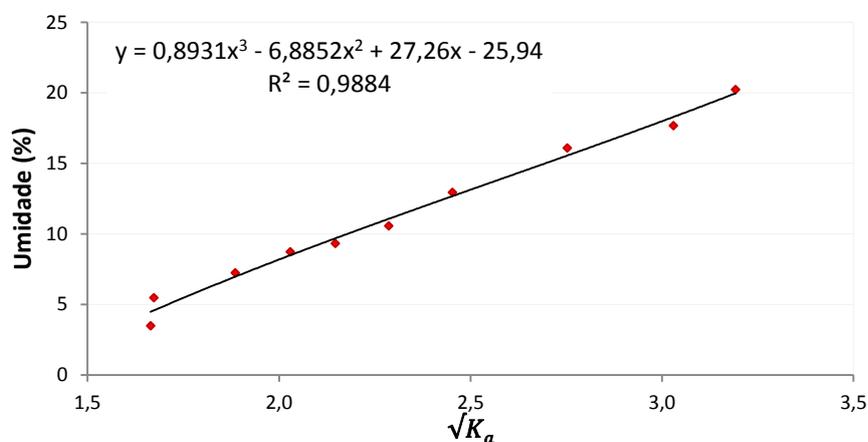


Figura 52. Determinação das constantes de calibração  $a, b, c$  e  $d$  segundo a correlação  $\sqrt{K_a}$  versus  $w$ .

Tabela 23. Cálculo do erro padrão para a correlação  $\sqrt{K_a}$  versus  $w$ .

| $\sqrt{K_a}$       | $w_{ref}$ (%) | $w_{TDR}$ | $w_{ref} - w_{TDR}$ | $(w_{ref} - w_{TDR})^2$ |
|--------------------|---------------|-----------|---------------------|-------------------------|
| 1.664              | 3.48          | 4.47      | 0.99                | 1.0                     |
| 1.672              | 5.47          | 4.57      | -0.90               | 0.8                     |
| 1.885              | 7.25          | 6.96      | -0.29               | 0.1                     |
| 2.029              | 8.73          | 8.48      | -0.25               | 0.1                     |
| 2.147              | 9.32          | 9.69      | 0.37                | 0.1                     |
| 2.286              | 10.57         | 11.07     | 0.50                | 0.2                     |
| 2.452              | 12.93         | 12.67     | -0.26               | 0.1                     |
| 2.752              | 16.08         | 15.55     | -0.53               | 0.3                     |
| 3.029              | 17.67         | 18.28     | 0.61                | 0.4                     |
| 3.192              | 20.22         | 19.96     | -0.25               | 0.1                     |
| $\Sigma =$         |               |           |                     | 3.1                     |
| <b>Erro Padrão</b> |               |           |                     | <b>0.62</b>             |

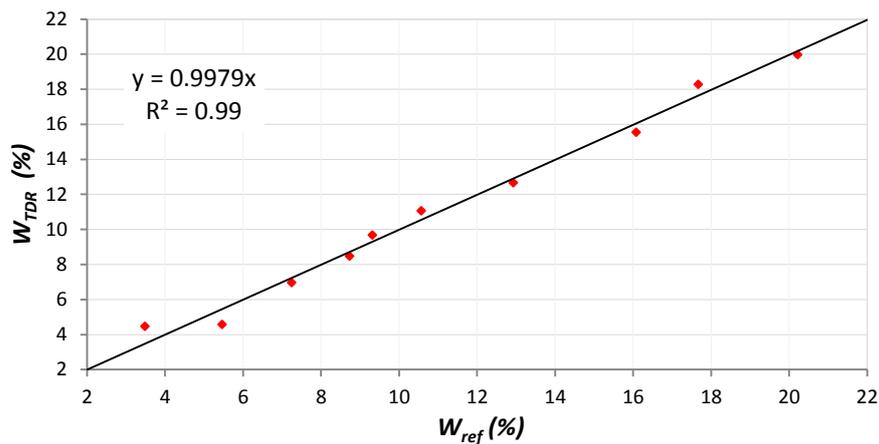


Figura 53. Comparação entre os valores de teor de umidade gravimétrico de referência e determinados pela técnica TDR.

• **Correlação  $K_a$  versus  $\theta$ :**

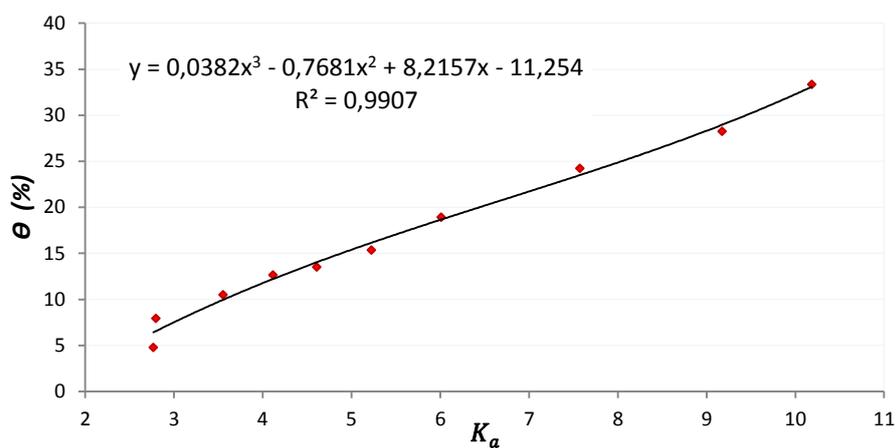


Figura 54. Determinação das constantes de calibração  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  segundo a correlação  $K_a$  versus  $\theta$ .

Tabela 24. Cálculo do erro padrão para a correlação  $K_a$  versus  $\theta$ .

| $K_a$              | $\theta_{ref} (m^3/m^3)$ | $\theta_{ref} (%)$ | $\theta_{TDR} (%)$ | $(\theta_{ref} - \theta_{TDR})^2$ |
|--------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------------|
| 2.769              | 0.048                    | 4.80               | 6.45               | 2.7114                            |
| 2.797              | 0.079                    | 7.93               | 6.58               | 1.8045                            |
| 3.553              | 0.105                    | 10.49              | 9.99               | 0.2494                            |
| 4.116              | 0.127                    | 12.66              | 12.25              | 0.1631                            |
| 4.609              | 0.135                    | 13.54              | 14.08              | 0.2934                            |
| 5.227              | 0.154                    | 15.36              | 16.20              | 0.7072                            |
| 6.013              | 0.189                    | 18.93              | 18.71              | 0.0458                            |
| 7.575              | 0.242                    | 24.24              | 23.49              | 0.5541                            |
| 9.177              | 0.283                    | 28.26              | 28.84              | 0.3327                            |
| 10.186             | 0.334                    | 33.36              | 32.85              | 0.2638                            |
| $\Sigma =$         |                          |                    |                    | 7.1253                            |
| <b>Erro Padrão</b> |                          |                    |                    | <b>0.94</b>                       |

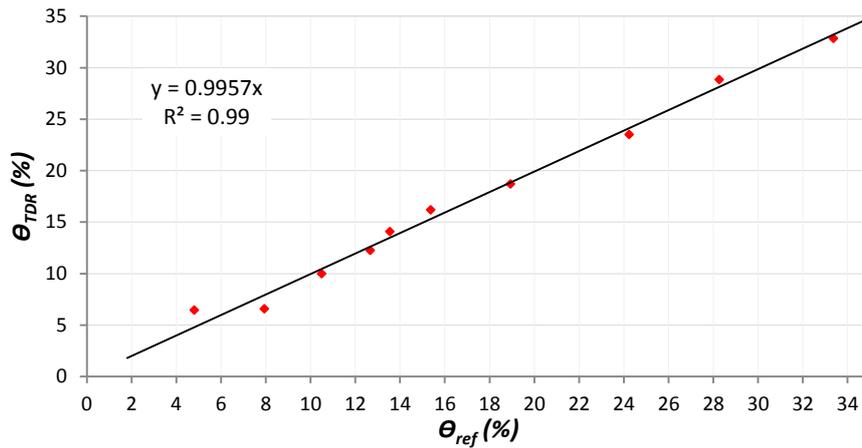


Figura 55. Comparação entre a umidade volumétrica de referência e a umidade volumétrica TDR.

- Correlação  $K_a$  versus  $w$ :

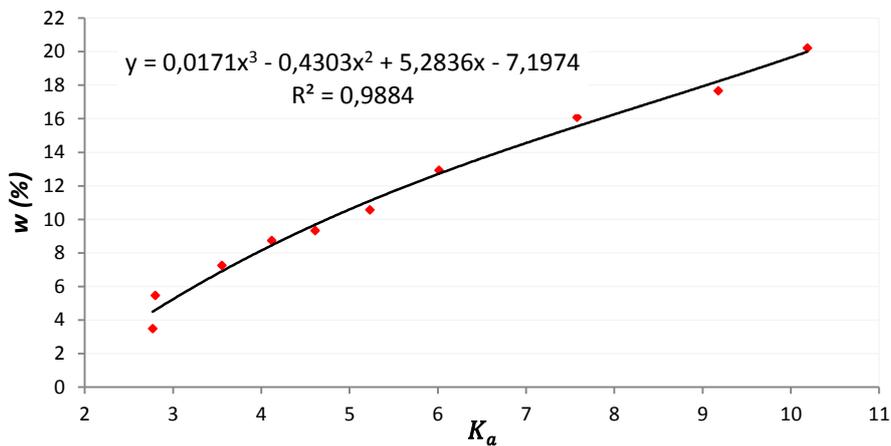


Figura 56. Determinação das constantes de calibração  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  segundo a correlação  $K_a$  versus  $w$ .

Tabela 25. Cálculo do erro padrão para a correlação  $K_a$  versus  $w$ .

| $K_a$              | $w_{ref}$ (%) | $w_{TDR}$ (%) | $(w_{ref} - w_{TDR})^2$ |
|--------------------|---------------|---------------|-------------------------|
| 2.769              | 3.48          | 4.50          | 1.029                   |
| 2.797              | 5.47          | 4.59          | 0.771                   |
| 3.553              | 7.25          | 6.91          | 0.115                   |
| 4.116              | 8.73          | 8.45          | 0.078                   |
| 4.609              | 9.32          | 9.69          | 0.135                   |
| 5.227              | 10.57         | 11.10         | 0.289                   |
| 6.013              | 12.93         | 12.73         | 0.039                   |
| 7.575              | 16.08         | 15.57         | 0.265                   |
| 9.177              | 17.67         | 18.27         | 0.358                   |
| 10.186             | 20.22         | 20.05         | 0.029                   |
| $\Sigma =$         |               |               | 3.108                   |
| <b>Erro Padrão</b> |               |               | <b>0.62</b>             |

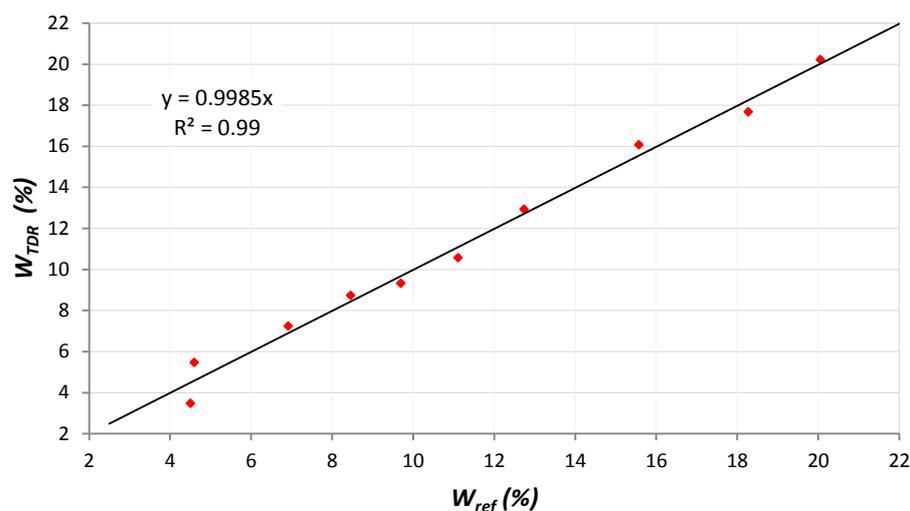


Figura 57. Comparação entre os valores de teor de umidade de referência e teores de umidade TDR.

### 4.2.3 Terceira campanha

A terceira campanha foi executada no campo experimental sem o uso do sistema de cravação multifunção. A perfuração foi realizada com trado manual, atingindo uma profundidade de 0.40 m. A partir dessa profundidade a sonda TDR era acoplada a uma haste metálica e inserida no terreno a golpes utilizando uma marreta. O objetivo desta campanha foi se o sistema multifunção provocava, de alguma forma, interferências na propagação da onda eletromagnética. Como medidas adicionais se utilizou um fio terra e em cada conexão coaxial fez limpeza cuidadosa empregando um produto chamado “limpa contato” (**Fator 1**). Esse produto contribui para eliminar possíveis interferências e ruídos originados por sujeiras nas conexões. A Tabela 26 sintetiza os resultados de cada ensaio utilizando as diferentes equações de calibração.

Tabela 26. Umidades gravimétricas de referência e estimadas pela técnica TDR.

|                 | $(K_a, w)$    |         | $(\sqrt{K_a}, w)$     |         | Yu e Drnevich |                       | Presença de Ruído |     |
|-----------------|---------------|---------|-----------------------|---------|---------------|-----------------------|-------------------|-----|
|                 | $w_{ref}$ (%) | $w$ (%) | $(w_{ref} - w_{TDR})$ | $w$ (%) | $w$ (%)       | $(w_{ref} - w_{TDR})$ |                   |     |
| <b>Ensaio 1</b> | 5.78          | 9.29    | -3.51                 | 9.30    | -3.52         | 9.3                   | -3.51             | Não |
| <b>Ensaio 2</b> | 8.12          | 11.19   | -3.07                 | 11.15   | -3.03         | 11.3                  | -3.15             | Sim |
| <b>Ensaio 3</b> | 7.31          | 8.89    | -1.58                 | 8.91    | -1.60         | 8.9                   | -1.56             | Não |
| <b>Ensaio 4</b> | 5.93          | 7.17    | -1.24                 | 7.22    | -1.29         | 7.1                   | -1.15             | Não |

Observa-se que em três dos ensaios realizados não foram detectadas interferências ou ruídos, no entanto a diferença entre os teores de umidade gravimétricos de referência e determinados pela técnica TDR no primeiro ensaio foi maior a 3%.

Durante a execução de um quinto ensaio, as leituras da forma de onda mostraram uma anomalia. Imediatamente a sonda foi retirada da perfuração para verificar seu estado,

constatando que os eletrodos condutores se separaram do núcleo cilíndrico de poliacetal. Por isso foi necessário que a sonda TDR helicoidal fosse reconstruída, testada e novamente calibrada, a fim de melhorar a qualidade e acurácia nas medidas.

#### 4.2.4 Adequação e avaliação do funcionamento da sonda helicoidal TDR

Após orientação e sugestões de Vaz (2015) acerca do funcionamento e desempenho de uma sonda helicoidal e os problemas que se apresentaram nos ensaios de campo, decidiu-se realizar uma modificação no projeto inicial dessa sonda, deixando um espaçamento de 5 mm entre as partes de aço e os eletrodos condutores de cobre, já que sua proximidade poderia gerar interferências na onda eletromagnética (Informação verbal)<sup>5</sup>. Isto implica que o comprimento dos eletrodos condutores fossem dois centímetros menores, ficando assim com um comprimento de 28 cm. No entanto, foram elaboradas duas sondas, a primeira seguindo o projeto inicial (Sonda 1) descrita por Esquivel e Giacheti (2007) e a segunda deixando o espaçamento de 5 mm descrito acima (Sonda 2). A Figura 58 mostra em detalhe os espaçamentos deixados na Sonda 2.

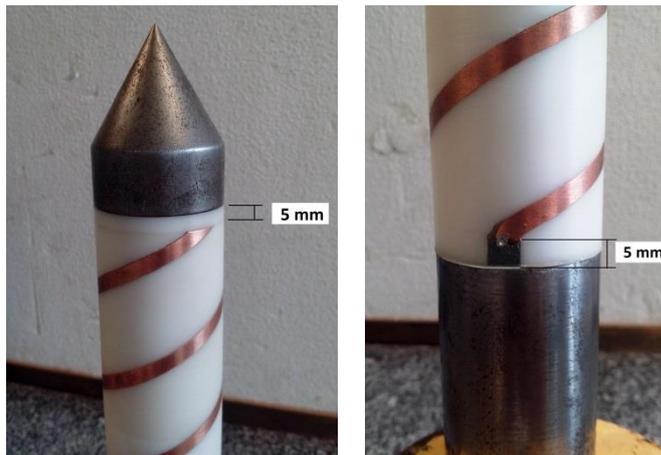


Figura 58. Espaçamento de 5 mm entre os eletrodos de cobre e a cabeça e ponta de aço (Sonda 2).

O processo construtivo da sonda helicoidal traz consigo certas variações na secção transversal dos eletrodos condutores de cobre, já que quando eles são cortados no torno e polidos após a colagem no núcleo de poliacetal nem sempre ficam simétricos ao longo do comprimento. Por isto, uma nova calibração foi necessária.

A construção de uma nova sonda possibilitou realizar testes que permitam avaliar o funcionamento dessas sondas e comparar seu desempenho.

<sup>5</sup> Informação fornecida pelo Dr. Carlos Manoel Pedro Vaz, pesquisador da EMBRAPA de São Carlos, em São Carlos, 2015.

#### 4.2.4.1 Influência dos componentes da sonda helicoidal TDR

Com o propósito de avaliar a influência que cada elemento componente da sonda helicoidal exerce no sinal, durante a montagem da sonda foram feitas registros da onda em água com cada parte constituinte da sonda, de forma sequencial. Começou-se com o núcleo de poliacetal, depois se agregou a núcleo interno de aço, em seguida se colocou a ponta de aço, completando toda a sonda TDR. Finalmente ela foi acoplada a uma haste de 1 m de comprimento, utilizada no ensaio CPT. As formas de onda registradas foram analisadas e comparadas. Para uma melhor comparação das formas de onda, se utilizou sempre o mesmo valor do filtro de ruído e escala ( $NF= 8$  waveforms,  $Scaling= 200\%$ ). A Figura 59 mostra cada um dos elementos utilizados nas determinações das ondas.



a.) Núcleo de poliacetal



b.) Poliacetal + núcleo interno de aço



c.) Poliacetal + núcleo interno de aço + ponta



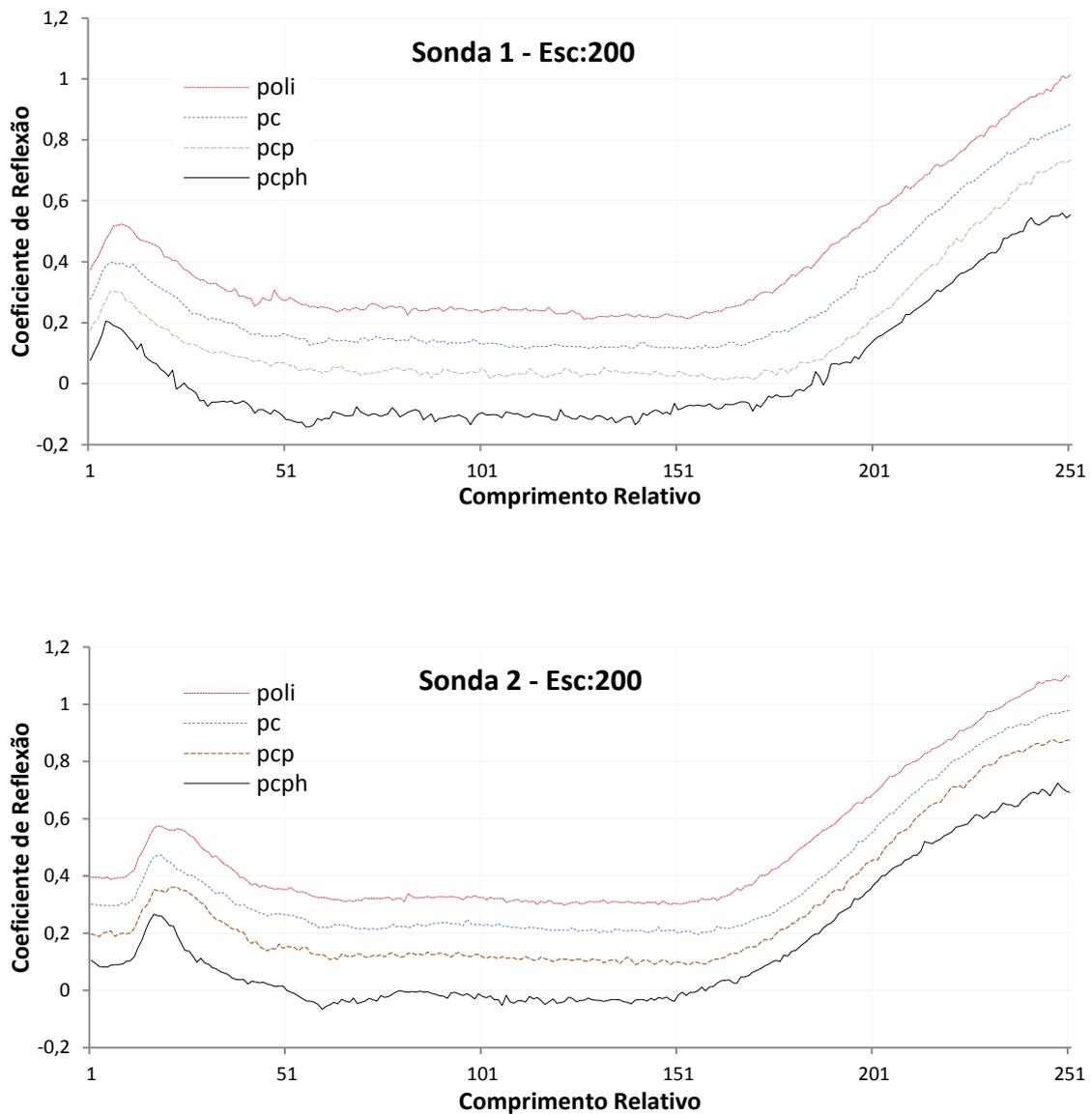
d.) Poliacetal + núcleo interno de aço + ponta + haste

**Figura 59. Elementos da sonda utilizados em cada leitura.**

A Figura 60 mostra as ondas registradas durante a montagem de cada uma das sondas enquanto na Figura 62 tem-se as ondas registradas utilizando a sonda helicoidal completa, e com a sonda helicoidal acoplada a uma haste do ensaio CPT. As abreviações utilizadas para denominar como foi feito o registro de cada onda são:

- poli= Núcleo cilíndrico de poliacetal
- pc= Núcleo de poliacetal + núcleo interno de aço
- pcp= Núcleo de poliacetal + núcleo interno de aço + ponta de aço
- pcph= Núcleo de poliacetal + núcleo interno de aço + ponta de aço + haste CPT

**Figura 60. Ondas registradas com as sondas 1 e 2.**



**Figura 61 Figura 60. Ondas registradas com as sondas 1 e 2.**

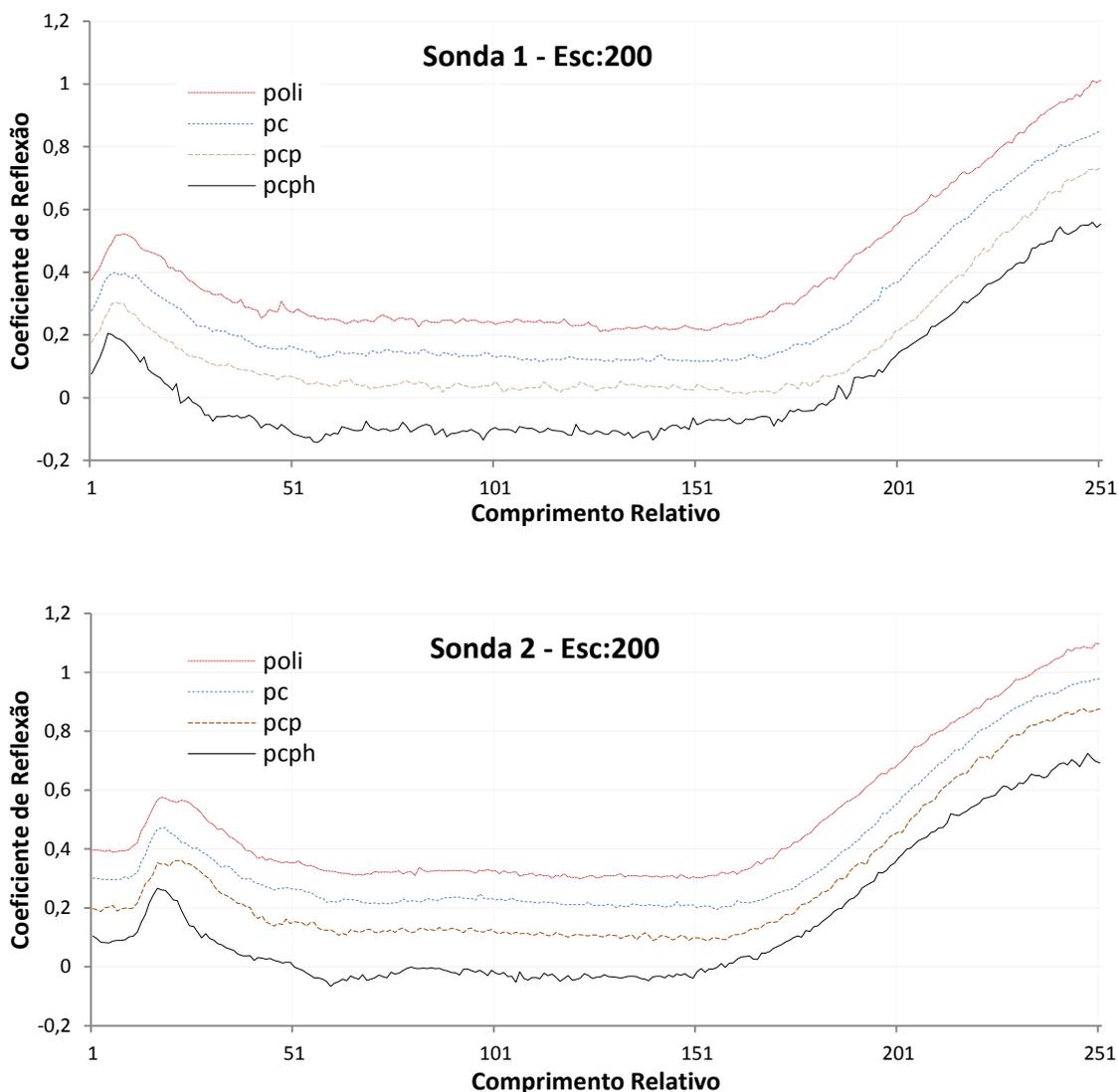


Figura 61. Ondas registradas com as sondas 1 e 2.

A análise dos registros das ondas geradas durante a montagem de cada sonda permitiu fazer duas afirmações. Em primeiro lugar, se observa um aumento gradual de ruído no registro da onda à medida que as partes metálicas são acopladas, aumentando ainda mais quando a haste metálica do ensaio CPT é conectada ao conjunto. Acredita-se que isso se deve ao fato que a haste metálica atua como uma antena, capturando sinais elétricos do meio. Este fato deve ser levado em consideração na análise dos resultados das primeiras campanhas de campo, uma vez que as calibrações anteriores foram realizadas sem a haste de cravação. Por isso, as próximas calibrações foram realizadas utilizando a sonda helicoidal acoplada à uma haste CPT.

Em segundo lugar observa-se uma considerável diminuição no ruído das ondas geradas usando a sonda 2. Porém pode-se concluir que o espaçamento deixado entre as partes metálicas e os eletrodos condutores reduziu as perturbações na onda

eletromagnética. Por esse motivo, esta pesquisa teve continuidade empregando apenas a sonda 2.

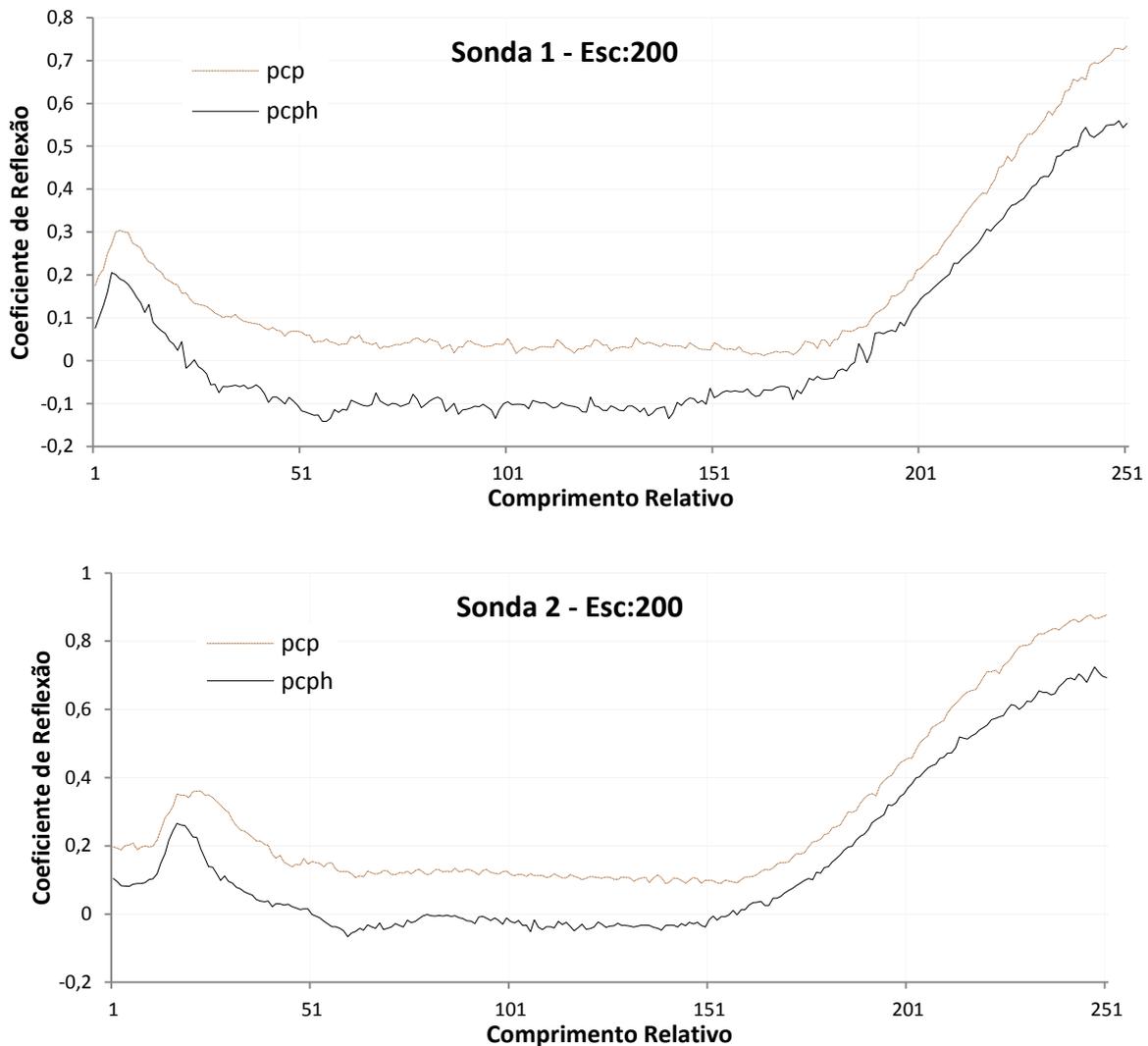
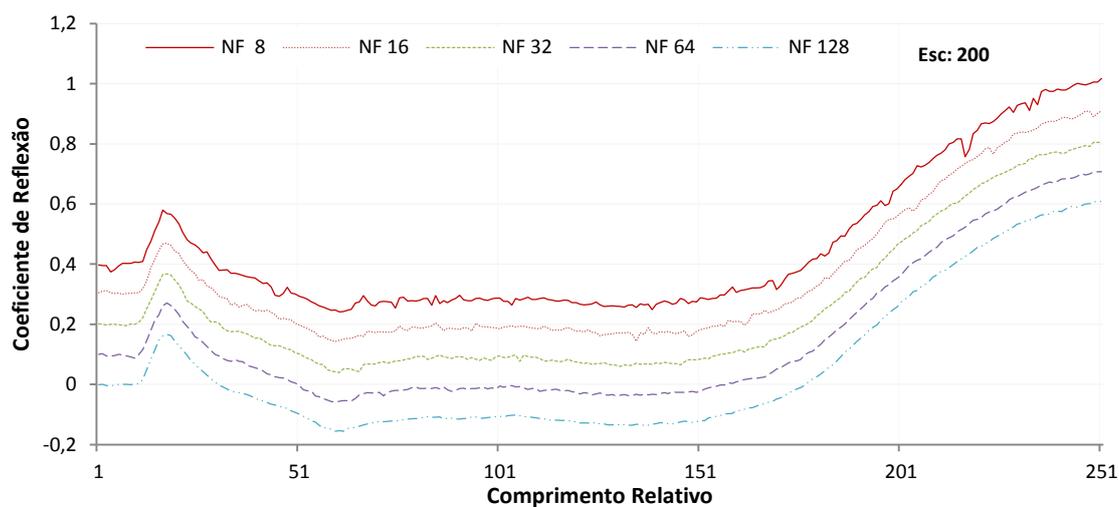


Figura 62. Ondas registradas utilizando a sonda helicoidal e a sonda helicoidal acoplada a uma haste CPT (sondas 1 e 2).

#### 4.2.4.2 Influência do uso do filtro de ruído do software WinTDR

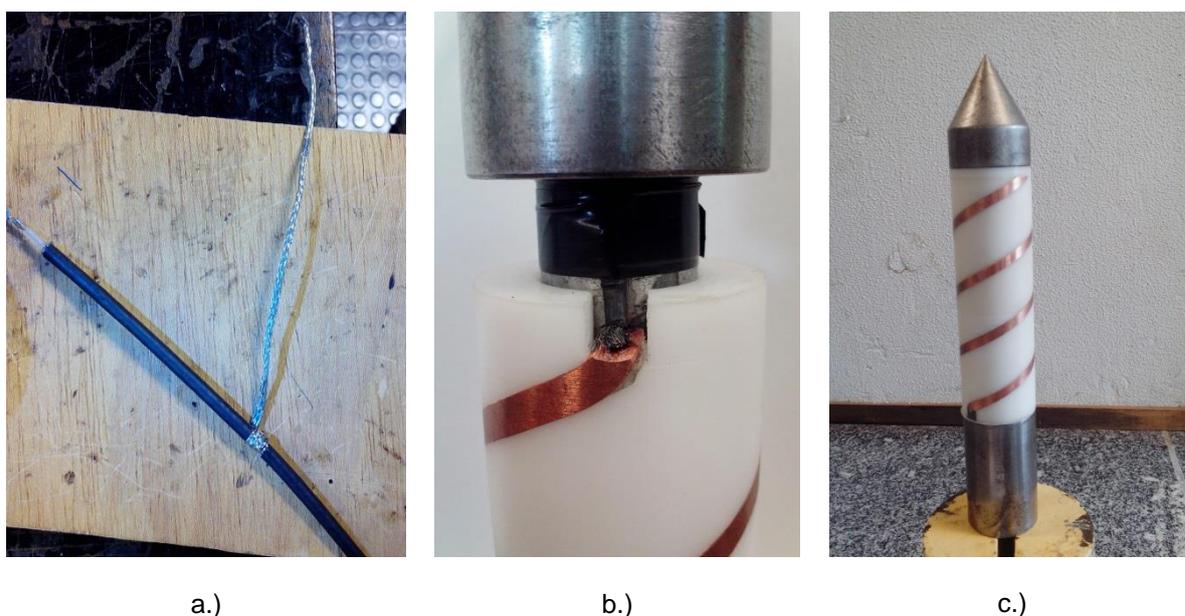
Para determinar a influência que exercem os diferentes filtros de ruído disponíveis no software WinTDR na qualidade da onda registrada, foram realizadas leituras em água com a sonda 2 acoplada à haste metálica CPT. Os filtros de ruído ( $N_f$ ) 8, 16, 32, 64, 128 e uma escala de 200% foram utilizados nesses testes.

Na Figura 63 se observa uma diminuição considerável de ruído utilizando os maiores filtros. Esta ferramenta é muito útil na realização dos ensaios de campo.



**Figura 63. Ondas registradas em água com os diferentes filtros de ruído do software WinTDR.**

Durante a análise de resultados dos testes de avaliação do desempenho da sonda, foram feitas duas sugestões pelo pessoal de instrumentação da EMBRAPA São Carlos. A primeira sugestão foi eliminar o conector coaxial que fica mais próximo à sonda, pois ele pode atrair ruídos do meio e gerar uma atenuação na forma de onda (Figura 49). Desta forma, os eletrodos condutores da sonda foram soldados diretamente ao fio condutor e à malha de blindagem de um cabo coaxial de 12 m de comprimento. Assim, esse cabo passará a ser conectado diretamente ao Tektronix.



**Figura 64. Solda do cabo coaxial com os eletrodos condutores a.) União entre o cabo coaxial e a malha de blindagem b.) Local da solda com os eletrodos condutores de cobre c.) Sonda 3 concluída.**

A segunda sugestão foi manter o fio condutor do cabo coaxial o mais protegido possível pela blindagem, até pouco antes da solda aos eletrodos condutores. Para isto o fio

condutor do cabo coaxial fica descoberto apenas o comprimento necessário para realizar essa solda. Uma malha de blindagem foi conectada ao cabo coaxial alguns centímetros antes dessa solda. Essa malha também foi recoberta com um material termo contráctil. Uma terceira sonda (Sonda 3) foi construída incorporando essas duas novas recomendações. A Figura 64 mostra a união da malha de blindagem com o cabo coaxial, o lugar da solda com os eletrodos condutores de cobre e a sonda completamente montada.

Na Figura 65 é possível comparar os registros das ondas em água utilizando unicamente a sonda 3 e o conjunto sonda/haste metálica. O filtro de ruído usado foi de 8 *waveforms*. A Figura 66 apresenta os registros das ondas obtidas com o conjunto sonda/haste metálica em água, utilizando diferentes filtros de ruído.

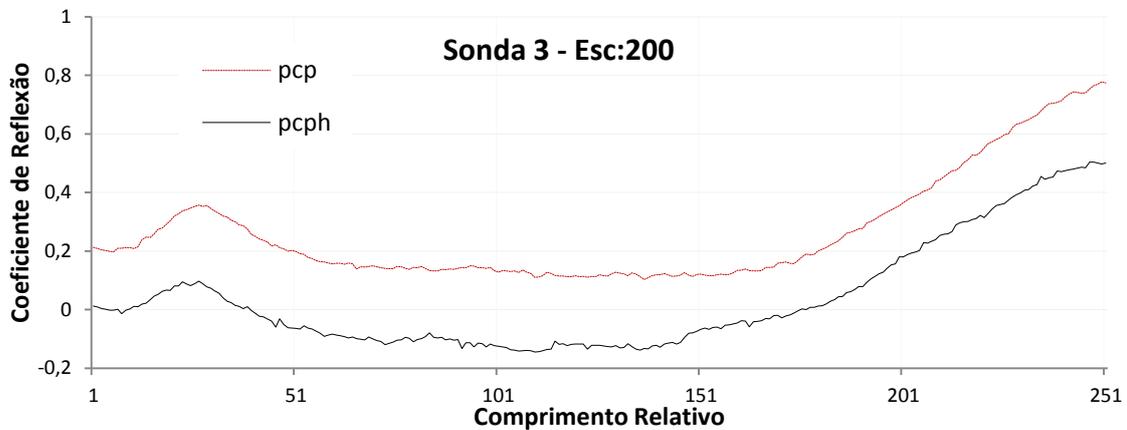


Figura 65. Ondas registradas com a sonda e com o conjunto sonda/haste.

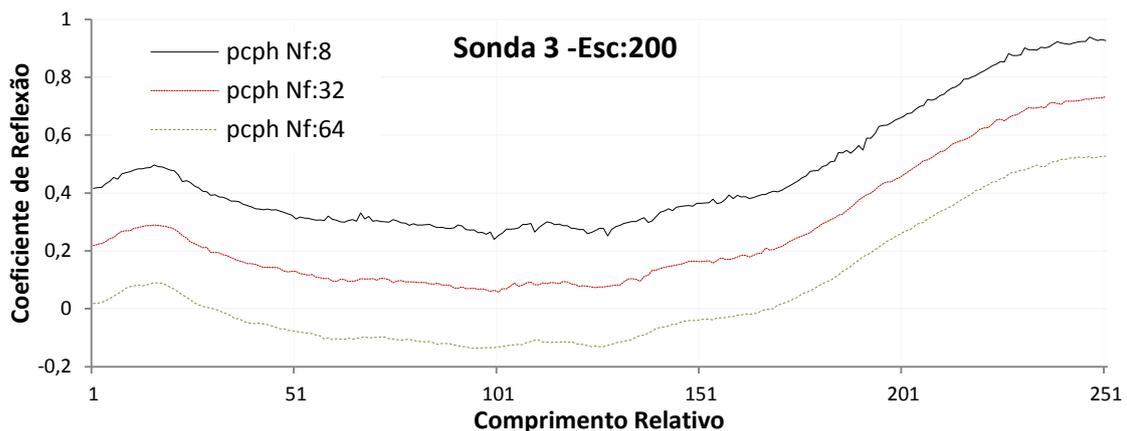


Figura 66. Onda registradas com o conjunto sonda/haste utilizando diferentes filtros de ruído.

A sonda 3 foi empregada na determinação do teor de umidade na quarta e quinta campanhas de ensaios de campo apresentando uma melhoria significativa na qualidade dos registros das ondas. A Figura 67 mostra a tela do computador com emprego do software winTDR para interpretação de um registro típico da onda do ensaio 2 da quinta campanha.

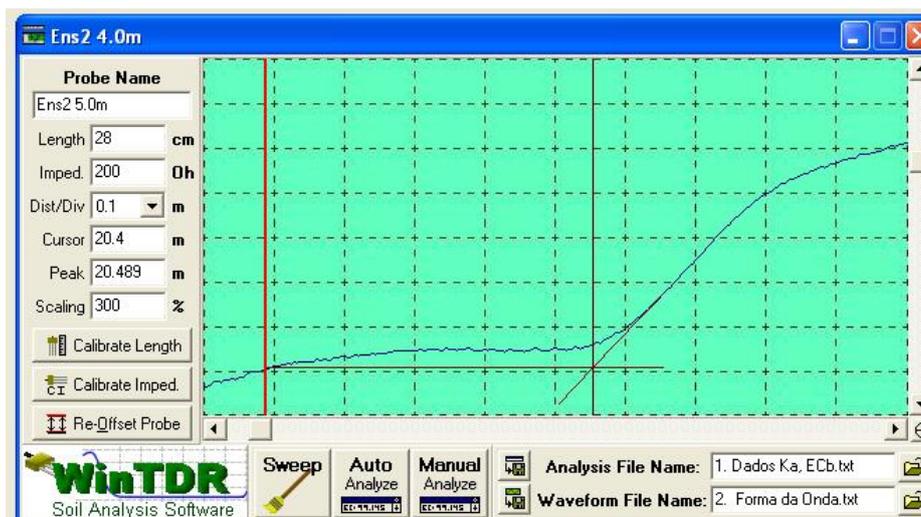


Figura 67. Tela com a interpretação do registro de onda típico no programa winTDR da quinta campanha

#### 4.2.4.3 Variabilidade da constante dielétrica

As modificações realizadas na sonda e a interpretação dos resultados dos ensaios anteriores permitiram melhorar a qualidade nas determinações da constante dielétrica e conhecer um pouco mais os fatores que influenciam no funcionamento do equipamento.

No final dessa avaliação e dos melhoramentos no equipamento estavam disponíveis duas sondas helicoidais para trabalhar em campo, a sonda 1 e a sonda 3, uma vez que as duas últimas modificações foram realizadas na sonda 2.

A variabilidade nas determinações da constante dielétrica usando as diferentes sondas pode servir como um indicador do seu desempenho. Para isso, utilizou-se a água como meio para fazer essa avaliação devido a sua homogeneidade. Também foram estabelecidas as condições de análise da onda, definindo a posição do pico (*peak*), o filtro de ruído (*Noise filter*), o método de análise pelo tangente horizontal (*Flat Tangent*), a tolerância zero na localização do pico (*Peak Tolerance*) e o uso do mesmo cabo coaxial, (RG-58 de 50 ohms) em todos os testes. Na Tabela 27 se encontram os valores meios, máximo e mínimo da constante dielétrica determinadas consecutivamente em água. Comparando o desvio padrão dessas medidas pode-se observar a variabilidade na determinação da constante dielétrica para um mesmo meio e sonda. Dessa forma, a sonda 1 foi aquela que apresenta os maiores desvios padrões, enquanto as sondas 2 e 3 os menores valores, portanto com uma menor dispersão com relação à meia. Também se observa que quando se utiliza o filtro de ruído de 64 formas de onda, as sondas 2 e 3 apresentam desvios padrões muito semelhantes.

Tabela 27. Variabilidade da constante dielétrica para diferentes sondas.

|                |       | $K_a$ | $K_{a_{\min}}$ | $K_{a_{\max}}$ | Desvio Padrão | Observação |
|----------------|-------|-------|----------------|----------------|---------------|------------|
| <b>Sonda 3</b> | Nf 8  | 28.76 | 26.81          | 30.46          | 1.50          | Menor      |
|                | Nf 32 | 27.16 | 26.30          | 27.90          | 0.81          | -          |
|                | Nf 64 | 26.82 | 26.55          | 27.13          | 0.29          | -          |
| <b>Sonda 2</b> | Nf 8  | 29.20 | 27.25          | 30.92          | 1.55          | -          |
|                | Nf 32 | 28.64 | 28.43          | 28.88          | 0.23          | Menor      |
|                | Nf 64 | 27.96 | 27.64          | 28.17          | 0.28          | Menor      |
| <b>Sonda 1</b> | Nf 8  | 33.01 | 30.89          | 34.31          | 1.59          | Maior      |
|                | Nf 32 | 34.48 | 33.18          | 36.00          | 1.42          | Maior      |
|                | Nf 64 | 33.45 | 33.03          | 34.21          | 0.66          | Maior      |

#### 4.2.5 Calibração das sondas 1 e 3

Para avaliar se as mudanças efetuadas na sonda contribuíram para melhorar seu desempenho, uma nova calibração foi realizada em laboratório nas Sondas 1 e 3, com elas acopladas à haste de cravação empregada em ensaios CPT (Figura 68).



Figura 68. Haste do ensaio CPT utilizada na calibração.

As Tabela 28 e Tabela 29 apresentam os resultados da calibração em laboratório das sondas 2 e 3.

Tabela 28. Resultados da calibração da Sonda 1.

| Sonda 1       |       |               |                               |  |      |       |        |
|---------------|-------|---------------|-------------------------------|--|------|-------|--------|
| $w_{ref}$ (%) | $K_a$ | $Ec_b$<br>S/m | $\rho_d$<br>g/cm <sup>3</sup> | $\theta$<br>m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> | e    | n (%) | Sr (%) |
| <b>3.98</b>   | 2.59  | 0.0154        | 1.443                         | 0.057                                      | 0.83 | 45    | 13     |
| <b>5.83</b>   | 2.77  | 0.0165        | 1.455                         | 0.085                                      | 0.82 | 45    | 19     |
| <b>8.17</b>   | 3.54  | 0.0176        | 1.447                         | 0.118                                      | 0.83 | 45    | 26     |
| <b>9.86</b>   | 4.33  | 0.0211        | 1.457                         | 0.144                                      | 0.82 | 45    | 32     |
| <b>12.21</b>  | 4.51  | 0.0225        | 1.444                         | 0.176                                      | 0.83 | 45    | 39     |
| <b>13.91</b>  | 4.93  | 0.0227        | 1.464                         | 0.204                                      | 0.81 | 45    | 46     |
| <b>15.51</b>  | 7.04  | 0.0274        | 1.500                         | 0.233                                      | 0.77 | 43    | 54     |
| <b>17.73</b>  | 9.24  | 0.0422        | 1.587                         | 0.281                                      | 0.67 | 40    | 70     |
| <b>19.22</b>  | 9.99  | 0.0400        | 1.641                         | 0.315                                      | 0.61 | 38    | 83     |

Tabela 29. Resultados da calibração da Sonda 3.

| Sonda 3       |       |               |                               |  |      |       |        |
|---------------|-------|---------------|-------------------------------|--|------|-------|--------|
| $w_{ref}$ (%) | $K_a$ | $Ec_b$<br>S/m | $\rho_d$<br>g/cm <sup>3</sup> | $\theta$<br>m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> | e    | n (%) | Sr (%) |
| 3.98          | 1.99  | 0.0164        | 1.443                         | 0.057                                      | 0.83 | 45    | 13     |
| 5.83          | 2.30  | 0.0196        | 1.455                         | 0.085                                      | 0.82 | 45    | 19     |
| 8.39          | 2.68  | 0.0205        | 1.451                         | 0.122                                      | 0.82 | 45    | 27     |
| 10.04         | 3.26  | 0.0220        | 1.463                         | 0.147                                      | 0.81 | 45    | 33     |
| 12.26         | 3.66  | 0.0200        | 1.452                         | 0.178                                      | 0.82 | 45    | 39     |
| 14.01         | 3.97  | 0.0208        | 1.466                         | 0.205                                      | 0.81 | 45    | 46     |
| 15.69         | 6.12  | 0.0283        | 1.541                         | 0.242                                      | 0.72 | 42    | 58     |
| 17.82         | 8.02  | 0.0422        | 1.647                         | 0.294                                      | 0.61 | 38    | 78     |
| 19.20         | 8.40  | 0.0404        | 1.614                         | 0.310                                      | 0.64 | 39    | 79     |

#### 4.2.5.1 Calibração pelo método proposto por Yu e Drnevich (2004)

As Figura 69, Figura 70 e Figura 71 mostram os gráficos utilizados para a determinação das constantes de calibração  $a, b, c, d, f$  e  $g$  pelo o método de Yu e Drnevich (2004) para as sondas 1 e 3.

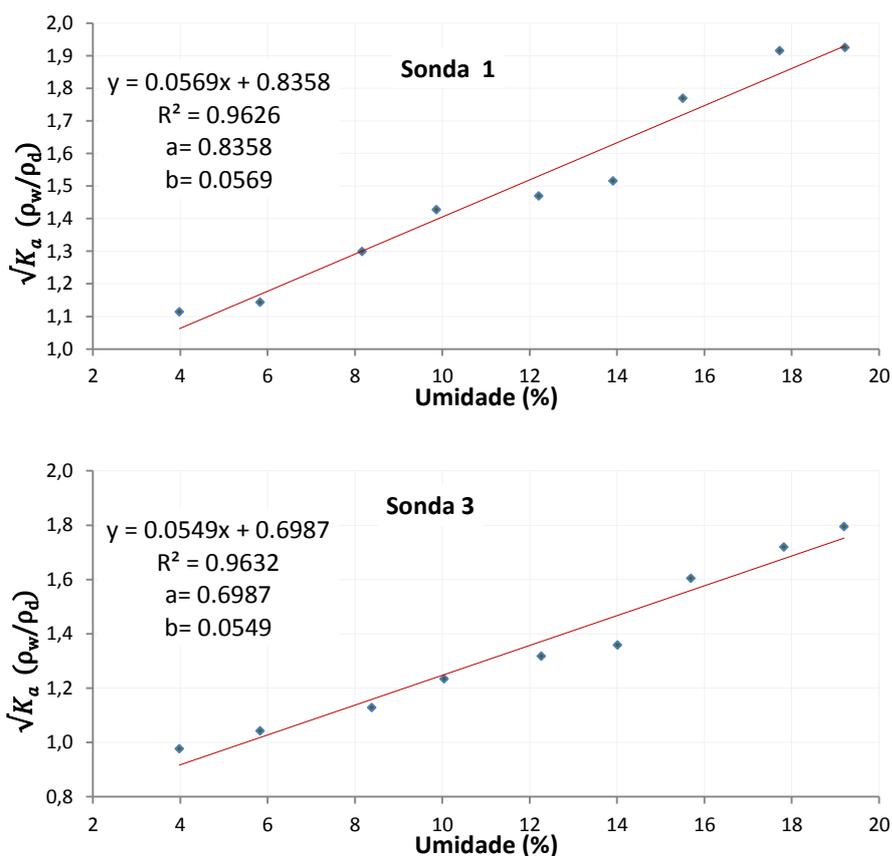


Figura 69. Determinação das constantes de calibração  $a$  e  $b$ , sondas 1 e 3.

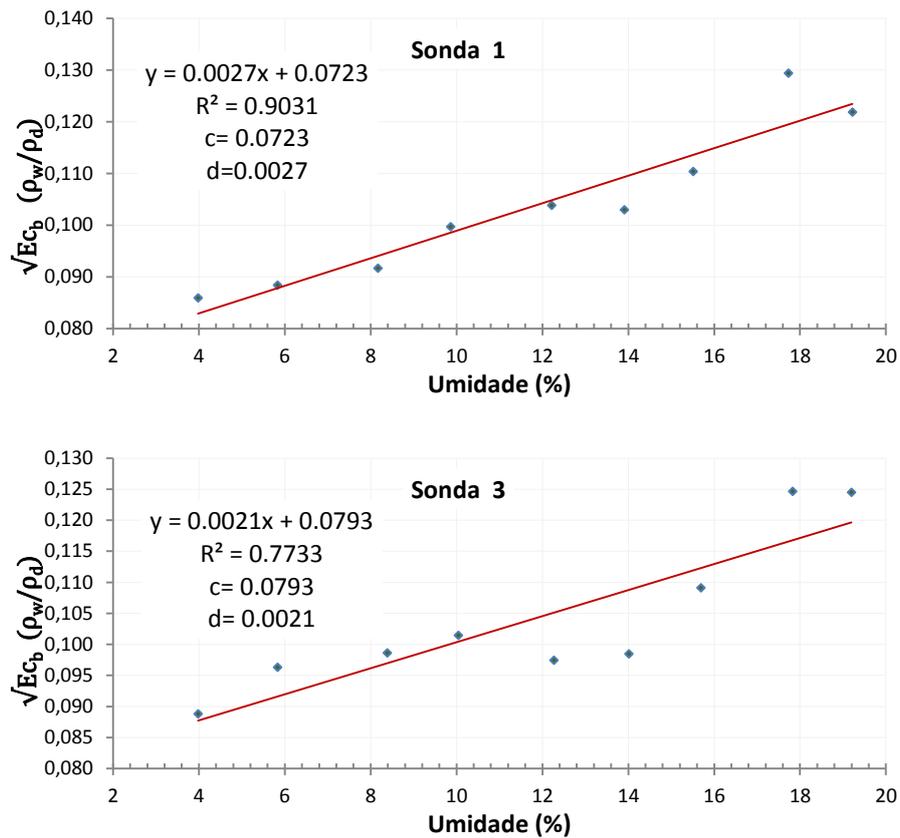


Figura 70. Determinação das constantes de calibração  $c$  e  $d$ , sondas 1 e 3.

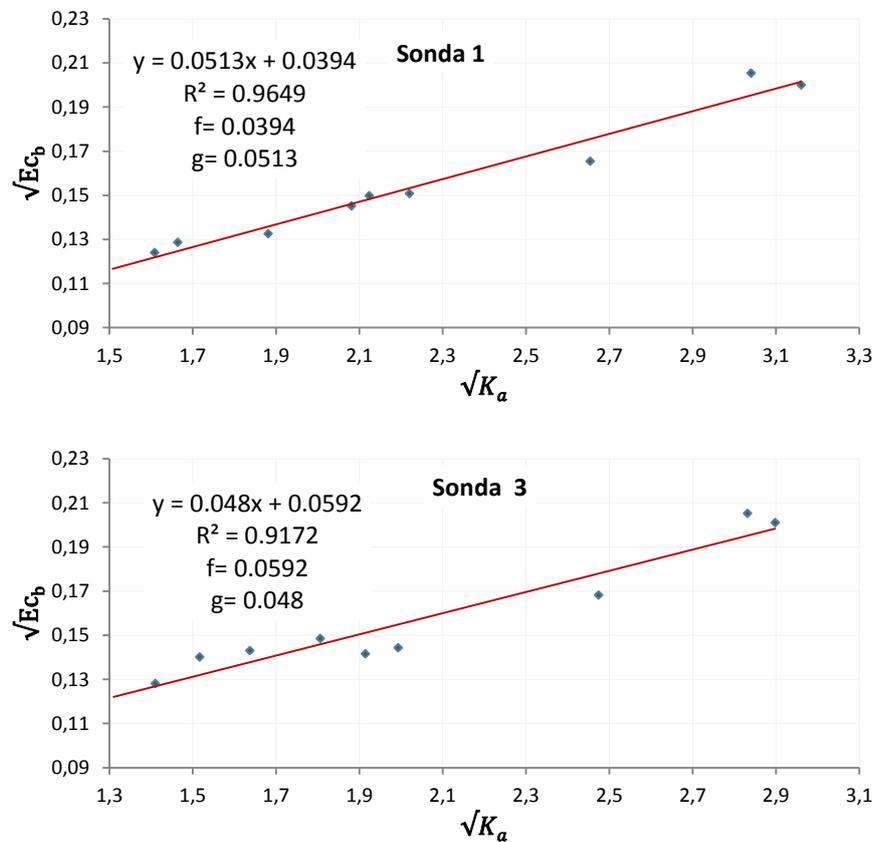


Figura 71. Determinação das constantes de calibração  $f$  e  $g$ , sondas 1 e 3.

As Tabela 30 e Tabela 31 apresentam os valores de teor de umidade gravimétrico e massa específica seca, estimados usando a técnica TDR e os valores de referência determinados durante a calibração.

**Tabela 30. Valores de teor de umidade gravimétrico e massa específica seca de referência e estimados com a sonda 1.**

| <b>Sonda 1</b>     |                  |                                |                                |
|--------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| $w_{ref}$<br>(%)   | $w_{TDR}$<br>(%) | $\rho_{d,ref}$<br>( $g/cm^3$ ) | $\rho_{d,TDR}$<br>( $g/cm^3$ ) |
| 3.98               | 5.54             | 1.443                          | 1.397                          |
| 5.83               | 6.14             | 1.455                          | 1.403                          |
| 8.17               | 8.44             | 1.447                          | 1.429                          |
| 9.86               | 10.48            | 1.457                          | 1.452                          |
| 12.21              | 10.91            | 1.444                          | 1.457                          |
| 13.91              | 11.87            | 1.464                          | 1.469                          |
| 15.51              | 16.00            | 1.500                          | 1.520                          |
| 17.73              | 19.44            | 1.587                          | 1.566                          |
| 19.22              | 20.47            | 1.641                          | 1.580                          |
| <b>Erro Padrão</b> | <b>1.39</b>      | <b>Erro Padrão</b>             | <b>0.034</b>                   |

**Tabela 31. Valores de teor de umidade gravimétrico e massa específica seca de referência e estimados com a sonda 3.**

| <b>Sonda 3</b>     |                  |                                |                                |
|--------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| $w_{ref}$<br>(%)   | $w_{TDR}$<br>(%) | $\rho_{d,ref}$<br>( $g/cm^3$ ) | $\rho_{d,TDR}$<br>( $g/cm^3$ ) |
| 3.98               | 5.67             | 1.443                          | 1.395                          |
| 5.83               | 6.79             | 1.455                          | 1.415                          |
| 8.39               | 8.01             | 1.451                          | 1.438                          |
| 10.04              | 9.66             | 1.463                          | 1.469                          |
| 12.26              | 10.68            | 1.452                          | 1.489                          |
| 14.01              | 11.40            | 1.466                          | 1.504                          |
| 15.69              | 15.54            | 1.541                          | 1.594                          |
| 17.82              | 18.33            | 1.647                          | 1.661                          |
| 19.20              | 18.82            | 1.614                          | 1.673                          |
| <b>Erro Padrão</b> | <b>1.40</b>      | <b>Erro Padrão</b>             | <b>0.040</b>                   |

A Figura 72 apresenta uma comparação entre os valores dos teores de umidade gravimétricos estimados e de referência. Os valores dos coeficientes de determinação para essas calibrações foram de 0.95 e 0.94 respectivamente para as sondas 1 e 3. A Tabela 32 apresenta as constantes obtidas durante as calibrações em laboratório pelo método de Yu e Drnevich (2004) para as sondas 1 e 3.

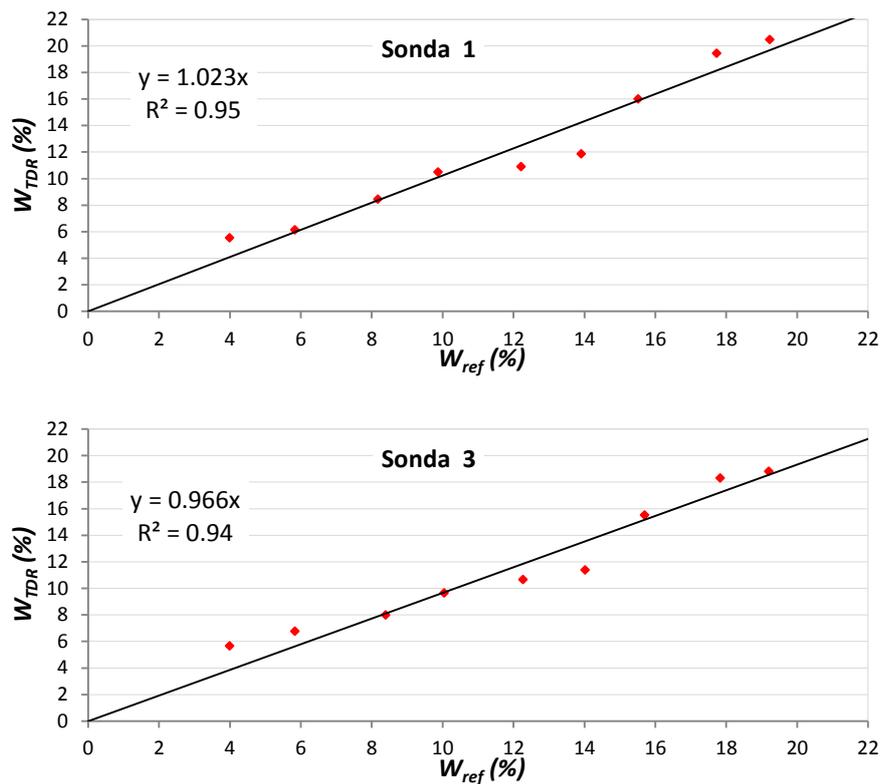


Figura 72. Comparação entre valores de teor de umidade de referência e estimados usando a técnica TDR, para as sondas 1 e 3.

Tabela 32. Constantes de calibração determinadas pelo método de Yu e Drnevich (2004) para as sondas 1 e 3.

| Constante de calibração | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>f</i> | <i>g</i> |
|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Sonda 1                 | 0.8358   | 0.0569   | 0.0723   | 0.0027   | 0.0394   | 0.0513   |
| Sonda 3                 | 0.69376  | 0.0555   | 0.0790   | 0.0021   | 0.0592   | 0.048    |

#### 4.2.5.2 Correlações Alternativas

- Correlação  $\sqrt{K_a}$  versus  $w$ :

A Figura 73 mostra as curvas de calibração para a correlação entre  $\sqrt{K_a}$  e o teor de umidade gravimétrico utilizando as sondas 1 e 3.

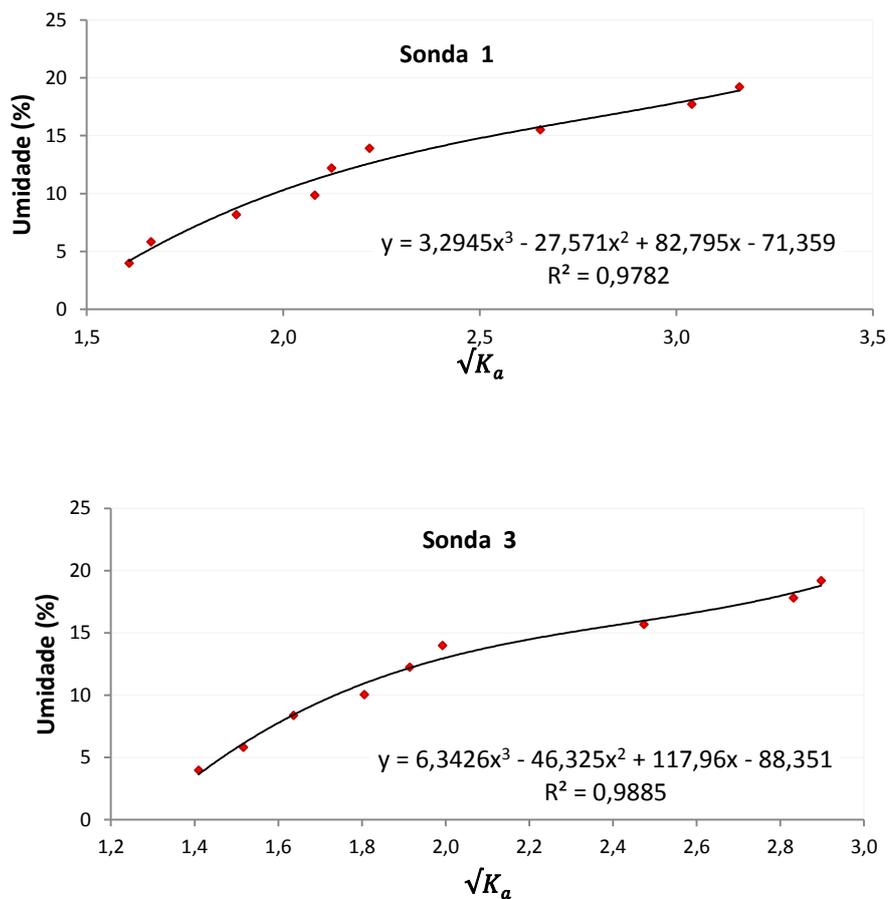


Figura 73. Determinação das constantes de calibração  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  para as sondas 1 e 3, pela correlação  $\sqrt{K_a}$  versus  $w$ .

As Tabela 33 e Tabela 34 mostram os valores dos teores de umidade de referência, os determinados pela técnica TDR utilizando a equação de calibração entre  $\sqrt{K_a}$  versus  $w$  e o erro padrão da estimativa para as sondas 1 e 3. A representação gráfica entre os valores de teor de umidade de referência e determinados pela técnica TDR se encontram na Figura 74.

Tabela 33. Erro padrão e estimativa do teor de umidade pela correlação  $\sqrt{K_a}$  versus  $w$ , sonda 1.

| Sonda 1            |               |           |                     |                         |
|--------------------|---------------|-----------|---------------------|-------------------------|
| $\sqrt{K_a}$       | $w_{ref}$ (%) | $w_{TDR}$ | $w_{ref} - w_{TDR}$ | $(w_{ref} - w_{TDR})^2$ |
| 1.608              | 3.98          | 4.18      | 0.20                | 0.0                     |
| 1.663              | 5.83          | 5.24      | -0.59               | 0.4                     |
| 1.880              | 8.17          | 8.75      | 0.58                | 0.3                     |
| 2.080              | 9.86          | 11.22     | 1.36                | 1.8                     |
| 2.123              | 12.21         | 11.67     | -0.54               | 0.3                     |
| 2.219              | 13.91         | 12.60     | -1.30               | 1.7                     |
| 2.654              | 15.51         | 15.76     | 0.25                | 0.1                     |
| 3.040              | 17.73         | 18.09     | 0.37                | 0.1                     |
| 3.160              | 19.22         | 18.92     | -0.30               | 0.1                     |
| $\Sigma=$          |               |           |                     | 4.8                     |
| <b>Erro Padrão</b> |               |           |                     | <b>0.83</b>             |

Tabela 34. Erro padrão e estimativa do teor de umidade pela correlação  $\sqrt{K_a}$  versus  $w$ , sonda 3.

| Sonda 3            |               |           |                     |                         |
|--------------------|---------------|-----------|---------------------|-------------------------|
| $\sqrt{K_a}$       | $w_{ref}$ (%) | $w_{TDR}$ | $w_{ref} - w_{TDR}$ | $(w_{ref} - w_{TDR})^2$ |
| 1.410              | 3.98          | 3.64      | -0.34               | 0.1                     |
| 1.516              | 5.83          | 6.11      | 0.28                | 0.1                     |
| 1.637              | 8.39          | 8.43      | 0.04                | 0.0                     |
| 1.806              | 10.04         | 10.95     | 0.91                | 0.8                     |
| 1.914              | 12.26         | 12.19     | -0.07               | 0.0                     |
| 1.992              | 14.01         | 12.94     | -1.07               | 1.1                     |
| 2.474              | 15.69         | 15.98     | 0.29                | 0.1                     |
| 2.831              | 17.82         | 18.23     | 0.41                | 0.2                     |
| 2.898              | 19.20         | 18.81     | -0.39               | 0.2                     |
| $\Sigma =$         |               |           |                     | 2.6                     |
| <b>Erro Padrão</b> |               |           |                     | <b>0.61</b>             |

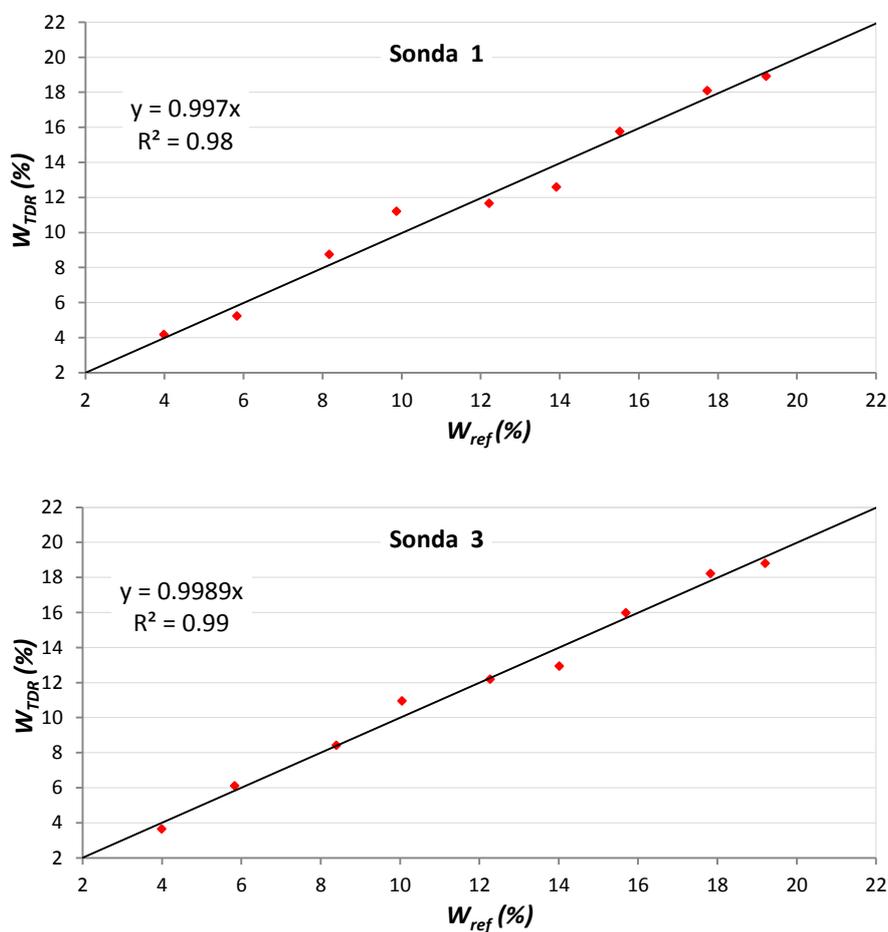


Figura 74. Comparação entre valores de teor de umidade gravimétrico de referência e determinados com o TDR, sondas 1 e 3.

- **Correlação  $K_a$  versus  $\theta$ :**

A Figura 75 apresenta as curvas de calibração para as sondas 1 e 3, obtidas mediante a correlação  $K_a$  versus  $\theta$ . As Tabela 35 e Tabela 36 mostram os valores de teores

de umidade volumétricos de referência, e determinados usando a técnica TDR e os respectivos erros-padrão da estimativa. A Figura 76 mostra a relação entre os teores de umidade volumétricos estimados com os de referência.

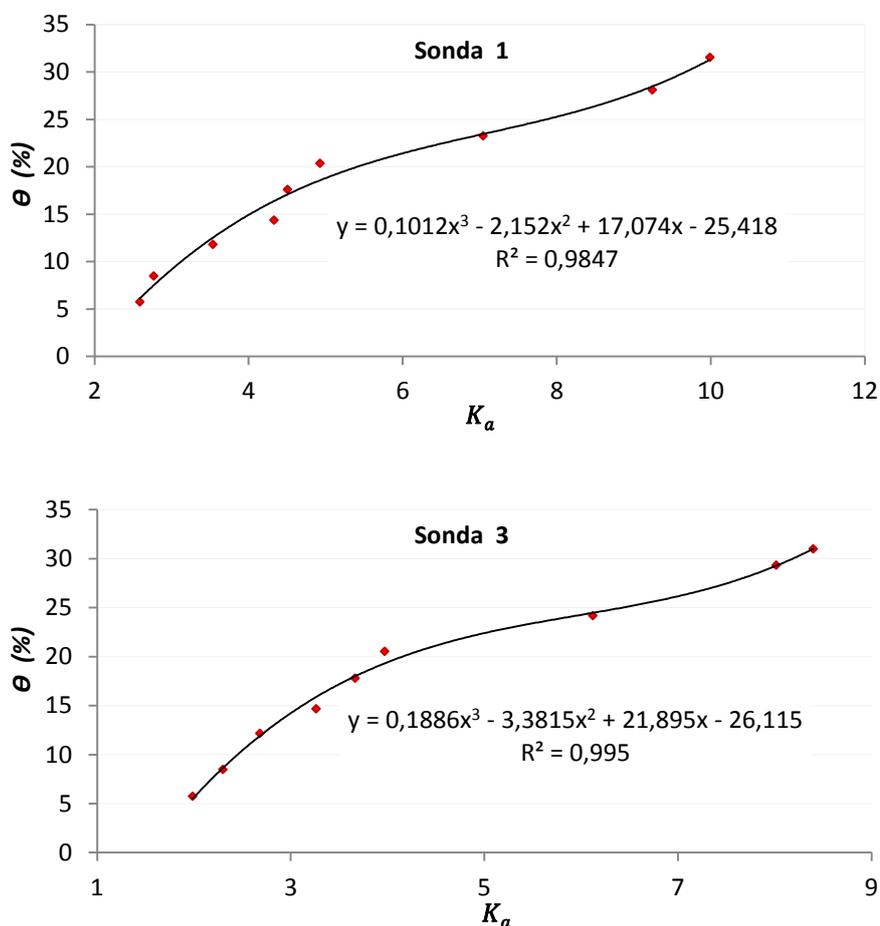


Figura 75. Determinação das constantes de calibração  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  para as sondas 1 e 3, pela correlação  $K_a$  versus  $\theta$ .

Tabela 35. Erro padrão e estimativa do teor de umidade pela correlação  $K_a$  vs  $\theta$ , sonda 1.

| Sonda 1            |                          |                    |                    |  |                                   |
|--------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|--|-----------------------------------|
| $K_a$              | $\theta_{ref} (m^3/m^3)$ | $\theta_{ref} (%)$ | $\theta_{TDR} (%)$ |  | $(\theta_{ref} - \theta_{TDR})^2$ |
| 2.585              | 0.057                    | 5.75               | 6.09               |  | 0.1161                            |
| 2.766              | 0.085                    | 8.48               | 7.49               |  | 0.9858                            |
| 3.536              | 0.118                    | 11.82              | 12.52              |  | 0.4969                            |
| 4.327              | 0.144                    | 14.37              | 16.37              |  | 4.0020                            |
| 4.506              | 0.176                    | 17.63              | 17.08              |  | 0.2995                            |
| 4.925              | 0.204                    | 20.36              | 18.56              |  | 3.2301                            |
| 7.043              | 0.233                    | 23.26              | 23.44              |  | 0.0337                            |
| 9.240              | 0.281                    | 28.13              | 28.45              |  | 0.1012                            |
| 9.988              | 0.315                    | 31.54              | 31.27              |  | 0.0753                            |
| $\Sigma =$         |                          |                    |                    |  | 9.3407                            |
| <b>Erro Padrão</b> |                          |                    |                    |  | <b>1.16</b>                       |

Tabela 36. Erro padrão e estimativa do teor de umidade pela correlação  $K_a$  versus  $\theta$ , sonda 3.

| Sonda 3            |                          |                    |                    |                                   |
|--------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------------|
| $K_a$              | $\theta_{ref} (m^3/m^3)$ | $\theta_{ref} (%)$ | $\theta_{TDR} (%)$ | $(\theta_{ref} - \theta_{TDR})^2$ |
| 1.987              | 0.057                    | 5.75               | 5.52               | 0.0512                            |
| 2.299              | 0.085                    | 8.48               | 8.64               | 0.0254                            |
| 2.679              | 0.122                    | 12.17              | 11.90              | 0.0725                            |
| 3.261              | 0.147                    | 14.69              | 15.87              | 1.3742                            |
| 3.664              | 0.178                    | 17.81              | 17.99              | 0.0305                            |
| 3.969              | 0.205                    | 20.54              | 19.31              | 1.5075                            |
| 6.119              | 0.242                    | 24.19              | 24.46              | 0.0735                            |
| 8.016              | 0.294                    | 29.35              | 29.26              | 0.0091                            |
| 8.397              | 0.310                    | 30.99              | 30.97              | 0.0002                            |
| $\Sigma =$         |                          |                    |                    | 3.1442                            |
| <b>Erro Padrão</b> |                          |                    |                    | <b>0.67</b>                       |

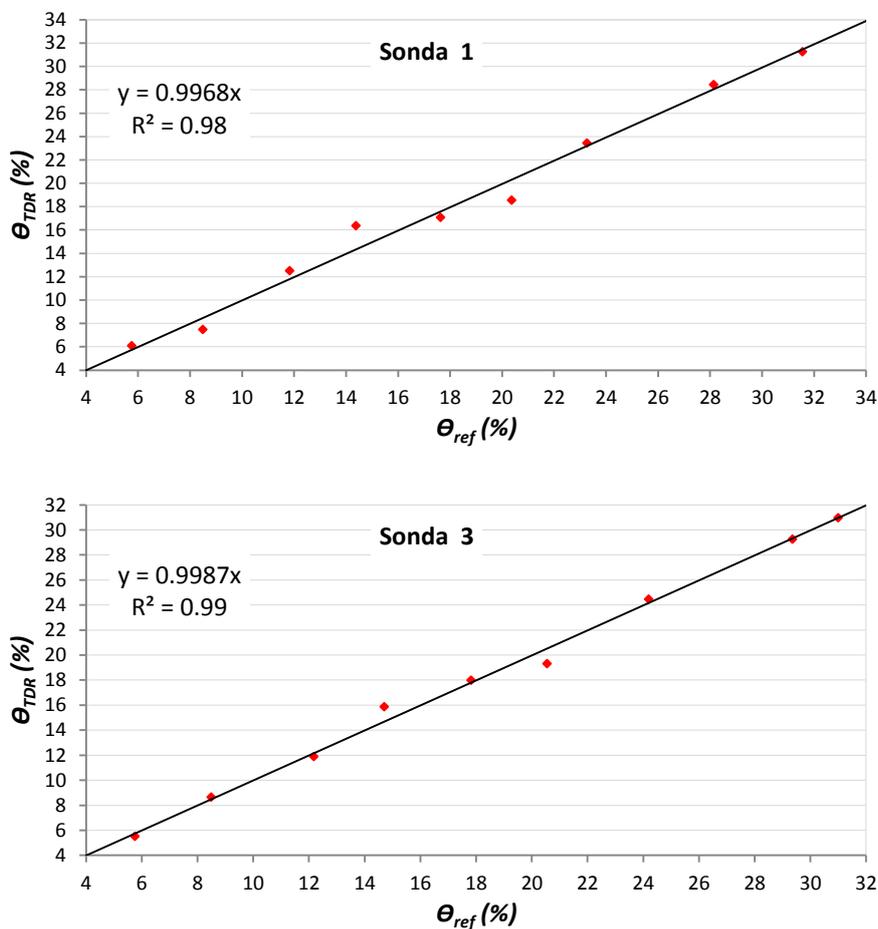


Figura 76. Comparação entre os valores de teores de umidade volumétricos de referência e determinados com o TDR, sondas 1 e 3.

- **Correlação  $K_a$  versus  $w$ :**

A Figura 77 apresenta as curvas de calibração para as sondas 1 e 3, obtidas mediante a correlação  $K_a$  versus  $w$ . As Tabela 37 e Tabela 38 mostram os valores de teores de umidade gravimétricos de referência, determinados pela técnica TDR e o cálculo

do erro padrão da estimativa. Na Figura 78 tem-se umidades estimados com o TDR e os de referência.

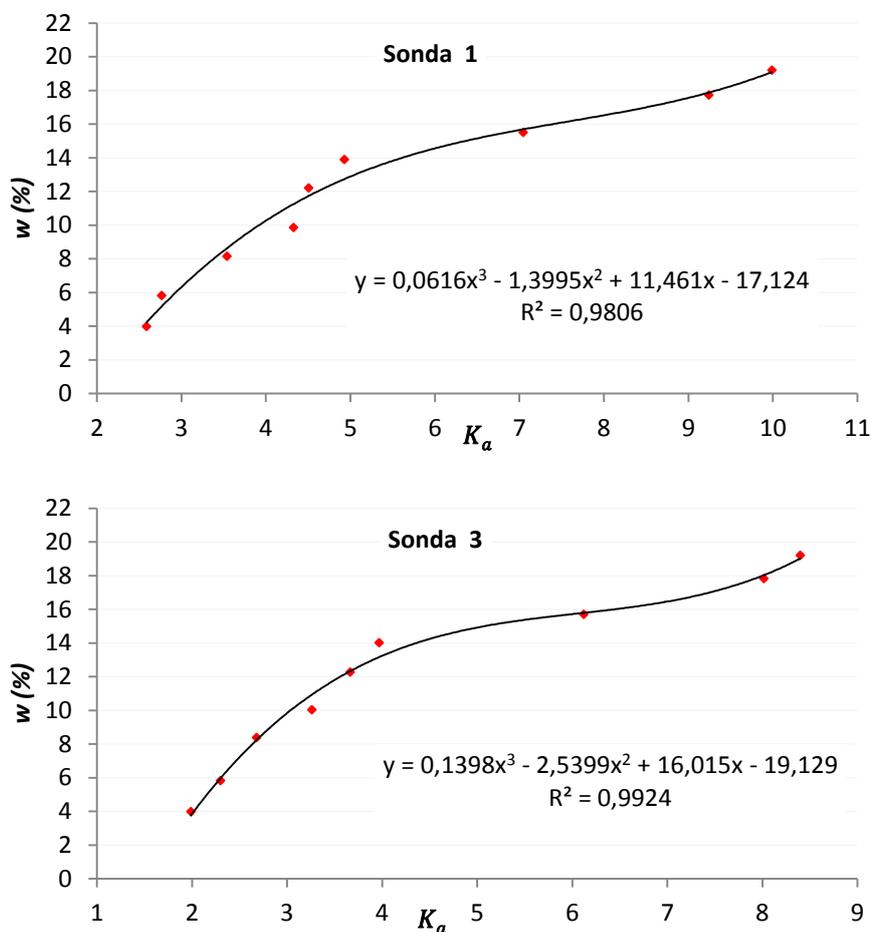


Figura 77. Determinação das constantes de calibração  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  para as sondas 1 e 3, pela correlação  $K_a$  versus  $w$ .

Tabela 37. Erro padrão e estimativa do teor de umidade pela correlação  $K_a$  versus  $w$ , sonda 1.

| Sonda 1            |               |           |                     |                         |
|--------------------|---------------|-----------|---------------------|-------------------------|
| $K_a$              | $w_{ref}$ (%) | $w_{TDR}$ | $w_{ref} - w_{TDR}$ | $(w_{ref} - w_{TDR})^2$ |
| 2.585              | 3.98          | 4.21      | -0.23               | 0.055                   |
| 2.766              | 5.83          | 5.18      | 0.65                | 0.428                   |
| 3.536              | 8.17          | 8.63      | -0.46               | 0.212                   |
| 4.327              | 9.86          | 11.26     | -1.40               | 1.946                   |
| 4.506              | 12.21         | 11.74     | 0.47                | 0.221                   |
| 4.925              | 13.91         | 12.74     | 1.17                | 1.368                   |
| 7.043              | 15.51         | 15.70     | -0.19               | 0.035                   |
| 9.240              | 17.73         | 17.89     | -0.16               | 0.025                   |
| 9.988              | 19.22         | 19.11     | 0.11                | 0.011                   |
| $\Sigma =$         |               |           |                     | 4.302                   |
| <b>Erro Padrão</b> |               |           |                     | <b>0.78</b>             |

Tabela 38. Erro padrão e estimativa do teor de umidade pela correlação  $K_a$  versus  $w$ , sonda 3.

| Sonda 3            |               |           |                     |                         |
|--------------------|---------------|-----------|---------------------|-------------------------|
| $K_a$              | $w_{ref}$ (%) | $w_{TDR}$ | $w_{ref} - w_{TDR}$ | $(w_{ref} - w_{TDR})^2$ |
| 1.987              | 3.98          | 3.76      | 0.22                | 0.048                   |
| 2.299              | 5.83          | 5.96      | -0.13               | 0.018                   |
| 2.679              | 8.39          | 8.23      | 0.15                | 0.023                   |
| 3.261              | 10.04         | 10.93     | -0.89               | 0.800                   |
| 3.664              | 12.26         | 12.33     | -0.06               | 0.004                   |
| 3.969              | 14.01         | 13.16     | 0.84                | 0.712                   |
| 6.119              | 15.69         | 15.80     | -0.11               | 0.011                   |
| 8.016              | 17.82         | 18.05     | -0.23               | 0.052                   |
| 8.397              | 19.20         | 19.03     | 0.16                | 0.027                   |
| $\Sigma =$         |               |           |                     | 1.696                   |
| <b>Erro Padrão</b> |               |           |                     | <b>0.49</b>             |

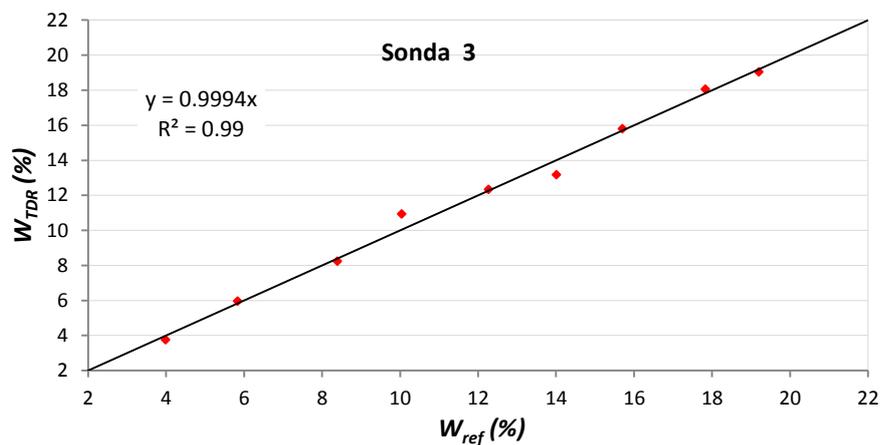
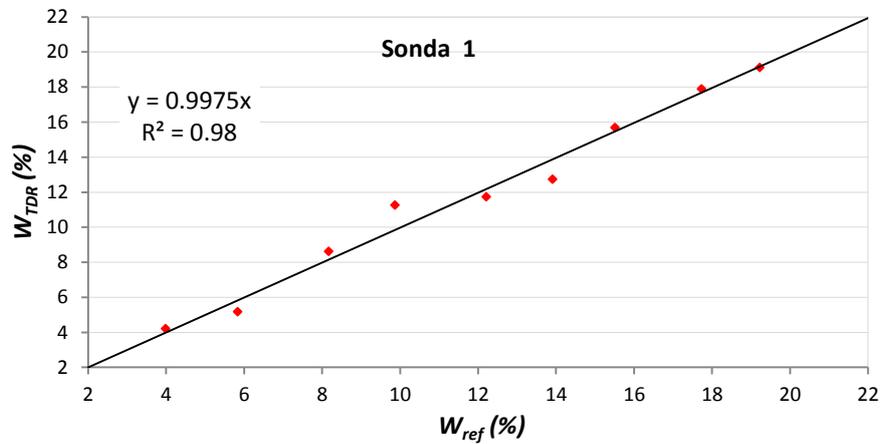


Figura 78. Comparação entre os valores de teores de umidade gravimétrico de referência e determinados com o TDR, sondas 1 e 3.

#### 4.2.6 Quarta campanha

A quarta campanha de ensaios de campo foi realizada utilizando a sonda 3, o filtro de ruído de 64 *waveforms* e um filtro de linha para conectar o computador e o Tektronix. Outra diferença com as campanhas anteriores foi que o cabo coaxial RG-58 de 50 ohms e de 12 m de comprimento foi passado pelo interior das hastes de cravação uma de cada vez, a medida que a profundidade aumentava. Também se tentou evitar variações de temperatura no cabo coaxial decorrentes do seu possível aquecimento ao sol, deixando sempre todo o cabo na sombra (**Fator 4**).

Nesta campanha se constatou uma redução considerável de ruídos com o filtro de ruído de 8 *waveforms*. No entanto, os registros das ondas ainda apresentaram sinais com alguma interferência. Quando o filtro de ruído é aumentado para 64 *waveforms*, essa interferência desaparece quase por completo.

As Tabelas 40 e 41 apresentam os resultados dos ensaios 1 e 2 da quarta campanha de campo e o cálculo do erro padrão para cada equação de calibração empregada. Observa-se que o menor erro padrão da estimativa para os dois ensaios foi obtido quando a equação de calibração proposta por Yu e Drnevich (2004) foi empregada.

A Figura 79 apresenta o perfil de variação do teor de umidade com a profundidade para os dois ensaios TDR realizados no campo bem como o perfil de referência. Na Figura 80 tem-se os perfis de resistência de ponta  $q_c$ , atrito lateral  $f_s$ , umidade gravimétrica de referência e a estimada com a equação de Yu e Drnevich (2004).

Tabela 39. Resultados do Ensaio 1 da quarta campanha.

| Prof. (m)   | Ensaio 1 |        |               | Correlação ( $K_a, w$ ) | Correlação ( $\sqrt{K_a}, w$ ) | Yu e Drnevich (2004) |
|-------------|----------|--------|---------------|-------------------------|--------------------------------|----------------------|
|             | $K_a$    | $Ec_b$ | $W_{ref}$ (%) | $w_{TDR}$ (%)           | $w_{TDR}$ (%)                  | $w_{TDR}$ (%)        |
| 0.75        | 3.06     | 0.0172 | 11.00         | 10.09                   | 10.18                          | 9.24                 |
| 1.50        | 2.99     | 0.0160 | 10.05         | 9.79                    | 9.91                           | 9.05                 |
| 2.25        | 3.52     | 0.0167 | 10.33         | 11.86                   | 11.77                          | 10.45                |
| 3.00        | 2.71     | 0.0160 | 10.10         | 8.39                    | 8.58                           | 8.22                 |
| 3.80        | 2.21     | 0.0164 | 10.12         | 5.37                    | 5.47                           | 6.59                 |
| 4.50        | 4.07     | 0.0172 | 10.75         | 13.41                   | 13.17                          | 11.78                |
| 5.25        | 3.99     | 0.0171 | 11.38         | 13.21                   | 12.98                          | 11.58                |
| 6.00        | 5.16     | 0.0178 | 11.67         | 15.09                   | 14.90                          | 14.01                |
| 6.75        | 5.36     | 0.0181 | 11.43         | 15.27                   | 15.15                          | 14.39                |
| 7.50        | 4.46     | 0.0178 | 11.00         | 14.18                   | 13.90                          | 12.62                |
| 8.24        | 3.26     | 0.0174 | 10.80         | 10.94                   | 10.95                          | 9.79                 |
| Erro Padrão |          |        |               | 2.90                    | 2.75                           | 2.08                 |

Tabela 40. Resultados do Ensaio 2 da quarta campanha.

| Prof. (m)          | Ensaio 2 |           |               | Correlação ( $K_a, w$ ) | Correlação ( $\sqrt{K_a, w}$ ) | Yu e Drnevich (2004) |
|--------------------|----------|-----------|---------------|-------------------------|--------------------------------|----------------------|
|                    | $K_a$    | $E_{c_b}$ | $W_{ref}$ (%) | $w_{TDR}$ (%)           | $w_{TDR}$ (%)                  | $w_{TDR}$ (%)        |
| 0.75               | 3.60     | 0.0180    | 11.00         | 12.11                   | 12.00                          | 10.65                |
| 1.50               | 3.05     | 0.0167    | 10.05         | 10.07                   | 10.17                          | 9.22                 |
| 2.25               | 3.15     | 0.0165    | 10.33         | 10.50                   | 10.56                          | 9.50                 |
| 3.00               | 3.62     | 0.0167    | 10.10         | 12.19                   | 12.07                          | 10.71                |
| 3.75               | 3.39     | 0.0175    | 10.12         | 11.42                   | 11.38                          | 10.13                |
| 4.50               | 3.93     | 0.0178    | 10.75         | 13.07                   | 12.86                          | 11.45                |
| 5.25               | 4.30     | 0.0193    | 11.38         | 13.89                   | 13.62                          | 12.29                |
| 6.00               | 4.65     | 0.0203    | 11.67         | 14.47                   | 14.20                          | 13.01                |
| 6.75               | 5.22     | 0.0216    | 11.43         | 15.14                   | 14.98                          | 14.12                |
| 7.50               | 4.56     | 0.0202    | 11.00         | 14.34                   | 14.06                          | 12.82                |
| 8.25               | 4.02     | 0.0198    | 10.80         | 13.28                   | 13.05                          | 11.65                |
| <b>Erro Padrão</b> |          |           |               | <b>2.54</b>             | <b>2.34</b>                    | <b>1.34</b>          |

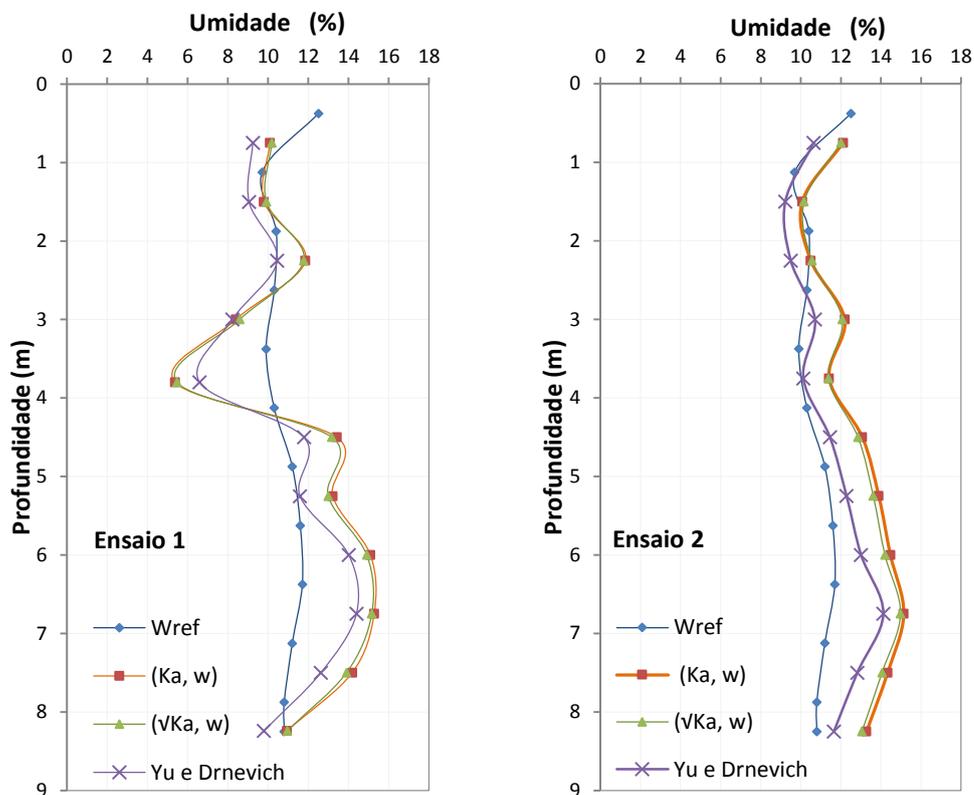


Figura 79. Perfis de variação da umidade determinados na quarta campanha de ensaios de campo.

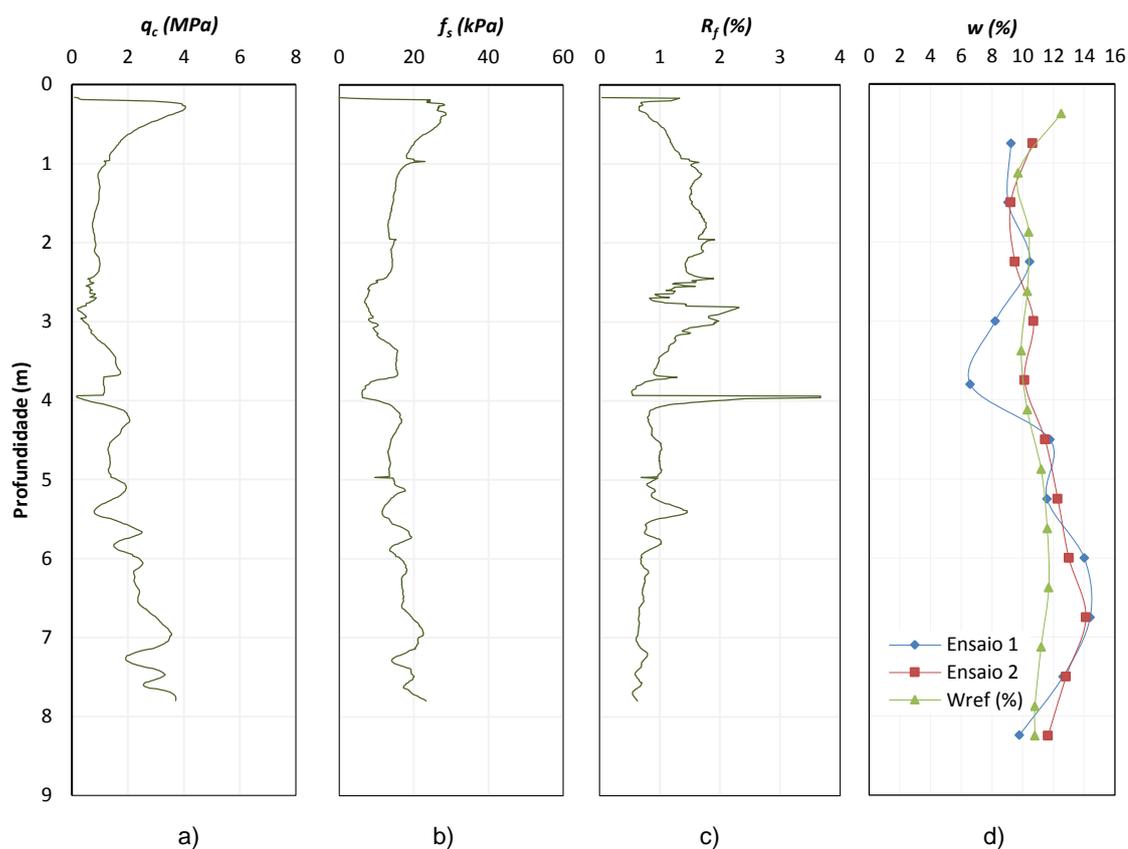


Figura 80. Resultados da quarta campanha de ensaios de campo a.) resistência de ponta b.) atrito lateral c.) razão de atrito d.) teor de umidade de referência e estimada (Yu e Drnevich, 2004).

#### 4.2.7 Quinta campanha

A última campanha de campo foi realizada seguindo os mesmos critérios da anterior (quarta campanha), pois se observou uma melhoria significativa nas determinações da umidade. Na mesma semana em que foi executada a quinta campanha de campo, estava sendo escavado no local, um poço de exploração de 6 m de profundidade com coleta de amostras deformadas e indeformadas, deste modo os valores das massas específicas seca e teores de umidade gravimétrica determinados a partir das amostras indeformadas coletadas desse poço foram utilizados nesta pesquisa como valores de referência.

As Tabelas 42 e 43 apresentam os resultados dos ensaios 1 e 2 da quinta campanha de campo e os valores dos erros-padrão para cada equação de calibração. Os valores do erro padrão são similares aos da campanha anterior, sendo menor quando a equação de calibração empregada foi a de Yu e Drnevich (2004).

A Figura 81 apresenta o perfil de umidade para os dois ensaios TDR realizados, além do perfil de teor de umidade gravimétrico de referência. A Figura 82 mostra o perfil de resistência de ponta  $q_c$ , atrito lateral  $f_s$ , umidade gravimétrica de referência e a umidade

gravimétrica estimada utilizando a equação de calibração proposta por Yu e Drnevich (2004).

**Tabela 41. Resultados do Ensaio 1 da quinta campanha.**

| Prof. (m)          | Ensaio 1 |        |               |            | Correlação ( $K_a, w$ ) | Correlação ( $\sqrt{K_a, w}$ ) | Yu e Drnevich (2004) |
|--------------------|----------|--------|---------------|------------|-------------------------|--------------------------------|----------------------|
|                    | $K_a$    | $EC_b$ | $W_{ref}$ (%) | $w_{poço}$ | $w_{TDR}$ (%)           | $w_{TDR}$ (%)                  | $w_{TDR}$ (%)        |
| 0.50               | 2.31     | 0.0149 | 6.7           | 6.58       | 6.02                    | 6.17                           | 6.93                 |
| 1.00               | 1.65     | 0.0146 | 7.0           | 7.65       | 1.01                    | 0.18                           | 4.42                 |
| 1.50               | 2.77     | 0.0154 | 8.1           | 8.53       | 8.70                    | 8.88                           | 8.40                 |
| 2.00               | 3.01     | 0.0159 | 8.6           | 9.31       | 9.86                    | 9.97                           | 9.09                 |
| 2.50               | 3.13     | 0.0159 | 8.8           | 9.06       | 10.38                   | 10.45                          | 9.42                 |
| 3.00               | 3.24     | 0.0158 | 9.0           | 9.08       | 10.85                   | 10.87                          | 9.73                 |
| 3.50               | 3.30     | 0.0164 | 8.9           | 9.35       | 11.10                   | 11.10                          | 9.90                 |
| 4.00               | 3.03     | 0.0161 | 8.7           | 8.58       | 9.96                    | 10.06                          | 9.15                 |
| 4.50               | 3.47     | 0.0163 | 9.3           | 10.01      | 11.69                   | 11.63                          | 10.33                |
| 5.00               | 3.87     | 0.0161 | 10.2          | 10.29      | 12.92                   | 12.72                          | 11.31                |
| 5.50               | 3.08     | 0.0165 | 10.4          | 10.33      | 10.18                   | 10.26                          | 9.29                 |
| 6.00               | 4.47     | 0.0175 | 10.6          | -          | 14.19                   | 13.91                          | 12.64                |
| 6.50               | 4.58     | 0.0173 | 10.6          | -          | 14.36                   | 14.09                          | 12.86                |
| 7.00               | 4.31     | 0.0173 | 10.6          | -          | 13.91                   | 13.63                          | 12.30                |
| 7.50               | 3.84     | 0.0177 | 10.7          | -          | 12.83                   | 12.64                          | 11.24                |
| 8.00               | 3.18     | 0.0174 | 10.6          | -          | 10.61                   | 10.66                          | 9.57                 |
| <b>Erro Padrão</b> |          |        |               |            | <b>2.76</b>             | <b>2.80</b>                    | <b>1.37</b>          |

**Tabela 42. Resultados do Ensaio 2 da quinta campanha.**

| Prof. (m)          | Ensaio 2 |        |               |            | Correlação ( $K_a, w$ ) | Correlação ( $\sqrt{K_a, w}$ ) | Yu e Drnevich (2004) |
|--------------------|----------|--------|---------------|------------|-------------------------|--------------------------------|----------------------|
|                    | $K_a$    | $EC_b$ | $W_{ref}$ (%) | $w_{poço}$ | $w_{TDR}$ (%)           | $w_{TDR}$ (%)                  | $w_{TDR}$ (%)        |
| 0.50               | 2.11     | 0.0167 | 6.7           | 6.58       | 4.63                    | 4.65                           | 6.22                 |
| 1.00               | 1.99     | 0.0161 | 7.0           | 7.65       | 3.76                    | 3.64                           | 5.78                 |
| 1.50               | 2.06     | 0.0162 | 8.1           | 8.53       | 4.32                    | 4.30                           | 6.06                 |
| 2.00               | 2.31     | 0.0163 | 8.6           | 9.31       | 6.00                    | 6.16                           | 6.92                 |
| 2.50               | 2.36     | 0.0167 | 8.8           | 9.06       | 6.33                    | 6.50                           | 7.09                 |
| 3.00               | 2.27     | 0.0168 | 9.0           | 9.08       | 5.75                    | 5.88                           | 6.79                 |
| 3.50               | 2.48     | 0.0167 | 8.9           | 9.35       | 7.08                    | 7.28                           | 7.49                 |
| 4.00               | 2.45     | 0.0165 | 8.7           | 8.58       | 6.93                    | 7.13                           | 7.41                 |
| 4.50               | 2.66     | 0.0165 | 9.3           | 10.01      | 8.13                    | 8.33                           | 8.07                 |
| 5.00               | 2.93     | 0.0167 | 10.2          | 10.29      | 9.48                    | 9.62                           | 8.86                 |
| 5.50               | 2.63     | 0.0165 | 10.4          | 10.33      | 7.94                    | 8.14                           | 7.96                 |
| 6.00               | 3.11     | 0.0171 | 10.6          | -          | 10.33                   | 10.40                          | 9.39                 |
| 6.50               | 3.47     | 0.0172 | 10.6          | -          | 11.70                   | 11.63                          | 10.33                |
| 7.00               | 3.66     | 0.0175 | 10.6          | -          | 12.31                   | 12.17                          | 10.80                |
| 7.50               | 2.94     | 0.0174 | 10.7          | -          | 9.57                    | 9.70                           | 8.91                 |
| 8.00               | 2.95     | 0.0169 | 10.6          | -          | 9.59                    | 9.72                           | 8.92                 |
| <b>Erro Padrão</b> |          |        |               |            | <b>2.29</b>             | <b>2.20</b>                    | <b>1.63</b>          |

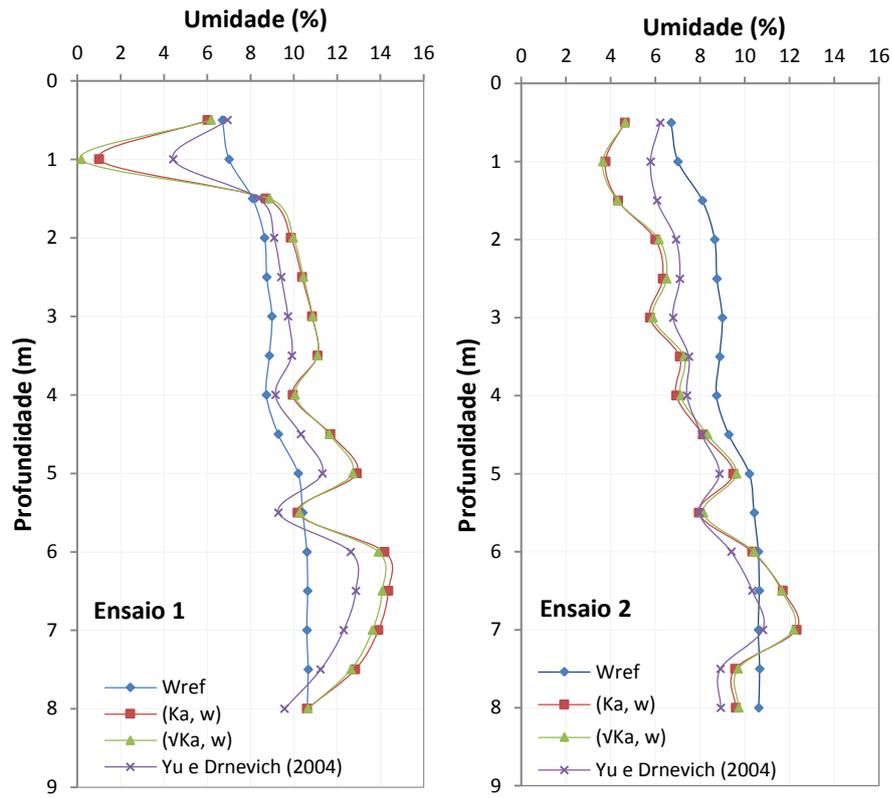


Figura 81. Perfil de variação de umidade determinados na quinta campanha de campo.

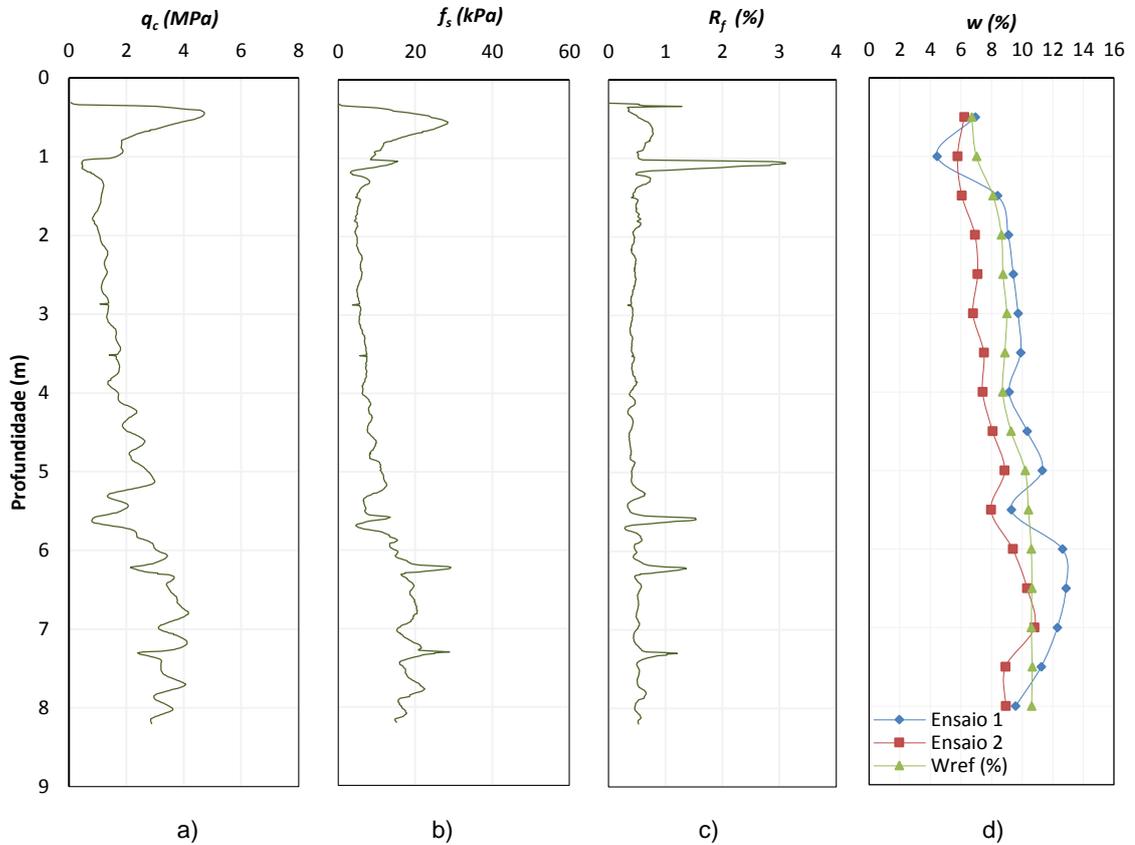
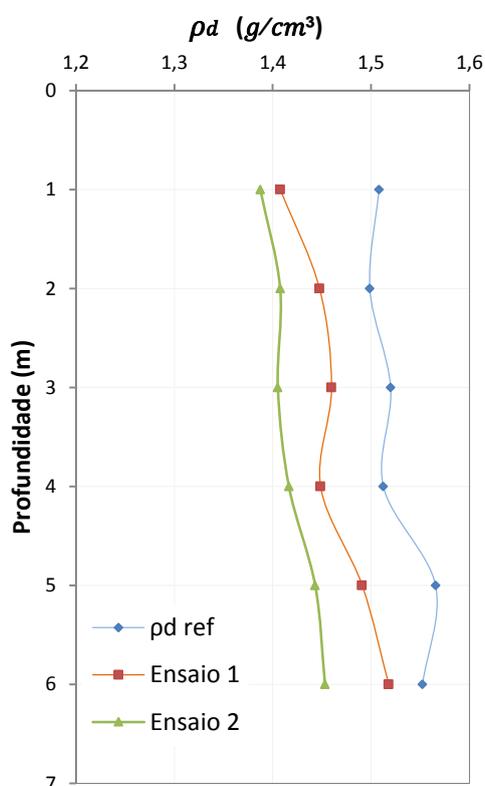


Figura 82. Resultados da quinta campanha de ensaios de campo, a.) resistência de ponta, b.) atrito lateral c.) razão de atrito, d.) teores de umidades de referência e estimados (Yu e Drnevich, (2004)).

A Tabela 43 apresenta os valores da massa específica seca estimada através da técnica TDR para os dois ensaios, assim como valores de referência determinados a partir das amostras indeformadas coletadas no poço exploratório. A massa específica pela técnica TDR foi estimada usando a equação de calibração de Yu e Drnevich (2004), Equação (19). A Figura 83 mostra o perfil de variações dos valores de massa específica seca estimadas e de referência.

**Tabela 43. Erro padrão das estimativas de massa específica seca e do teor de umidade gravimétrico.**

| Yu e Drnevich (2004) |               |               |                                 |               |                                 |
|----------------------|---------------|---------------|---------------------------------|---------------|---------------------------------|
| Prof. (m)            | $\rho_{dref}$ | Ensaio 1      |                                 | Ensaio 2      |                                 |
|                      |               | $\rho_{dTDR}$ | $(\rho_{dref} - \rho_{dTDR})^2$ | $\rho_{dTDR}$ | $(\rho_{dref} - \rho_{dTRD})^2$ |
| 1                    | 1.508         | 1.408         | 0.0101                          | 1.387         | 0.0145                          |
| 2                    | 1.499         | 1.448         | 0.0026                          | 1.408         | 0.0083                          |
| 3                    | 1.520         | 1.460         | 0.0036                          | 1.405         | 0.0132                          |
| 4                    | 1.513         | 1.449         | 0.0041                          | 1.416         | 0.0092                          |
| 5                    | 1.566         | 1.491         | 0.0056                          | 1.443         | 0.0150                          |
| 6                    | 1.552         | 1.518         | 0.0012                          | 1.453         | 0.0098                          |
| $\Sigma$             |               |               | 0.0271                          |               | 0.0701                          |
| <b>Erro Padrão</b>   |               |               | <b>0.082</b>                    |               | <b>0.132</b>                    |



**Figura 83. Perfil de variação de massa específica seca ( $\rho_d$ ) com a profundidade, para a quinta campanha de ensaios.**

O teor de umidade gravimétrico pela técnica TDR foi determinado empregando a equação de calibração da correlação  $\theta$  versus  $K_a$ . As Tabela 44 e Tabela 45 mostram os valores de teores de umidade volumétricos TDR, os de referência e o erro padrão da estimativa para os dois ensaios realizados. Observa-se que o erro padrão da estimativa do teor de umidade volumétrico foi de 3.23% no ensaio 1 e 4.44 % no ensaio 2.

**Tabela 44. Erro padrão da estimativa para o teor de umidade volumétrico do ensaio 1.**

| Ensaio 1           |       |               | Correlação ( $K_a, \theta$ ) |                    |                                   |
|--------------------|-------|---------------|------------------------------|--------------------|-----------------------------------|
| Prof. (m)          | $K_a$ | $w_{ref}$ (%) | $\theta_{TDR}$ (%)           | $\theta_{ref}$ (%) | $(\theta_{ref} - \theta_{TDR})^2$ |
| 0.5                | 2.31  | 6.70          | 8.72                         | 8.23               | 0.236                             |
| 2                  | 3.01  | 8.65          | 14.27                        | 14.04              | 0.055                             |
| 3                  | 3.24  | 8.99          | 15.74                        | 12.77              | 8.820                             |
| 4                  | 3.03  | 8.73          | 14.41                        | 14.05              | 0.132                             |
| 5                  | 3.87  | 10.20         | 18.92                        | 16.11              | 7.864                             |
| 6                  | 4.47  | 10.60         | 21.03                        | 16.07              | 24.610                            |
| $\Sigma$           |       |               |                              |                    | 41.718                            |
| <b>Erro Padrão</b> |       |               |                              |                    | <b>3.23</b>                       |

**Tabela 45. Erro padrão da estimativa para o teor de umidade volumétrico do ensaio 2.**

| Ensaio 2           |       |               | Correlação ( $K_a, \theta$ ) |                    |                                   |
|--------------------|-------|---------------|------------------------------|--------------------|-----------------------------------|
| Prof. (m)          | $K_a$ | $w_{ref}$ (%) | $\theta_{TDR}$ (%)           | $\theta_{ref}$ (%) | $(\theta_{ref} - \theta_{TDR})^2$ |
| 1                  | 1.99  | 7.01          | 5.52                         | 8.23               | 7.388                             |
| 2                  | 2.31  | 8.65          | 8.70                         | 14.04              | 28.531                            |
| 3                  | 2.27  | 8.99          | 8.34                         | 12.77              | 19.672                            |
| 4                  | 2.45  | 8.73          | 10.03                        | 14.05              | 16.179                            |
| 5                  | 2.93  | 10.20         | 13.72                        | 16.11              | 5.737                             |
| 6                  | 3.11  | 10.60         | 14.96                        | 16.07              | 1.222                             |
| $\Sigma$           |       |               |                              |                    | 78.729                            |
| <b>Erro Padrão</b> |       |               |                              |                    | <b>4.44</b>                       |

A Figura 84 apresenta o perfil de teor de umidade volumétrico até 6 m de profundidade, determinado na quinta campanha de ensaios de campo.

Como visto na revisão bibliográfica, os erros-padrão obtidos por Manieri et al. (2007) em ensaios de campo foram de 5% utilizando a equação de calibração específica por grupo de textura de solo e 6% com a equação de calibração de todos os solos em conjunto. Cabe destacar que esses autores determinaram o erro padrão da estimativa como se fosse para uma população, porém o denominador que usaram foi o número de amostras utilizadas ( $n$ ), entretanto no presente estudo foi utilizado  $(n - 2)$  como se fosse para uma amostra. Para uma base de comparação, o erro padrão da estimativa de teor de umidade volumétrico da

presente pesquisa foi determinado da mesma forma que no trabalho de Marieri et al. (2007), sendo de 2.64 e 3.62% para o ensaio 1 e 2 respectivamente. Portanto, os valores de teor de umidade gravimétrico determinados usando a sonda helicoidal TDR na quinta campanha de ensaios de campo são considerados satisfatórios para o sistema proposto.

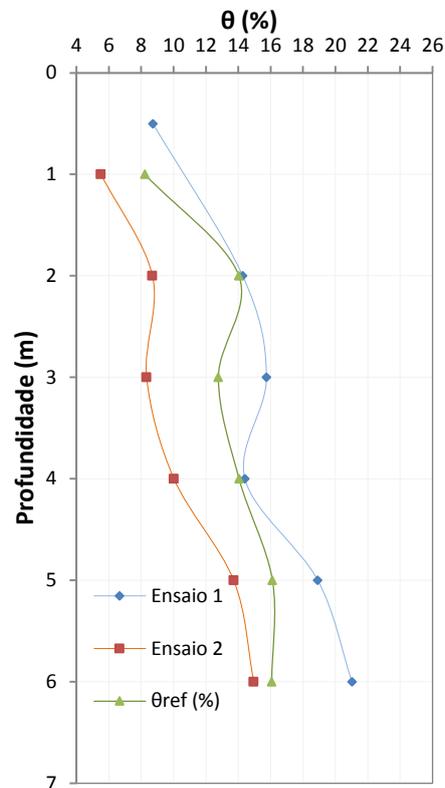


Figura 84. Perfil de variação do teor de umidade volumétrico da quinta campanha de ensaios de campo.

#### 4.2.8 Síntese dos resultados das principais campanhas de campo

Na Tabela 46 são apresentados os erros-padrão médios das três principais campanhas de ensaios de campo, todas compostas por dois ensaios TDR, determinação do teor de umidade gravimétrica de referência e um ensaio CPT, ou seja, a primeira, a quarta e a quinta campanha. Nesta tabela é possível observar uma melhoria significativa na estimativa do teor de umidade quando se utilizou a sonda helicoidal 3, ou seja, na quarta e quinta campanhas de campo. Nelas os erros-padrão médios da estimativa foram 1.71 e 1.50 respectivamente, utilizando a equação de calibração de Yu e Drnevich (2004). Também se observa nessa tabela que a equação de Yu e Drnevich (2004) foi a que apresentou menores diferenças entre os teores de umidade gravimétrica estimada ( $w_{TDR}$ ) e os valores de referência ( $w_{ref}$ ) em todas as três campanhas realizadas.

Tabela 46. Erro padrão da estimativa do teor de umidade nas campanhas 1, 4 e 5.

| Campanha | Ensaio | Erro Padrão           |                   |               |
|----------|--------|-----------------------|-------------------|---------------|
|          |        | Equação de calibração |                   |               |
|          |        | $(K_a, w)$            | $(\sqrt{K_a}, w)$ | Yu e Drnevich |
| 1        | 1      | 4.90                  | 4.81              | 3.96          |
|          | 2      | 2.82                  | 2.82              | 2.24          |
| 4        | 1      | 2.90                  | 2.75              | 2.08          |
|          | 2      | 2.54                  | 2.34              | 1.34          |
| 5        | 1      | 2.76                  | 2.81              | 1.37          |
|          | 2      | 2.29                  | 2.20              | 1.62          |

Nessa pesquisa, os erros-padrão da estimativa do teor de umidade empregando essa nova sonda TDR foram menores que aqueles obtidos por Assis (2008) e Lima (2009), conforme pode ser observado no item 2.5.2 desse trabalho. Cabe ressaltar que os autores mencionados trabalharam com o protótipo inicial dessa mesma sonda, a qual foi utilizada na primeira campanha de campo da presente pesquisa. Estes resultados mostram que as modificações realizadas na sonda helicoidal, contribuíram para melhoria do seu desempenho. No trabalho de Assis (2008) os intervalos de umidade de campo foram de 11.8% até 30.5% e em Lima (2009) foram de 58.1% até 133.8%.

Nessa pesquisa o solo estudado é uma areia pouco argilosa não saturada, com valores de teor de umidade que variaram entre 5% e 12%. Pesquisas realizadas nesse campo experimental mostram que a variação do teor de umidade ao longo do ano varia sempre entre 3 e 12% (Bezerra, 2014). É importante destacar que um dos fatores mais importantes que influencia o comportamento de um solo não saturado é a sucção. A representação da variação da sucção com o teor de umidade é representado pela curva de retenção de água do solo. Para o local estudado, ou seja, o campo experimental da Unesp de Bauru, a curva de retenção é típica de solos arenosos (Figura 19), com baixa capacidade de retenção de água. Ela apresenta uma zona de desaturação praticamente vertical numa grande faixa de variação de umidade para um pequeno intervalo de sucção (entre 1 a 10 kPa) e uma zona de saturação residual, onde ocorre o oposto, ou seja, para pequenas mudanças do teor de umidade ocorrem grandes alterações na sucção. Duas entradas de ar são observadas, que sendo a segunda pode ser atribuída à drenagem dos microporos da fração agregada do solo.

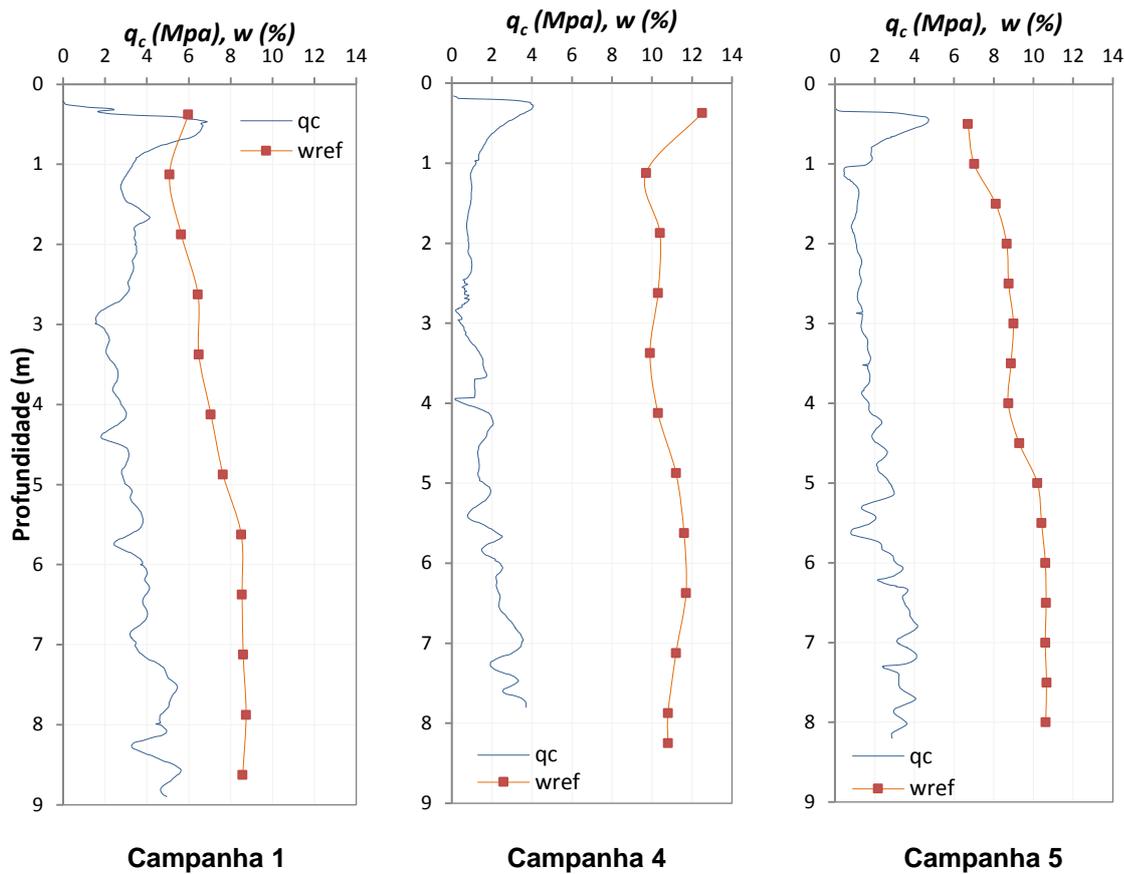


Figura 85. Perfis de umidade de referência e resistência de ponta.

A Figura 85 mostra os perfis de variação do teor de umidade de referência e de resistência de ponta do CPT com a profundidade nas três campanhas de ensaios de campo realizadas. A interpretação dos resultados apresentados nesses perfis a partir do primeiro metro de profundidade indica que a quarta campanha foi realizada num período que registrou teores de umidade mais elevados, variando 9.7 e 11.7%. É nela também se observam os menores valores de resistência de ponta ( $q_c$ ) do CPT, variando entre 0.17 e 3.71 MPa. Já, a primeira campanha foi executada num período onde ocorreram os teores de umidade mais baixos, variando entre 5.1 e 8.7%, e onde as maiores resistências de ponta ( $q_c$ ) foram registradas, entre 0.62 e 8.05 MPa. Importante destacar nesses resultados que a variação do perfil de teor de umidade registrada nos ensaios foi entre 5 e 12%, indicando influência significativa do teor de umidade nos valores de resistência à penetração do cone para esse solo não saturado. Deste modo, considera-se que após o desenvolvimento dessa sonda existe potencial de seu emprego para o estudo da influência da sucção na interpretação de ensaios CPT em solos não saturados, sem a necessidade de coleta de amostras.

## CONCLUSÕES E SUGESTÕES

As conclusões desta pesquisa são:

- As modificações na sonda helicoidal levaram a uma melhora significativa na qualidade dos registros da onda e, portanto, na determinação do perfil de teor de umidade pela técnica TDR. A sonda que apresentou melhor desempenho durante os ensaios de campo foi a última construída, ou seja, a sonda 3.
- O uso da haste metálica de cravação acoplada à sonda helicoidal durante a calibração levou a um aumento de ruído nas ondas registradas. Destaca-se a importância de utilizar nos ensaios de calibração em laboratório um procedimento mais próximo possível daquele empregado nos ensaios que serão executados em campo, em especial para teores de umidade gravimétricos inferiores a 8% para o solo estudado.
- Os três tipos de equações de calibração utilizadas ( $\sqrt{K_a}$  versus  $w$ ,  $K_a$  versus  $w$  e Yu e Drnevich, 2004) resultaram em erros-padrão médios que variaram entre 1.50 e 2.72% na estimativa do teor de umidade. A equação que apresentou maior acurácia na determinação de teor de umidade foi a proposta por Yu e Drnevich (2004), com um erro médio de 1.61% para a estimativa do teor de umidade utilizando a sonda 3 cravada pelo sistema multifunção do ensaio CPT. Variações no teor de umidade dessa ordem podem significar grandes alterações no comportamento mecânico do solo estudado, em especial nas épocas mais secas do ano, onde os teores de umidade do horizonte mais superficial podem facilmente atingir valores entre 3 e 5% no teor de umidade. Estes fatores impõem limitações para o uso da sonda helicoidal na avaliação do efeito da sucção na previsão do comportamento desse solo nessa condição de umidade.
- A sonda TDR helicoidal empregada em conjunto com o ensaio CPT se mostrou uma ferramenta interessante na estimativa do teor de umidade para o solo estudado, desde que seja levado em consideração o erro padrão médio, conforme exposto neste trabalho.

As sugestões para a continuidade desta pesquisa são:

- Empregar a sonda TDR helicoidal desenvolvida para o estudo da influência da sucção na interpretação de ensaios CPT em solos não saturados, sem a necessidade de coleta de amostras. Assim, considerar essa informação na interpretação dos resultados de ensaios CPT para definição dos parâmetros de projeto.

- Estudar o desempenho da sonda TDR helicoidal para estimativa do teor de umidade e sua possível correlação com a sucção, através da determinação de curvas de retenção de água do solo, para melhor descrever o comportamento dos solos não saturados. Como foi observado nessa pesquisa, grandes variações na sucção podem ocorrer devido a pouca variação no teor de umidade, às vezes menores a 1%. Por isso, é necessário avaliar o efeito da magnitude do erro padrão da estimativa do teor de umidade pela técnica TDR, sobre a sucção, a partir da curva de retenção de água do solo em diferentes solos.
- Considerando que o processo de calibração da sonda TDR helicoidal em laboratório é trabalhoso e demorado, é necessário elaborar um método de calibração eficiente, mais simples e mais rápido, inclusive que possa ser empregado no próprio campo, para ampliar o uso dessa técnica. Os modelos dielétricos mistos de três e quatro fases oferecem uma boa alternativa para a obtenção da equação de calibração já que permitem a análise da constante dielétrica de cada um dos componentes do solo, desta forma uma mesma calibração poderia ser realizada utilizando diferentes tipos de solo.
- A determinação do teor de umidade gravimétrica de referência é feita com uma amostra de solo pertencente a um intervalo de profundidade específico, para posteriormente ser comparada com os dados de umidade obtidos usando a sonda helicoidal TDR. Poderia se considerar realizar leituras TDR em três pontos de diferente profundidade dentro do mesmo intervalo, para assim ter um dado mais próximo á umidade de referência, (Exemplo; uma determinação do teor de umidade TDR cada 10 cm dentro dessa mesma faixa de profundidade).

## REFERÊNCIAS

AGNELLI, N. **Comportamento de um solo colapsível inundado com líquidos de diferentes composições químicas**. 1997. 205 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

AITCHISON, G. D. Review panel statement-engineering concepts fo moisture equilibria and moisture changes in soils. In: CONFERENCE ON MOISTURE EQUILIBRIA AND MOISTURE CHANGES IN SOIL BENEATH COVERED AREAS, 1., London, 1965. **Proceedings...** London: Butterworths, 1965. p. 7-21.

ALONSO, E. E.; GENS, A.; HIGHT, D. W. Special problem soils. General report. In: EUROPEAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 9., 1987, Dublin. **Proceedings...** Dublin: [s.n.], 1987. v. 3, p. 1087-1146.

AOKI, N.; VELLOSO, D. A. An approximate method to estimate the bearing capacity of piles. 5th In: PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 5., 1975, Buenos Aires. **Proceedings...** Buenos Aires: International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 1975. p. 367-376.

ASSIS, C. D. D. E. **Avaliação de uma sonda TDR helicoidal para a estimativa do teor de umidade dos solos em campo e em laboratório**. 2008. 178 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 6780**: standard test method for water content and density of soil in place by time domain reflectometry (TDR). In: ANNUAL Book of ASTM Standards. West Conshohocken: ASTM International, 2005.

ARAÚJO NETO, M. D. Métodos de medição da água no solo: uma breve discussão. **Genomos**, v. 2, n. 2, p. 51-61, 1994.

BARRERA BUCIO, M.; GARNICA ANGUAS, P. **Introducción a la mecánica de suelos no saturados en vías terrestres**. Sanfandila: Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2002. Publicación Técnica No. 198.

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 Technical Development and Evaluation Center: Indianapolis, 1950. Technical Development Report No. 127.

BELL, L. D. **Soil physics**. New York: Wiley, [1956].

BEZERRA, R.C. **Avaliação do efeito da sucção nos resultados de ensaio CPT**. Bauru, 2014. 48 p. Relatório técnico científico: PIBIC.

BRUCE, R. R.; LUXMOORE, R. J. Water retention: field methods. In KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis I: physical and mineralogical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 1986. cap. 27, p. 663-686.

CAMARGO D. C.; CÓRCOLES TENDERO, J. I.; ORTEGA ÁLVARES, F.; MONTOYA SEVILLA, F. Calibração da sonda de capacitância Enviroscan®. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial, p. 27- 39, 2012.

CAMPANELLA, R. G.; ROBERTSON, P. K. Current status of the piezocone test. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PENETRATION TESTING, 1., 1988, Orlando. **Proceedings...** Rotterdam: Balkema, 1988. v. 1, p. 93-116.

CAMPBELL, J. E. Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz. **Soil Science Society of American Journal**, v. 54, n. 2, p. 332-341, 1990.

CAMPBELL SCIENTIFIC. **TDR100**: instruction manual. Logan: Campbell Scientific, [200-]. Disponível em: <<http://werc.engr.uaf.edu/~ken/ambler/ambler-mini/ambler/csi-1net-folders/Resource%20DVD/Software/pctdr/Manual/TDR100.PDF>>. Acesso em: 19 nov. 2014.

CAMPOS, L. E. P. **Influência da sucção na estabilidade de taludes naturais em solos residuais**. 1984. 146 f. Mestrado (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil: Geotecnia), Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1984.

CARVALHO, J. B. Q. de. Análise da microestrutura de solos lateríticos do Brasil. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 22., Maceió. **Anais...** Maceió: Grafitex, 1987. v. 1, p. 373-382.

CASSEL, D. K. **Physical characteristics of soils of the Southern Region-Summary of in situ unsaturated hydraulic conductivity**. North Carolina State University Southern Cooperative Service Bulletin, v. 303, 1985.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. **Fundações diretas**: projeto geotécnico. São Carlos: Oficina de Textos, 2011.

COELHO, E. F. et al. Desempenho de modelos de calibração de guias de onda acopladas a TDR e a multiplexadores em três tipos de solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 30, n. 1, p. 23-30, 2006.

COLLINS, M.; MILLER, G. A. Cone penetration testing in unsaturated soils at two instrumented test sites. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 6., 2014, Sydney. **Proceedings...** Leiden: CRC Press/Bakelma, 2014. p. 1489-1493.

CONCIANI, W. et al. Emprego de TDR com sondas multi-hastes segmentadas para medida de umidade de um perfil de solo. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 1., 1997, São Carlos. **Anais...** São Carlos: EMBRAPA-CNPDIA, 1997. p.169-173.

DANZIGER, F. A. B.; SCHANID, F. Ensaios de piezocone: procedimentos, recomendações e interpretação. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA, 4., São Carlos. **Anais...** São Paulo: ABEF/ABMS, 2000. p. 1-51.

DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. **Geophysical Prospecting**, v. 37, n. 5, p. 531–551, 1989.

DE LOOR, G. P. Dielectric properties of heterogeneous mixtures. **Applied Scientific Research, Section B**, v. 11, n. 3-4, p. 310-320, 1964.

DE MIO, G. **Condicionantes geológicos na interpretação de ensaios de piezocone para identificação estratigráfica na investigação geotécnica e geoambiental**. 2005. 348 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

DELGADO, A. K. C. **Influência da sucção no comportamento de um perfil de solo tropical compactado**. 2002. 181 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2002.

DERUTIER, J. Electric penetrometer for site investigations. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v. 97, n. 2, p. 457-473, 1971.

DIAS, C. O. **Determinação da condutividade hidráulica de solos não saturados**. 2012. 236 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

DINEEN, K. **The influence of soil suction on compressibility and swelling**. 1997. Thesis - University of London, London, 1997.

DIRKSEN, C.; DASBERG, S. Improved calibration of time-domain reflectometry soil water content measurement. **Soil Science Society of American Journal**, v. 57, n. 3, p. 660-668, 1993.

DOBSON, M. C. et al. Microwave dielectric behavior of wet soil. Part II: dielectric mixing models. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, n. 1, p. 35-46, 1985.

DRNEVICH, V. P.; YU, X.; LOVELL, J. E. **Beta testing implementation of the purdue time domain reflectometry (tdr) method for soil water content and density measurement**. West Lafayette: Joint Transportation Research, 2003. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5703/1288284313153>>. Acesso em: 22 set. 2014.

ESCARIO, V.; SÁEZ, J. The shear strength of partly saturated soils. **Géotechnique**, v. 36, n. 3, p. 453-456, 1986.

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

ESQUIVEL, E. R.; GIACHETI, H. L. Development of a new TDR probe for determining soil water content and dry density. **Geotechnical Special Publication**, v. 162, 2007, p. 18.

ESQUIVEL, E. R.; VAZ, C. M. P. Development of a new TDR probe for assessing the soil water content at different depths. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING, 17., 2009, Alexandria. **Proceedings...** Amsterdam: IOS Press/Milipress Science Pub, 2009. p. 3443-3446.

FENG, W. Theoretical model of multisection time domain reflectometry measurement system. **Water Resources Research**, v. 35, n. 8, 2321-2331, 1999.

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.

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

FREDLUND, D. G. **The Implementation of unsaturated soil mechanics into geotechnical engineering practice**. [S.l.]: National Research Council of Canada, 2000.

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

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, n. 4, p. 521-532, 1994.

FREDLUND, D. G.; XING, A; HUANG, S. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, n. 4, p. 533-546, 1994.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R.; WIDGER, R. A. The shear strength of unsaturated soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 15, n. 3, p. 313-321, 1978.

FREDLUND, M. D.; FREDLUND, D. G.; WILSON, G. W. Prediction of the soil-water characteristic curve from grain-size distribution and volume-mass properties. In: BRAZILIAN SYMPOSIUM ON UNSATURATED SOILS, 3., 1997, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 1997. p. 13-23.

GARDNER, W. H. Water content. In: **Methods of soil analysis: part 1: Physical and mineralogical properties, Including statistics of measurement and sampling.** American society of agronomy, Madison. p. 82-127, 1965.

HALLIKAINEN, M. T. Microwave dielectric behavior of wet soil, empirical models and experimental observations. **IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing**, v. 23, n. 1, p. 25-34, 1985.

HASHIGUTI, H. T. et al. Estimativa da umidade do solo avaliada por TDR, em presença de diferentes teores de óxidos de ferro. In: MOSTRA DE TRABALHOS CIENTÍFICOS EM AGRONOMIA, 9., 2012. **Anais...** Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 2012. p 15-18.

HEIMOVAARA, T. J. Frequency domain analysis of time domain reflectometry waveforms. 1. Measurement of the complex dielectric permittivity of soils. **Water Resources Research**, v. 30, n. 2, p. 189-199, 1994.

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

HILLEL, D. Physical principles. In: \_\_\_\_\_. **Soil and water: physical principles and processes.** New York: Academic Press, 1971. p. 5-127.

\_\_\_\_\_. The state of water in the soil. In: \_\_\_\_\_. **Soil and water: physical principles and processes.** New York: Academic Press, 1971. p. 49-77.

JACOBSEN, O. H.; SCHJONNING, P. A Laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture. **Journal of Hydrology**, v. 151, n. 2, p. 147-157, 1993.

JONES, S. B.; WRAITH, J. M.; OR, D. Time domain reflectometry (TDR) measurements principles and applications. **HP Today Scientific Briefing Hydrological Processes**, v. 16, n. 1, p. 141-153, 2002.

KLEMUNES JR., J. **Determining soil volumetric moisture content using time domain reflectometry**. McLean: US. Dept. of Transportation, 1998. Publication No. FHWA RD 97-139.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 563-596.

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

LEDIEU, J. et al. A Method measuring soil water moisture by time domain reflectometry. **Journal of Hydrology**, v. 88, n. 3, p. 319-328, 1986.

LEE, H. C.; WRAY, W. K. Techniques to evaluate soil suction. A vital unsaturated soil water variable. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 1., 1995, Paris. **Proceedings...** Rotterdam: Balkema, 1995. v. 2, p. 615-622.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: Paulo Leonel Libardi, 1995.

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

LIN, C. P. **Time domain reflectometry for soil properties**. 1999. Thesis - School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, 1999.

LU NING.; LIKOS W. J. **Unsaturated Soils Mechanics**. Jhon Wiley & Sons Inc, New Jersey, 2004.

LUNNE, T.; ROBERTSON, P. K.; POWELL, J. J. M. **Cone penetration testing in geotechnical practice**. New York: Blackie, 1997.

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

MANIERI, J. M. **Utilização de um penetrômetro de impacto combinado com sonda de TDR para medidas simultâneas de resistência e de umidade do solo na avaliação da compactação em cana-de-açúcar.** 2005. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agronômico, Campinas. 2005.

MATYAS, E. L.; RADHAKRISHNA, H. S. Volume change characteristics of partially saturated soils. **Géotechnique**, v. 18, n. 4, p. 432-448, 1968.

MAYNE, P. W. Enhanced geotechnical site characterization by seismic piezocone penetration tests. In: INTERNATIONAL GEOTECHNICAL CONFERENCE, 4., 2000, Cairo. **Proceedings...** Cairo: Cairo University, 2000. p. 95-120.

\_\_\_\_\_. Stress-strain-strength-flow parameters from enhanced in-situ tests. In: CONFERENCE ON IN-SITU MEASUREMENT OF SOIL PROPERTIES & CASE HISTORIES, 2001, Bali. **Proceedings...** [Bandung?]: [Universitas Katolik Parahyangan], [2001]. p. 47-69.

\_\_\_\_\_. In-situ test calibrations for evaluating soil parameters. In: TAN, T. S. et al. (Eds.) **Characterisation and engineering properties of natural soils.** Lisse: Balkema, 2007. p. 1602-1652.

MAYNE, P. W.; SCHNEIDER J. A. Evaluating Axial Drilled Shaft Response by Seismic Cone. In: BRANDON, T. L. (Ed.) **Foundations and ground improvement.** Reston: American Society of Civil Engineers, 2001. Geotechnical Special Publication No. 113, p. 655-669.

MAYNE, P. W.; CHRISTOPHER, B. R.; DEJONG, J. **Subsurface investigations: geotechnical site characterization.** Arlington: National Highway Institute, 2002. Publication No. FHWA NHI-01-031, p. 7-11.

MAYNE, P. W. et al. U.S. national report on CPT. SYMPOSIUM ON CONE PENETRATION TESTING, 1995, Linköping. **Proceedings...** Linköping : Swedish Geotechnical Society, 1995. Report 3:95, v. 1, p. 263-276.

MILLER, C. J. et al. Impact of soil type and compaction conditions on soil water characteristic. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 128, n. 9, p. 733-742, 2002.

NISSEN, H.; MOLDRUP, P. Theoretical background for the TDR methodology. In: SYMPOSIUM TIME DOMAIN REFLECTOMETRY APPLICATIONS IN SOIL SCIENCE HELD

AT THE RESEARCH CENTRE FOULUM, 1994, Tijele. **Proceedings...** Lyngby :Danish Institute of Plant and Soil Science, 1995. p. 9-23.

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

NOGAMI, J. S. et al. **Pavimentação com solos lateríticos**. São Paulo: Abms-Nrsp/EESC-USP, 1993.

NOGAMI, J. S. et al. Procedimentos não tradicionais na pavimentação com solos e ambientes tropicais. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 30., 1996, Salvador. **Anais...** Rio de Janeiro: Abpv, 1996. v. 3, p. 1603-1633.

O'CONNOR, K. M.; DOWDING, C. H. **GeoMeasurement by pulsing TDR cables and probes**. Boca Raton: CRC Press, 1999.

OLIVEIRA, F. P. et al. Fatores relacionados à suscetibilidade da erosão em entressulcos sob condições de uso e manejo do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 16, n. 4, p. 337–346, 2012.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos**. 2. ed. Porto Alegre: Livros Técnicos e Científicos, 1995.

PAIVA, N. B. et al. Variação de umidade em um perfil de solo poroso não saturado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: [s.n.], 2013.

PALTINEANU, I. C.; STARR, Y. J. L. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 6, p. 1576-1585, 1997.

PERSSON, M.; WRAITH, J. M. Shaft-mounted time domain reflectometry probe for water content and electrical conductivity measurements. **Vadose Zone Journal**. v. 1, n. 2, p. 316-319, 2002.

POURNAGHIAZAR, M.; RUSSEL, A. R; KHALILI, N. Interpretation of the cone penetration tests in unsaturated sands. In: In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 6., 2014, Sydney. **Proceedings...** Leiden: CRC Press/Bakelma, 2014. p 1675-1682.

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

REICHARD, K. O solo como um reservatório de água. In: REICHARDT, K. **A Água em sistemas agrícolas**. São Paulo: [s.n.], 1987. cap. 3, p. 27-69.

RIAUND, J.-L.; MIRAN, J. **The Cone penetrometer test**. Washington: US Department of Transportation, 1992. Report No. FHWA-SA-91-043.

ROBERTSON P. K. Use of piezometer cone data. In: USE OF IN SITU TESTS IN GEOTECHNICAL ENGINEERING, Blacksburg , 1986. **Proceedings...** New York: American Society of Civil Engineers, 1986. p. 1263-1280.

\_\_\_\_\_. CPT interpretation: a unified approach. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 46, n. 11, p. 1337-1355, 2009.

ROBERTSON, P. K; CAMPANELLA, R. G.; WIGHTMAN, A. SPT-CPT Correlations. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, v. 108, n. 11, p. 1449-1459, 1983.

ROBINSON, D. A.; BELL, J. P.; BATCHELOR, C. H. Influence of iron and titanium on water content determination by TDR. In: SYMPOSIUM TIME-DOMAIN REFLECTOMETRY APPLICATIONS IN SOIL SCIENCE, 16., 1994, Foulum. **Proceedings...** Lyngby: Danish Institute for Plant and Soil Science, 1995. p. 63- 70.

ROTH, C.H.; MALICKI, M.A. & PLAGGE, R. Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR. **Journal of Soil Science**, v. 43, n. 1, p. 1-13, 1992.

ROTH, C.H. et al. Calibration of time-domain reflectometry for water content measurement using composite dielectric approach. **Water Resources Research**, v. 26, n. 10, p. 2267-2273, 1990.

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

SANTOS, M. R.; ZONTA, J. H.; MARTINEZ, M. A. Influência do tipo de amostragem na constante dielétrica do solo e na calibração de sondas de TDR. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 2, p. 299-308, 2010.

SCHMERTMANN, J. H. **Guidelines for cone penetration test**: performance and design. Gainesville: U.S. Department of Transportation, 1978. Report FHWA-TS-78-209.

SELKER, J. B.; GRAFF, L.; STEENHUIS, T. Noninvasive time domain reflectometry moisture measurement probe. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, n. 4, p. 934-936, 1993.

SIDDIQUI, S. I.; DRNEVIVICH, V. P. **A new method of measuring density and moisture content of soil using the technique of Time Domain Reflectometry**. West Lafayette: Purdue University, 1995. Rep. N° FHWA/IN/JHRP-95/9.

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, 2000.

SIHVOLA, A. **Electromagnetic mixing formulas and applications**. Institute of Electrical Engineers, 1999. IEE electromagnetic waves series, 47.

SILVA, E. L. Determinação automática de teor de água em latossolo roxo distrófico com uso de reflectometria de onda. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas. **Anais...** Lavras: SBEA/UFLA, 1998. p. 154- 156.

SKEMPTON, A. W.; NORTHEY, R. D. The sensitivity of clays. **Géotechnique**, v. 2, n. 1, p. 30-53, 1952.

SKIERUCHA, W.; MALICKI, M. A. Dielectric models: validation in mineral soils. In: 4° WORLD CONGRESS OF SIMULATION SYSTEMS, 4., 2002. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2002. paper 1637, p. 1-9.

SOARES P. C. et al. Ensaio de caracterização estratigráfica do Cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 10, n. 3, p. 177-185, 1980.

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

SOUZA, C. F.; MATSURA, E. E; TESTEZLAF, R. Application of the TDR technique in tropical soil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM AND WORKSHOP ON TIME DOMAIN REFLECTOMETRY FOR INNOVATIVE GEOTECHNICAL APPLICATIONS, 2., Evanston. **Proceedings...** Evanston: Northwestern University, 2001. 1 CD-ROM.

SPAANS, E. J. A.; BAKER, J. M. Simple baluns in parallel probes for time domain reflectometry. **Soil Science Society of American Journal**, v. 57, n. 3, p. 668-673, 1993.

TERZAGHI, K. The shearing resistance of saturated soils and the angle between the planes of shear. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1., 1936. **Proceedings...** Cambridge: International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1936. p 54-56.

TINGA, W. R.; WOSS, W. A. G.; BLOSSEY, D. F. Generalized approach to multiphase dielectric mixture theory. **Journal of Applied Physics**, Argonne, v. 44, n. 9, p. 3897-3902, 1973.

TOMMASELLI, J. T. G. **Influência de algumas características do solo sobre a calibração de um aparelho de TDR (Time Domain Reflectometry)**. 1997. 109 f. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

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, n. 9, p. 1145-1154, 2001.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L. Measurement of soil water content using time-domain reflectometry (TDR): a field evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 49, p. 19–24, 1985.

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

TRINTINALHA, M. A. et al. Efeito da presença de material magnético sobre a medida da umidade, utilizando a técnica de TDR. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 34., 2005, Canoas. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 2005. p. 1-4.

TRINTINALHA, M. A. **Avaliação da técnica de Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) na determinação de umidade em nitossolo vermelho eutroférico**. 2000. 64 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá. 2000.

TURATTI, A. L. et al. Variabilidade espacial de solo e sua implicação na calibração de sondas de nêutrons. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 14, p. 259-262, 1990.

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

VANAPALLI, S.K. et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 33, n. 3, p. 379-392, 1996.

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**, v. 65, n. 1, p. 4-12, 2001.

VAZ, C. M. P.; MATSURA, E.E.; TORRADO, P.V.; BACCHI, O.O.S. Validação de três equipamentos de TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo) para a medida de umidade em solos. Comunicado Técnico 61, ISSN 1517- 4786, 2004.

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**, v. 28, n. 3, p. 295-306, 2005.

VILAR, O. M. **Introdução á mecânica dos solos não saturados**. São Carlos: EESC/USP/Departamento de Geotecnia, 2006. Notas de aula da disciplina de Resistência ao cisalhamento dos solos.

WANG, J. R.; SCHMUGGE, T. J. An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content. **Geoscience and remote sensing**, IEEE Transactions on, vol. GE-18, n.4, p. 288-295, 1980.

WEITZ, A. M. et al. Calibration of time domain reflectometry technique using undisturbed soil samples from humid tropical soils of volcanic origin. **Water Resources Research**, v. 33, n. 6, p. 1241– 1249, 1997.

WHALLEY, W. R. Considerations on the use of time domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content. **Journal of Soil Science**, v. 44, n. 1, p. 1–9, 1993.

WHITE, I.; ZEGELIN S. J. Electric and dielectric methods for monitoring soil-water content. In: WILSON, L.G.; CULLEN, S. J. (Eds). **Handbook of vadose zone characterization and monitoring**. Lewis: Ann Arbor, 1995. p. 343-385

WOBSCHALL, D. A Theory of the complex dielectric permittivity of soil containing water: the semidisperse model. **IEEE Transactions on Geoscience Electronics**, v. 15, n. 1, p. 49-58, 1977.

WROTH, C. P.; HOULSBY, G. T. Soil mechanics – property characterization and analysis procedures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 11., 1985, San Francisco. **Proceedings...** Rotterdam: Balkema, 1985. v. 1, p. 1-55.

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

ZEGELIN, S. J.; WHITE, I.; RUSSELL, G. F. A critique of the time domine reflectometry technique for determining soil-water content. In: TOPP, G. C., REYNOLDS, W. D.; GREEN, R. E. (Eds.). **Advances in measurement of soil physical properties**: bringing theory into practice. Madison: Soil Science Society of America, 1992. Special Publication 30, p. 187-208.