



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia
Campus de Bauru



**PIEZOCONE DE RESISTIVIDADE: PRIMEIROS RESULTADOS
DE INVESTIGAÇÃO GEOAMBIENTAL EM SOLOS TROPICAIS**

HERMES LUIZ BOLINELLI JR

Orientador: Prof. Dr. Heraldo Luiz Giacheti

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia da UNESP - Campus de Bauru,
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Industrial.

**BAURU - SP
Abril - 2004**



PÓS-GRADUAÇÃO
ENGENHARIA MECÂNICA

ATA Nº 053/2004

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE *HERMES LUIZ BOLINELLI JUNIOR*, ALUNO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNESP – CAMPUS DE BAURU.

No dia dois de março de dois mil e quatro, às 14 horas, no anfiteatro do prédio da Pós-graduação da Faculdade de Engenharia da UNESP, Campus de Bauru, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos Professores Doutores: Heraldo Luiz Giacheti do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Bauru, Presidente da Banca, José Augusto de Lollo do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP e Vagner Roberto Elis do Departamento de Geofísica do Instituto Astronômico Geofísico – USP – São Carlos, a fim de proceder a arguição pública da Dissertação de Mestrado do candidato *HERMES LUIZ BOLINELLI JUNIOR*, intitulada “PIEZOCONE DE RESISTIVIDADE: PRIMEIROS RESULTADOS DE INVESTIGAÇÃO GEOAMBIENTAL EM SOLOS TROPICAIS”. O Professor Doutor Heraldo Luiz Giacheti, Presidente da Banca, apresentou o candidato, que dissertou sobre seu trabalho, em quarenta minutos, após, o candidato foi argüido oralmente pelos membros componentes da Comissão Examinadora no tempo regulamentar exigido. Logo após, reuniu-se a Comissão Examinadora, tendo apresentado o conceito final: **APROVADO**. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após, lida e aprovada, será assinada pelos Senhores Membros da Comissão Examinadora. Bauru, 02 de abril de dois mil e quatro. / / / / /

Prof. Dr. Heraldo Luiz Giacheti - Presidente

Prof. Dr. José Augusto de Lollo - Membro

Prof. Dr. Vagner Roberto Elis - Membro

unesp 

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia - Bauru

Av. Engº Luiz Edmundo Carrijo Coube s/nº • Caixa Postal 473 • CEP 17 033-360 • Bauru • SP • Fone: 14 3103 6000 e 14 3103 6108 • Fax: 14 3103 6104
E-mail: spg@feb.unesp.br • home page: www.feb.unesp.br/poste.htm

Ficha catalográfica elaborada por
DIVISÃO TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO
UNESP - Bauru

Bolinelli Junior, Hermes Luiz
Piezocone de resistividade: primeiros
resultados de investigação geoambiental em
solos tropicais / Hermes Luiz Bolinelli Júnior. -
- Bauru : [s.n.], 2004.

147 f.

Orientador: Heraldo Luiz Giacheti.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia de Bauru, 2004.

1. Piezocone de resistividade. 2. Investigação
geoambiental. 3. Geotecnia ambiental. 4. Solos tropicais. I
– Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia
de Bauru. II - Título.

RESUMO

Com o aumento de projetos, nos últimos anos, que envolvem problemas ambientais, a utilização de métodos tradicionais de investigação não tem sido suficientes para atender a todos os requisitos necessários, tanto para a escolha de uma área para a disposição adequada de resíduos industriais, bem como avaliar o passivo de áreas já utilizadas para este fim. Técnicas modernas de investigação, com destaque para a tecnologia do piezocone, tem sido muito utilizadas em países desenvolvidos e no Brasil quase não tem sido empregada para este fim. Objetivou-se, neste trabalho, avaliar as vantagens e limitações do piezocone de resistividade (RCPTU) para a investigação de áreas onde ocorrem solos tropicais: o aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos da cidade de Bauru-SP e do campo experimental do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo (USP) em São Paulo-SP. Ensaio RCPTU também foram realizados na cidade de Paranaguá, no litoral do Paraná, que se trata de uma área com ocorrência de areias sedimentares saturadas. Foram realizadas, preliminarmente, no aterro para resíduos sólidos urbanos e no litoral do Paraná, sondagens de eletrorresistividade de superfície, que serviram para a definição dos locais para a realização das sondagens RCPTU. Essas sondagens foram realizadas a fim de avaliar o desempenho da ferramenta para a identificação do perfil geotécnico, regiões do maciço com presença de contaminantes, posição do nível d'água, estimativa do coeficiente de permeabilidade, informações estas fundamentais em um programa de investigação geoambiental. Foram feitas, também, coletas de amostras de água e de solo em alguns pontos considerados críticos, para análises laboratoriais, utilizando-se amostradores da tecnologia direct-push. Os resultados obtidos mostraram que o piezocone é bastante sensível a mudanças de comportamento das camadas de solo investigadas, mesmo quando atravessa finas camadas de solo, sendo uma ferramenta interessante para detalhamento do perfil. Entretanto, os ábacos tradicionais para a classificação de solos a partir de resultados das sondagens CPTU apresentam limitações para emprego nos solos estudados. Também observou-se que os valores de resistividade, em solos tropicais, são fortemente afetados pelo grau de saturação, gênese do solo, textura e tipo do argilo-mineral. Constatou-se ainda, que a presença de contaminantes no solo dificulta ainda mais a interpretação, uma vez ela é mais um fator que afeta os valores de resistividade, sendo que o conhecimento da geologia local é uma informação bastante útil para auxiliar neste tipo de investigação. Uma limitação dessa técnica é que, em solos tropicais, muitas vezes o nível d'água encontra-se mais profundo que o impenetrável ao piezocone, impossibilitando o uso dessa ferramenta para

avaliação da contaminação na zona saturada, como ocorreu em alguns pontos do aterro sanitário. A partir desse estudo iniciou-se o desenvolvimento de uma metodologia para investigação geoambiental de solos tropicais utilizando-se o piezocone de resistividade, a qual deve ser acompanhada de amostragem de solo e água com amostradores da tecnologia *direct push*.

ABSTRACT

In the last years, as the number of projects which involve environmental problems increases, the usage of traditional investigation methods has not been enough to attend all necessary requirements, both to the appropriate area selection to arrange the industrial waste, and to evaluate the passive of areas already used for this purpose. Modern investigation techniques, highlighting the piezocone technology (CPTU), have been largely used in developed countries and, in Brazil, it almost has not been used. The major goal of this dissertation is to evaluate the advantages and limitations of the resistivity piezocone (RCPTU) to investigate areas where tropical soils occur: a sanitary landfill of the city of Bauru-SP and the experimental research site of the Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Sciences (IAG) of Universidade de São Paulo (USP), in São Paulo-SP. RCPTU tests were also carried out in Paranaguá, State of Paraná's coast, which is an area with saturated sedimentary sands. Firstly, surface electroresistivity soundings were carried in Paraná's coast and in the Bauru sanitary landfill, which were used to define the places to conduct the RCPTU sounding. These soundings were carried out to evaluate the tool for the identification of the geotechnical profile, regions of soil mass presenting contamination, water level position, coefficient of permeability. Such information is fundamental in a geoenvironmental site investigation program. Water and soil samples were also collected for lab analyses from some areas considered critical, by using direct-push technology samplers. The test results show that the piezocone is very sensitive tool to identify changes on the investigated soil layer behavior, even when it goes through thin soil layers, and it is an interesting tool for the profile detail. However, the traditional soil classification system from CPTU sounding presents limitations to be used on the studied soils. It was observed the resistivity values on tropical soils are strongly affected by the soil saturation degree, soil genesis, clay mineral and texture. It was also observed that the presence of contamination in the soil makes the interpretation even more difficult, as it is one more factor, which affects the resistivity values, being the local geology knowledge a very useful information to help the interpretation. An addition limitation on tropical soils is the water level sometimes is deeper than the impenetrable to the piezocone, making the use of this tool to evaluate the contamination in the saturated area impossible, as occurred in some points of the Bauru sanitary landfill. From this research, a methodology for geoenvironmental investigation of tropical soils by using resistivity piezocone test started, which should be conducted with soil and water sampling using direct-push technology samplers do help interpretation.

Aos meus Pais
Hermes Luiz Bolinelli
Maria Ap. M. Bolinelli

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof Dr^o Heraldo Luiz Giacheti pela orientação, dedicação e empenho para a realização deste trabalho.

Agradeço a Prof Dr^a Anna Silvia P. Peixoto pela atenção, incentivo e contribuição que deu para a realização deste trabalho.

Agradeço ao Prof Dr^o Jorge Hamada pelo incentivo e contribuição dado.

Agradeço, de forma muito especial, a Claudete Lopes Barbosa Dias e Cíntia Lopes Dias por toda a paciência, apoio, incentivo, compreensão e companheirismo que sempre me deram.

Agradeço a minha família, especialmente meus irmãos Kátia, João Roberto, Iran e Diego e minha tia Neide, pelo o apoio e incentivo dado.

Agradeço a Engenheira Giuliana Mondelli por todo o companheirismo e contribuição durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a todos os professores e funcionários da Unesp, campus de Bauru, por toda a atenção e apoio recebido.

Agradeço a todos que direta e/ou indiretamente contribuíram para a efetiva realização deste trabalho.

“Se seus feitos não são reconhecidos, lembre-se que o sol todos os dias, ao amanhecer, dá um espetáculo maravilhoso. Mas poucas pessoas estão acordadas para vê-lo.”

ÍNDICE

| | |
|---|-------------|
| RESUMO | iv |
| ABSTRACT | vi |
| AGRADECIMENTOS | viii |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 OBJETIVOS | 3 |
| 2.1 Geral | 3 |
| 2.2 Específicos | 3 |
| 3 REVISÃO DA LITERATURA | 4 |
| 3.1 Solos Tropicais | 4 |
| 3.1.1 Intemperismo em Região de Clima Tropical | 4 |
| 3.1.2 Fatores condicionantes do intemperismo | 4 |
| 3.1.3 Intemperismo físico | 5 |
| 3.1.4 Principais tipos de solos tropicais | 5 |
| 3.2 A investigação Geoambiental | 8 |
| 3.3 Métodos tradicionais de investigação | 9 |
| 3.4 Métodos geofísicos para investigação geoambiental | 12 |
| 3.4.1 Considerações iniciais | 12 |
| 3.4.2 Eletromagnético indutivo (EM) | 14 |
| 3.4.3 Eletrorresistividade (ER) | 15 |
| 3.5 Tecnologia do piezocone | 19 |
| 3.5.1 Considerações iniciais | 19 |
| 3.5.2 Equipamentos | 21 |
| 3.5.3 Tratamento dos dados de ensaio | 23 |
| 3.5.4 O tratamento dos dados e interpretação dos resultados | 25 |
| 3.5.5 Piezocone para estimativa da permeabilidade do solo | 30 |
| 3.6 Piezocone de Resistividade | 35 |
| 3.6.1 Considerações gerais | 35 |
| 3.6.2 O piezocone de resistividade (RCPTU) | 37 |
| 3.6.3 Fundamentos do ensaio RCPTU | 39 |
| 3.6.4 Descrição do dispositivo de medida de resistividade | 41 |
| 3.6.5 Calibração do Piezocone de Resistividade | 43 |
| 3.6.6 Procedimento de Ensaio | 44 |
| 3.6.7 Resultados típicos | 44 |
| 3.6.8 Piezocone na investigação geotécnica de solos tropicais | 46 |
| 3.6.9 Tecnologia do piezocone na investigação geoambiental | 47 |
| 3.6.10 Amostradores | 49 |
| 4 MATERIAIS E MÉTODOS | 53 |
| 4.1 Locais Estudados | 53 |
| 4.1.1 Aterro Sanitário da cidade de Bauru-SP | 53 |
| 4.1.2 Litoral do Paraná - Paranaguá | 65 |
| 4.1.3 Campo experimental do IAG da USP | 68 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.2 | Equipamentos Utilizados | 71 |
| 4.2.1 | Piezocone | 71 |
| 4.2.2 | Piezocone de Resistividade..... | 73 |
| 4.2.3 | O Sistema para calibração e checagem do dispositivo para medida de resistividade | 75 |
| 5 | RESULTADOS E ANÁLISES | 79 |
| 5.1 | Considerações Gerais..... | 79 |
| 5.2 | Calibração e Checagem do Piezocone e Dispositivo Para Medida de Resistividade 79 | |
| 5.2.1 | Resultados | 79 |
| 5.2.2 | Análise dos resultados | 82 |
| 5.3 | Aterro Sanitário da cidade de Bauru..... | 83 |
| 5.3.1 | Resultados | 83 |
| 5.3.2 | Análise dos Resultados | 94 |
| 5.4 | Litoral do Paraná..... | 108 |
| 5.4.1 | Resultados | 108 |
| 5.4.2 | Análise dos Resultados | 111 |
| 5.5 | Campo Experimental do IAG da USP | 117 |
| 5.5.1 | Resultados | 117 |
| 5.5.2 | Análise dos Resultados | 122 |
| 6 | CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE ... | 131 |
| 6.1 | Conclusões | 131 |
| 6.2 | Sugestões para continuidade..... | 135 |
| 7 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 136 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 3.1: Perfil esquemático do subsolo em região de clima tropical (Nogami & Villibor, 1996) | 6 |
| Figura 3.2: Arranjo de campo - sondagem elétrica vertical Schlumberger (Elis, 1993) | 17 |
| Figura 3.3: Disposição no campo do arranjo Dipolo-Dipolo - Caminhamento Elétrico. (Elis, 1993) | 19 |
| Figura 3.4 Desenho esquemático para CPTU e terminologia utilizada (Quaresma et al, 1996). | 20 |
| Figura 3.5: Esquema de um cone elétrico de atrito convencional (Schaap e Zuidberg, 1982 in Quaresma et al., 1996). | 22 |
| Figura 3.6: Localização do redutor de atrito (SGI, 1995). | 23 |
| Figura 3.7: Fator de áreas desiguais. Poro-pressão influenciando a medida da resistência de ponta (Quaresma et al., 1996). | 24 |
| Figura 3.8: Carta de classificação de solos utilizando CPT elétrico (Robertson et al., 1986). .. | 26 |
| Figura 3.9 Correlação empírica de permeabilidade Robertson et al. (1992) | 32 |
| Figura 3.10 Estimativa direta de C_h a partir de t_{50} Robertson et al. (1992) | 33 |
| Figura 3.11: Relação entre a resistência de ponta q_c e o módulo confinado para areias normalmente consolidadas (Baldi et al, 1981 in Robertson e Campanella, 1983) | 35 |
| Figura 3.12: Desenho esquemático de um RCPTU (Davies & Campanella, 1995). | 42 |
| Figura 3.13: Dispositivo para medida de resistividade com quatro eletrodos, utilizado pelo ISTG UBC, ao lado do utilizado por esse grupo para estudo de espaçamento entre eletrodos (Giacheti, 2001). | 42 |
| Figura 3.14 Valores típicos de resistividade obtidas com o dispositivo de medida de resistividade, para uma areia limpa típica de países de clima temperado (Campanella, 1998) | 48 |
| Figura 3.15: Desenho esquemático de um amostrador de solo com tubo de plástico para uso na investigação geoambiental (Giacheti, 2001) | 50 |
| Figura 3.16 Amostrador direct-push. (Giacheti, 2001). | 52 |
| Figura 4.1: Localização da cidade de Bauru, onde se localiza o aterro para resíduos sólidos estudado. | 54 |
| Figura 4.2: Localização dos diversos ensaios realizados na área do aterro para resíduos sólidos urbanos de Bauru. | 57 |
| Figura 4.3: Direção e detalhe do perfil representativo do aterro de Bauru com base nos dados do EIA-RIMA (FIPAI, 1992) (a) e Localização das sondagens SPT na área do Aterro Sanitário de Bauru (b). | 59 |
| Figura 4.4 Localização das linhas e pontos de ensaio na área do aterro (Elis, 2001). | 62 |
| Figura 4.5 Localização dos ensaios CPTU e RCPTU executados no aterro de Bauru. | 63 |
| Figura 4.6 Localização da cidade de Paranaguá e local dos ensaios realizados | 66 |
| Figura 4.7 Localização das linhas de geofísica de superfície e dos ensaios RCPTU executados no litoral do Paraná. | 67 |
| Figura 4.8 localização da cidade de São Paulo, centro urbano em que foram realizados os ensaios de RCPTU | 69 |
| Figura 4.9 Localização do campo experimental do IAG no interior do campus da USP, local dos ensaio RCPTU | 69 |
| Figura 4.10 Localização dos ensaios RCPTU no campo experimental do IAG da USP | 70 |
| Figura 4.11: Esquema representativo do arranjo Werner (Elis, 1993) | 73 |
| Figura 4.12 Esquema do piezocone e dispositivo para medida de resistividade (RCPTU) utilizado neste trabalho | 74 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.1: Calibração do dispositivo de medida de resistividade. Faixa de valores de resistividade: 2 a 5.000 ohm.m. | 80 |
| Figura 5.2 Calibração do dispositivo de medida de resistividade. Faixa de valores de resistividade: 2 a 300 ohm.m | 83 |
| Figura 5.3: Pseudo-seções da Linhas 4 nas suas duas campanhas de eletrorresistividade de superfície realizados no aterro de Bauru (Elis, 2001). | 84 |
| Figura 5.4: Mapa de resistividade aparente do nível teórico 10 m (Elis, 2001). | 84 |
| Figura 5.5: Resultados do ensaio CPTU 01 realizado a montante do aterro. | 86 |
| Figura 5.6: Resultados do ensaio CPTU 02 realizado na área do aterro. | 86 |
| Figura 5.7: Resultados dos ensaios CPTU 03, RCPTU 04, 05, 06 e 11 realizados a jusante do aterro, no entorno do poço de monitoramento temporário PMT03. | 87 |
| Figura 5.8: Resultados dos ensaios CPTU 04, RCPTU 01, 02, 03 e 09 realizados a jusante do aterro, no entorno do poço de monitoramento temporário PMT04. | 87 |
| Figura 5.9: Resultados dos ensaios RCPTU 08, 14 e 15 realizados a jusante, próximas aos limites da área aterro. | 88 |
| Figura 5.10: Resultados dos ensaios RCPTU 07 e 10 realizados a jusante, próximos à erosão existente na área de drenagem. | 88 |
| Figura 5.11: Resultados dos ensaios RCPTU 12, 13 e 16 realizados na área localizada fora do aterro. | 89 |
| Figura 5.12: Resultados da dissipação da poro-pressão no ensaio RCPTU 4, profundidade 9,50m, em camada de areia siltosa a silte arenoso interpretada segundo o ábaco de Robertson et al. (1986). | 90 |
| Figura 5.13 :Resultados da dissipação da poro-pressão no ensaio RCPTU 6, profundidade 5,15m, em camada de argila interpretada segundo o ábaco de Robertson et al. (1986). | 90 |
| Figura 5.14 Resultados da dissipação da poro-pressão no ensaio RCPTU 8, profundidade 8,06m, em camada identificada como silte arenoso a silte argiloso interpretada segundo o ábaco de Robertson et al. (1986) | 91 |
| Figura 5.15 Perfil geotécnico esquemático, interpretado com base nos resultados de ensaios RCPTU executados no aterro de Bauru, á jusante, no local onde foram instalados os poços temporários de monitoramento. | 96 |
| Figura 5.16 Resultados do ensaio CPTU 04 executado no aterro de Bauru e posição do nível d'água. | 97 |
| Figura 5.17: Influência do teor de umidade nos valores de resistividade do ensaio RCPTU 11 realizado no aterro de Bauru | 100 |
| Figura 5.18 Comparação entre os valores de resistividade em ensaios RCPTU feitos em diferentes épocas do ano, com diferentes índices pluviométricos. | 101 |
| Figura 5.19 Efeito da variação do grau de saturação nos valores de resistividade (Daniel et al., 2002) | 102 |
| Figura 5.20 Curva de dissipação de poro-pressão ajustada para o ensaio RCPTU 4, realizado no aterro de Bauru, com filtro de poroso saturado com graxa, e curva teórica proposta por Houlsby & Teh (1988). | 104 |
| Figura 5.21: Curva de dissipação de poro-pressão ajustada para o ensaio RCPTU 6, realizado no aterro de Bauru, com o elemento poroso saturado com graxa, e curva teórica proposta por Houlsby & Teh (1988). | 104 |
| Figura 5.22 Curva de dissipação de poro-pressão ajustada para o ensaio RCPTU 8, realizado no aterro de Bauru, com o elemento poroso saturado com graxa, e curva teórica proposta por Houlsby & Teh (1988). | 105 |
| Figura 5.23 Resultados do ensaio RCPTU 13 executado no aterro de Bauru e pontos de coleta de água e solo. | 106 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.24 Resultados do ensaio RCPTU 15 executado no aterro de Bauru e pontos de coleta de água e solo..... | 107 |
| Figura 5.25 Resistividade modelada na L-3, com indicação dos ensaios do RCPTU 1 e RCPTU 2 executados no litoral do Paraná. | 108 |
| Figura 5.26 Resistividade modelada na L-5, com indicação dos ensaios do RCPTU 3 e RCPTU 4 executados no litoral do Paraná | 109 |
| Figura 5.27 Resultados do ensaio RCPTU 1 realizado no litoral do Paraná. | 109 |
| Figura 5.28 Resultados do ensaio RCPTU 2 realizado no litoral do Paraná. | 110 |
| Figura 5.29 Resultados do ensaio RCPTU 3 realizado no litoral do Paraná. | 110 |
| Figura 5.30 Resultados do ensaio RCPTU 4 realizado no litoral do Paraná. | 111 |
| Figura 5.31 Resultados dos ensaios RCPTU 1 e RCPTU 2 executados no litoral do Paraná | 113 |
| Figura 5.32 Identificação da posição do nível d'água no litoral do Paraná a partir do registro do excesso de poro-pressão e com a utilização do dispositivo de medida de resistividade | 114 |
| Figura 5.33 Resultados dos ensaios RCPTU 3 e RCPTU 4 executados no litoral do Paraná | 115 |
| Figura 5.34 Perfil interpretado com base nos resultados dos ensaios RCPTU 01 e RCPTU 02 executados no litoral do Paraná | 116 |
| Figura 5.35 Perfil interpretado com base nos resultados dos ensaios RCPTU 03 e RCPTU 04 executados no litoral do Paraná | 116 |
| Figura 5.36 Representação esquemática do provável limite de intrusão de água salina no litoral do Paraná, com base nos resultados dos ensaios RCPTU, informações locais e teor de sais dos poços de monitoramento..... | 117 |
| Figura 5.37 Resultados do ensaio RCPTU 01 realizado no campo experimental do IAG-USP | 118 |
| Figura 5.38 Resultados do ensaio RCPTU 02 realizado no campo experimental do IAG-USP | 118 |
| Figura 5.39 Resultados do ensaio RCPTU 03 realizado no campo experimental do IAG-USP | 119 |
| Figura 5.40 Resultados do ensaio RCPTU 04 realizado no campo experimental do IAG-USP | 119 |
| Figura 5.41 Resultados dos ensaios RCPTU 05 e 05a realizados no campo experimental do IAG-USP..... | 120 |
| Figura 5.42: Resultado da dissipação do excesso de poro-pressão no ensaio RCPTU 2 realizado no campo experimental do IAG-USP, em camada de argila..... | 121 |
| Figura 5.43: Resultado da dissipação do excesso de poro-pressão no ensaio RCPTU 3 realizado no campo experimental do IAG-USP, em camada de argila..... | 121 |
| Figura 5.44 Calibração do dispositivo de medida de resistividade, valores na faixa de 2 a 100 ohm.m, com isolamento danificado | 125 |
| Figura 5.45 Resultados dos ensaios de perfilagem elétrica (Porsani et al., 2003b) e resultados dos ensaios RCPTU executados no IAG da USP | 126 |
| Figura 5.46 Perfil representativo da área investigada no campo experimental do IAG da USP (Porsani et al., 2003b) com os resultados dos ensaios RCPTU executados. | 127 |
| Figura 5.47 Ensaio RCPTU executados no campo experimental do IAG da USP | 129 |
| Figura 5.48: Curva de dissipação de poro-pressão ajustada do ensaio RCPTU 2, realizado no IAG-USP, com elemento poroso saturado com glicerina, e curva teórica proposta por Houlby & Teh (1988)..... | 130 |
| Figura 5.49: Curva de dissipação de poro-pressão ajustada do ensaio RCPTU 3, realizado no IAG-USP, com elemento poroso saturado com graxa, e curva teórica proposta por Houlby & Teh (1988)..... | 130 |

LISTA DE FOTOS

| | |
|---|----|
| Foto 3.1 Trado tipo cavadeira (Giacheti, 2001)..... | 11 |
| Foto 3.2: Piezocone com medida de poro-pressão atrás da ponta (U_2) (Giacheti, 2001). | 21 |
| Foto 3.3: Dispositivo para medida de resistividade acoplado a piezocone da Unesp-Bauru. .38 | |
| Foto 3.4 Detalhe do dispositivo para medida de resistividade acoplado ao piezocone (RCPTU) da Unesp Bauru | 43 |
| Foto 3.5: Amostrador de solo <i>direct push</i> | 49 |
| Foto 3.6: Amostra de solo coletada, em <i>liner</i> de amostrador da tecnologia <i>direct-push</i> | 50 |
| Foto 3.7: Penetração de amostrador de água <i>direct-push</i> sendo executado no campo (www.geoprobe.com) | 51 |
| Foto 3.8: Filtro do amostrador de água <i>direct-push</i> | 52 |
| Foto 4.1: Foto aérea (de 1996) do local de implantação do aterro de Bauru. | 55 |
| Foto 4.2: Vista do aterro de Bauru (Julho/2003) em que se observa, em primeiro plano, a 1ª Camada de disposição de resíduos. | 55 |
| Foto 4.3: Detalhe do resistivímetro utilizado no Aterro de Bauru-SP por técnicos do IAG da USP. | 60 |
| Foto 4.4: Detalhes do resistivímetro utilizado no momento da realização da 1ª campanha de Geofísica, no aterro de Bauru, realizada por técnicos do IAG da USP. | 60 |
| Foto 4.5: Ensaio de Eletrorresistividade de Superfície pela técnica do Caminhamento Elétrico Dipolo-Dipolo, sendo executada no aterro de Bauru..... | 61 |
| Foto 4.6: Amostragem de água na área do aterro de Bauru utilizando o Geoprobe®..... | 64 |
| Foto 4.7: Amostragem de solo utilizado no aterro de Bauru utilizando o Geoprobe®. | 64 |
| Foto 4.8: Perfuração do poço temporário de monitoramento no aterro de Bauru | 65 |
| Foto 4.9: Detalhe de um dos poços temporários de monitoramento instalado no aterro de Bauru..... | 65 |
| Foto 4.10: Piezocone sem fio com filtro com cavidade utilizado nas sondagens CPTU..... | 72 |
| Foto 4.11: Penetrômetro multi-função utilizado nos ensaios com piezocone durante ensaio no aterro de Bauru..... | 72 |
| Foto 4.12 Detalhe do piezocone e dispositivo para medida de resistividade (RCPTU) utilizado neste trabalho. | 74 |
| Foto 4.13: Detalhe da sondagem com piezocone de resistividade sendo realizada na área do aterro de Bauru..... | 75 |
| Foto 4.14: Sistema de calibração do dispositivo para medida de resistividade acoplado ao piezocone. | 77 |
| Foto 4.15: Tela principal do programa de aquisição de dados do ensaio de piezocone de resistividade. | 77 |
| Foto 4.16 Detalhe da instalação do piezocone de resistividade no reservatório de água para calibração do seu dispositivo para medida de resistividade. | 78 |
| Foto 4.17: Condutivímetro Thermo-Orion modelo 115 utilizado na calibração do dispositivo para medida de resistividade..... | 78 |
| Foto 4.18: Sistema de Aquisição de dados utilizado na calibração do dispositivo para medida de resistividade | 78 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 3.1: Fator tempo T^* para análise dos ensaios de dissipação (Houlsby & Teh, 1988) ... | 33 |
| Tabela 3.2 Valores de α para a estimativa do módulo de confinado para argilas (Mitchell e Gardner, 1975) | 34 |
| Tabela 3.3: Valores de resistividade elétrica de materiais conhecidos, Elis (1993)..... | 37 |
| Tabela 3.4: Resumo com valores típicos de resistividade (condutividade) com misturas de solo e fluidos (Davies & Campanella, 1995)..... | 45 |
| Tabela 4.1 Resultados dos ensaios de caracterização granulométrica e táctil-visual da área do aterro para resíduos sólidos urbanos de Bauru (FIPAI, 1992)..... | 58 |
| Tabela 5.1 Resumo dos resultados de calibração para o piezocone utilizado. | 79 |
| Tabela 5.2 Resumo da calibração do dispositivo de medida de resistividade acoplado ao piezocone utilizado. | 80 |
| Tabela 5.3 Resultados da calibração, em laboratório, do dispositivo de medida de resistividade acoplado ao piezocone utilizado. | 81 |
| Tabela 5.4 Diferenças relativas máxima, mínima e médias das leituras de U , q_c e f_s para o piezocone utilizado | 82 |
| Tabela 5.5 Coeficiente de permeabilidade determinado a partir dos resultados dos ensaios de dissipação | 91 |
| Tabela 5.6: Quadro-resumo identificando as amostras de solo coletadas com Geoprobe® e o teor de umidade das mesmas | 92 |
| Tabela 5.7: Quadro-resumo identificando as amostras de água coletadas com Geoprobe®.... | 92 |
| Tabela 5.8: Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica..... | 93 |
| Tabela 5.9 Resultados dos ensaios de caracterização da atividade das argilas segundo Lautrin (1989)..... | 94 |
| Tabela 5.10: Cálculo do coeficiente de permeabilidade com base nos resultados dos ensaios de dissipação do excesso de poro-pressão nos ensaios RCPTU 2 e RCPTU 3, executados em camadas argilosas, no IAG -USP..... | 120 |
| Tabela 5.11 Resultados da calibração do dispositivo para medida de resistividade para faixa entre 2 e 100 ohm.m com o isolamento danificado | 124 |

SIGLAS E ABREVIATURAS

| Sigla | Descrição |
|--------------|---|
| ABEF | - Associação Brasileira de Engenharia de Fundações |
| ABGE | - Associação Brasileira para Geologia de Engenharia e Meio Ambiente |
| ABMS | - Associação Brasileira de Mecânica dos Solos |
| ABNT | - Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| APL | - Aqueous Phase Liquids |
| ASCE | - American Society of Civil Engineers |
| ASTM | - American Society for Testing and Materials |
| BSTSP | - Bacia Sedimentar Terciária de São Paulo |
| CESP | - Companhia Energética de São Paulo |
| CPT | - Ensaio de Penetração do Cone |
| CPTU | - Ensaio de Penetração do Piezocone |
| EESC | - Escola de Engenharia de São Carlos |
| EPUSP | - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo |
| FE | - Faculdade de Engenharia da Unesp de Bauru |
| ICSMFE | - International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering |
| ISSMFE | - International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering |
| NAPL | - Non-Aqueous Phase Liquid |
| RCPTU | - Piezocone de Resistividade |
| SEFE | - Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia |
| SPT | - Sondagem de Simples Reconhecimento (<i>Standard Penetration Test</i>) |
| SPT-T | - Sondagem de Simples Reconhecimento Medida de Torque |
| UBC | - University of British Columbia |
| Unesp | - Universidade Estadual Paulista |
| USP | - Universidade de São Paulo |

SÍMBOLOS

| Símbolo | Descrição |
|----------------|---|
| ϕ | - Ângulo de Atrito |
| ε | - Deformação Específica |
| ψ | - Parâmetro de Estado das Areias |
| ρ | - Módulo de Resistividade |
| ϕ' | - Ângulo de Atrito Interno Efetivo |
| σ'_{ad} | - Tensão de Pré-Adensamento |
| σ'_v | - Tensão Normal Efetiva |
| σ'_{vo} | - Tensão Geostática Efetiva |
| ρ_b | - Módulo de Resistividade do Solo |
| γ_d | - Peso Específico Seco |
| ρ_{nat} | - Massa Específica do Solo |
| ρ_f | - Módulo de Resistividade do Fluido |
| σ'_m | - Tensão Octaédrica |
| γ_{nat} | - Peso Específico do Solo |
| σ'_r | - Tensão Radial <i>In-Situ</i> |
| γ_s | - Peso Específico dos Sólidos |
| ΔU | - Excesso de Poro-Pressão Medida Atrás da Ponta |
| σ_{vo} | - Tensão Geostática Vertical Total |
| σ'_{vo} | - Tensão Geostática Vertical Efetiva |
| ϕ_{cone} | - Diâmetro do cone |
| ϕ_e | - Diâmetro a frente da ponta da estaca |
| ΔU | - Excesso de Poro-Pressão Gerada Durante a Penetração |
| a | - Fator de Áreas Desiguais (A_n/A_t) |
| A | - Área da Seção Transversal |
| a_m | - Constantes da Lei de Archie para um Dado Solo |
| A_c | - Atividade Coloidal |
| B_q | - Índice de Poro-Pressão |
| c | - Coesão |
| C | - Condutividade Elétrica |
| C_c | - Índice de Compressão |
| c_h | - Coeficiente de Adensamento na Direção Horizontal |
| c_v | - Coeficiente de Adensamento |

| | | |
|-----------|---|---|
| cv | - | Coeficiente de Variação |
| d | - | Diâmetro do Amostrador |
| Dr | - | Densidade Relativa |
| e | - | Índice de Vazios |
| E | - | Módulo de Elasticidade ou de Deformabilidade |
| e_0 | - | Índice de Vazios Inicial |
| E_0 | - | Energia Teórica do Martelo no Ensaio SPT |
| e_i | - | Índice de Vazios Antes da Inundação |
| Fc | - | Fator de Formação Intrínseco |
| f_r | - | Adesão Solo-Amostrador Calculado a Partir do Torque |
| g | - | Aceleração da Gravidade |
| Gama | - | Peso Específico do Solo |
| g_m | - | Grandeza Medida |
| G_{max} | - | Módulos de Cisalhamento Máximo |
| g_r | - | Grandeza de Referência |
| i | - | Corrente Elétrica |
| IP | - | Índice de Plasticidade |
| K_0 | - | Coeficiente de Empuxo em Repouso |
| Kd | - | Índice de Tensão Horizontal |
| k | - | Coeficiente de Permeabilidade |
| k_h | - | Coeficiente de Permeabilidade na Direção Horizontal |
| k_{res} | - | Constante do Módulo de Resistividade, Função da geometria do par de Eletrodos |
| k_v | - | Coeficiente de Permeabilidade na Direção Vertical |
| l | - | Comprimento |
| L/D | - | Relação entre Comprimento e Diâmetro |
| LA' | - | Solo arenoso de Comportamento Laterítico |
| LG' | - | Solo Argiloso de Comportamento Laterítico |
| LL | - | Limite de Liquidez |
| LP | - | Limite de Plasticidade |
| M | - | Módulo de Deformabilidade Confinado |
| N | - | Resistência à Penetração |
| n | - | Porosidade do Solo |
| N_{60} | - | Resistência à Penetração para Eficiência de 60% |
| NA | - | Nível D'água |
| NA' | - | Solo Arenoso de Comportamento Não Laterítico |
| Neq | - | Resistência à Penetração Equivalente ao Valor Numérico Igual a T/1,2 |
| NG' | - | Solo Argiloso de Comportamento Não Laterítico |

| | |
|-------|---|
| OCR | - Razão de Sobre-Adensamento |
| q_c | - Resistência de Ponta Obtida Através do Ensaio CPT |
| q_t | - Resistência de Ponta Corrigida, Obtida Através do Ensaio CPTU |
| R | - Resistência elétrica |
| R_c | - Resistência à Compressão Simples |
| R_f | - Razão de Atrito |
| S_r | - Grau de Saturação |
| S_t | - Sensibilidade |
| S_u | - Resistência ao Cisalhamento Não Drenada |
| U_1 | - Poro Pressão Gerada na Ponta do Cone |
| U_2 | - Poro-Pressão Gerada Imediatamente Atrás da Ponta do Cone |
| U_3 | - Poro-Pressão Gerada Imediatamente Atrás da Luva de Atrito |
| U_0 | - Poro-Pressão de Equilíbrio |
| V | - Voltagem |
| z | - Profundidade |

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem ocorrido um aumento contínuo do número de projetos que envolvem a presença de algum tipo de contaminante no subsolo. Com a publicação da Lei 9.605 - Lei dos Crimes Ambientais de 12/02/1998, essa preocupação com a contaminação do subsolo passou a ser fator determinante para a escolha de áreas para a disposição de rejeitos industriais, bem como para a caracterização do passivo ambiental de órgãos públicos e empresas privadas, objetivando a elaboração de critérios para prevenção e recuperação de áreas. Essa crescente preocupação com a proteção ambiental tem exigido novas técnicas para investigação, caracterização e monitoramento geoambiental do subsolo pela engenharia geotécnica, procurando desenvolver instrumentos e técnicas de investigações melhores e mais seguras.

Neste contexto, a tecnologia do piezocone tem apresentado, nos países da Europa e EUA, resultados promissores sendo que no Brasil essa tecnologia pouco foi aplicada. Como a atenuação dos contaminantes no solo é influenciada pelas propriedades físicas, químicas e biológicas destes solos, e sendo considerado que hoje são empregados métodos tradicionais de investigação com pouca padronização, que não permitem a obtenção de valores confiáveis e que geram volumes consideráveis de material contaminado para a sua realização, tem-se na tecnologia do piezocone uma alternativa interessante para esse fim, sendo necessário à aplicação dessa tecnologia em solos tropicais para sua avaliação.

A investigação geotécnica objetiva definir as características do subsolo, tendo para isso uma ampla opção de ensaios laboratoriais e de campo. Se o primeiro oferece, como vantagens, o controle das condições de ensaio, permitindo ao engenheiro a execução de simulações; os ensaios *in situ*, mais rápidos e econômicos, ampliam a gama destes testes e, como consequência, propiciam uma caracterização mais detalhada do subsolo, além de refletirem melhor a condição real do solo.

A ocupação de áreas para a instalação de indústrias, áreas para disposição de resíduos, a busca de fontes potáveis de água, entre outros, tem levado a engenharia geotécnica a desenvolver ferramentas que possam oferecer respostas às novas necessidades vigentes. Assim, novas técnicas para investigação do subsolo, onde a presença de contaminantes é a principal variável a ser avaliada, passaram a ser desenvolvidas, procurando identificar o tipo, quantidade, o caminhamento e atenuação através do subsolo, sem que o operador ou o ambiente ficasse exposto a esse material desnecessariamente, como também para caracterizar novas áreas para futuros projetos.

No Brasil, país de clima tropical, cresce a necessidade de se avaliar uma metodologia de investigação geoambiental mais adequada às rigorosas exigências ambientais atuais, sendo que o estudo da aplicação da tecnologia do piezocone em solos característicos deste clima, em especial o piezocone de resistividade, apresenta-se como uma alternativa interessante para esse fim.

O piezocone é uma ferramenta largamente utilizada para a investigação de solos sedimentares, sendo especialmente empregada para a definição do perfil geotécnico do solo, principalmente a identificação de camadas argilosas e arenosas. Além do perfil geotécnico, o piezocone possibilita a estimativa de parâmetros do solo, tais como o seu histórico de tensões e condições hidrogeológicas, variáveis importantes para a caracterização de uma área.

Mais recentemente, outros dispositivos têm sido acoplados ao piezocone, possibilitando a obtenção de uma quantidade maior de informações a partir desses ensaios, principalmente para a investigação geoambiental. A tecnologia do piezocone (que inclui o próprio piezocone, sensores específicos e amostradores de solo, água e gás), é ideal para esse fim, porque minimiza uma possível contaminação do aquífero provocada pelo próprio ensaio, reduz a exposição do operador ao material investigado e não gera resíduos. As leituras de poro-pressão durante os ensaios possibilitam identificar com detalhe camadas de argila e areias, e o ensaio de dissipação do excesso de poro-pressão gerada na penetração permite a estimativa do coeficiente de permeabilidade, parâmetro importante para o melhor entendimento do fluxo subterrâneo e do transporte de massa em estudos geoambientais.

Além das tradicionais medidas de resistência de ponta, atrito lateral e poro-pressão, o piezocone é um excelente veículo para transportar outros dispositivos para o subsolo, como por exemplo o de resistividade, provocando menores distúrbios ao solo quando comparados com outros métodos tradicionais de investigação. O dispositivo para medida de resistividade foi desenvolvido para detectar mudanças nas propriedades de condutividade (ou seu inverso, resistividade) elétrica nos solos. Em geral as areias apresentam alta resistividade e as argilas baixa resistividade. Na investigação geoambiental é necessário a definição do perfil geotécnico e das condições hidrogeológicas, bem como a detecção da extensão e magnitude das zonas contaminadas. Como a possibilidade de ocorrência de materiais perigosos é muito alta, o desenvolvimento de técnicas que permitam a segura obtenção de amostras de água e solo até a superfície são necessárias e a resistividade auxilia na definição das regiões críticas onde a amostragem devem ser feita.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

O objetivo deste trabalho é avaliar a aplicação do piezocone de resistividade para a investigação geoambiental de solos tropicais, a partir de ensaios de geofísica, amostragem de água e solo e sondagens RCPTU realizadas em três áreas com características distintas: um aterro sanitário; um solo sedimentar onde ocorre a intrusão de água salina no aquífero e o campo experimental do IAG-USP onde ocorre solo típico da Bacia Sedimentar Terciária de São Paulo (BSTSP).

2.2 Específicos

- Avaliar a utilização do piezocone para a identificação de perfil geotécnico;
- Avaliar a utilização do piezocone para a estimativa do coeficiente de permeabilidade do solo, através da análise dos resultados de ensaios de dissipação de poro-pressão;
- Avaliar a viabilidade da utilização do dispositivo de medida de resistividade acoplado ao piezocone, para a identificação do perfil geotécnico, definição da posição do nível d' água e a determinação de pontos específicos para a coleta de água e solo;
- Avaliar as vantagens e limitações do emprego de amostradores da tecnologia *direct-push* para investigação geoambiental de solos tropicais.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Solos Tropicais

As condições climáticas apresentam grande influência na formação dos solos. As regiões de climas tropicais apresentam peculiaridades que fazem com que o solo destes locais apresente gênese e comportamento diferente dos solos de regiões de clima temperado. Toda a teoria da mecânica de solos foi desenvolvida com base em experimentos realizados neste tipo de solo (também chamado de podzólicos) que são encontrados com mais frequência em países como os Estados Unidos e da Europa, o que leva a diferenças quando aplicada nos solos de países de clima tropical (de comportamento laterítico) mais comuns em países como o Brasil, África e Austrália. Neste capítulo se fará uma breve apresentação dos solos de países de clima tropical.

3.1.1 Intemperismo em Região de Clima Tropical

No solo as propriedades físicas, químicas e mineralógicas da rocha que o origina se alteram, progressivamente, de baixo para cima, até atingir a camada superficial, sempre buscando atingir o equilíbrio com as condições ambientais locais vigentes. Sobre essa camada superficial atuam os processos de intemperismo, sendo o estudo desses processos responsáveis pela formação da gênese do solo, cujo entendimento é de suma importância aos tópicos ligados à engenharia e, é claro, ao meio-ambiente (Porto, 1996).

Esta importância é especialmente marcante nas regiões chamadas de tropicais, assim entendido as regiões que se localizam entre os trópicos de Câncer e Capricórnio, que se caracterizam pela suas altas temperatura e umidade. Nestas regiões a degradação química é acelerada, podendo resultar em solos de algumas dezenas de metros de espessura. A importância dos solos tropicais vem sendo objeto de estudo no meio científico, onde podemos observar uma serie de trabalhos mais recentes que apresentam uma sistemática multidisciplinar a esse tema, onde pode-se citar: Nogami & Villibor (1987), Giacheti (1991), Fookes (1990) citado por Porto (1996), entre outros.

Neste item serão focalizados os processos de formação dos solos tropicais visto ter sido este trabalho desenvolvido em solo representativo desta região.

3.1.2 Fatores condicionantes do intemperismo

Podemos dividir em 2 grandes grupos os fatores que condicionam o intemperismo de uma maneira geral: endógenos e exógenos. Os fatores endógenos estão diretamente

relacionados à composição mineralógica do solo e à tectônica associada, já que esta influencia no seu grau de alteração, de acordo com a sua susceptibilidade de alteração dos minerais. Esta susceptibilidade depende da ligação entre os íons que é mais forte naqueles com maior carga e menor raio atômico. Assim, os íons Si^{+4} e Al^{+3} formam ligações mais fortes do que os íons como o Mg^{+2} , Fe^{+2} , Ca^{+2} , Na^{+} , K^{+} (Porto, 1996). Já os planos de fratura ou clivagem podem facilitar o acesso de fluidos intempéricos, sendo que áreas de muita atividade tectônica tendem a gerar solos mais espessos. Os fatores exógenos dependem basicamente das condições climáticas. Clima quente e úmido, com cobertura vegetal exuberante, favorece a formação de solos espessos, através de ácidos orgânicos que facilitam o intemperismo químico. A ação física das raízes também induz ao fraturamento e acesso aos fluidos, além de proteger o solo da ação erosiva. O regime hidrológico também pode favorecer a formação de espessas camadas de solo em situações de livre circulação de fluidos e constante lixiviação (Porto, 1996).

3.1.3 Intemperismo físico

Estes são subordinados aos processos químicos de alteração da rocha em regiões de clima tropical, tendo estas regiões, como características, elevadas precipitações atmosféricas e temperatura, esta última um importante fator de aumento de íons na água de percolação (Nogami & Villibor, 1996). Esse intenso intemperismo ocasiona a formação de camadas mais espessa de material inconsolidado, sendo que o fraturamento das rochas também é mais intenso nessas regiões que nas regiões temperadas, devido a altas temperaturas (Nogami & Villibor, 1996).

Uma das características que mais é influenciada pelo clima na formação de solos é quanto ao tipo do argilo-mineral resultante. Em climas áridos, a lixiviação da camada superficial conduz a uma fraca perda de íons Si^{+4} e Ca^{+2} , o que contribui para a gênese das montmorilonitas. Sob Clima temperado a perda de Si^{+4} é mais acentuada, podendo formar argilo minerais do grupo das vermiculitas, ilitas, montmorilonitas, dependendo do meio ser bem, médio ou mal drenado, respectivamente. Se o meio for ácido esses minerais por sua vez, se transformarão em caulinitas (Nogami & Villibor, 1996).

3.1.4 Principais tipos de solos tropicais

A pedologia é o estudo das transformações da superfície dos depósitos geológicos, o que originam horizontes distintos, podendo ocorrer tanto em solo transportado como em solo residual. Os fatores que determinam as propriedades dos solos considerados na pedologia são:

rocha-mater, clima e vegetação, organismos vivos, topografia e o tempo de exposição a todos estes fatores. Na regiões de clima tropical encontramos, como principais tipos genéticos, os solos de comportamento laterítico, os saprolíticos e os transportados (Figura 3.1) (Nogami & Villibor, 1996).

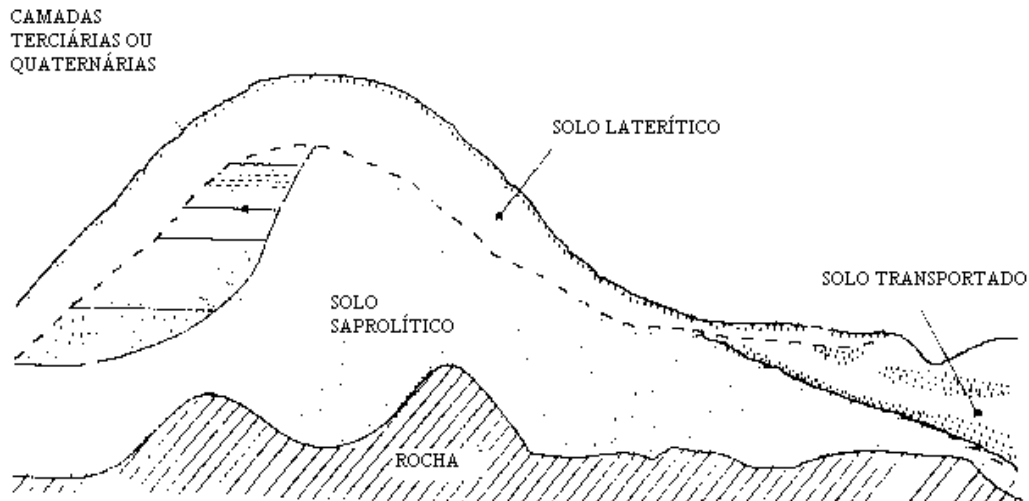


Figura 3.1: Perfil esquemático do subsolo em região de clima tropical (Nogami & Villibor, 1996)

a. Solos Lateríticos

Os solos de comportamento laterítico são solos típicos da evolução destes em regiões de clima quente, com regime de chuvas moderadas a intensas. O termo laterito foi originalmente definido por Buchana em 1807, na Índia para descrever um material avermelhado e endurecido, utilizado para construção. O termo laterito passou a ser, mais recentemente, entendido para abranger o perfil laterítico como um todo, sendo que a denominação laterítico se incorporou na terminologia dos engenheiros (Porto, 1996). As características para um solo ser considerado laterítico são (Nogami & Villibor, 1996):

- Solo pedologicamente evoluído;
- Pertencer aos horizontes A ou B (pedológico) de perfis bem drenados, desenvolvido sobre clima tropical úmido;
- A fração argila for constituída essencialmente de argilo-minerais do grupo das caulinitas e por hidróxidos hidratados de ferro e alumínio. Estes componentes são agrupados numa estrutura porosa peculiar, agregada de forma muito instável.

Incluem quase toda a totalidade dos solos superficiais das regiões tropicais e dos materiais concrecionados. Correspondem em pedologia, a diferentes tipos de materiais e

formações superficiais, apresentando gêneses diferentes entre as regiões tropicais equatoriais e tropicais sazonais. Na maior parte das vezes ocorrem em cores variando do amarelo para o vermelho, sendo essa variação função dos diferentes compostos de ferro presentes. Cores intermediárias podem ocorrer e correspondem a diferentes proporções desses dois minerais. Na grande maioria das vezes esses horizontes estão separados dos horizontes inferiores por uma “linha de seixos”, fator de grande importância na identificação das camadas laterizadas.

b. Solos Saprolíticos

Solo que mantém a estrutura alterada da rocha-mãe, inclusive veios intrusivos, fissuras e xistosidade, porém que perdeu a consistência da rocha. Pode ser confundido, visualmente, com uma rocha alterada, mas possui pequena resistência ao manuseio. É também chamado de solo residual jovem ou solo de alteração de rocha. As características para um solo ser considerado saprolítico são (Nogami & Villibor, 1996):

- For um solo no sentido geotécnico da palavra;
- Exibir claramente aspectos estruturais inerentes, que podem conduzir a uma fácil identificação da rocha mãe;
- For autenticamente residual.

Nas regiões tropicais esses solos freqüentemente representam a parte inferior do horizonte laterítico, onde as ações pedogênicas tornam-se menos importantes. São portanto mais heterogêneos e constituído por mineralogia complexa, contendo freqüentemente minerais ainda em fase de decomposição.

c. Solos Transportados

São aqueles que resultam da decomposição de materiais previamente transportados pelos processos geológicos, tais como: água dos rios, gravidade, ventos, geleiras, etc. As características destes solos são função do seu agente transportador. Estes solos freqüentemente constituem camadas abaixo do lençol freático (Nogami & Villibor, 1996). Nessas condições ficam grande parte imunes a influência climática tropical. Por isso não são considerados solos tropicais e nessas condições podem ser tratados satisfatoriamente aplicando as experiências geotécnicas de solos da região não tropical (como as regiões frias e temperadas).

Quando de formação muito recente, de idade holocênica, geralmente constituem as atuais várzeas e baixadas fluviais e marinhas. Já quanto mais antiga geologicamente (Pleistocênicas e Terciárias), constituem espessos pacotes encontrados mesmo no alto dos morros.

Dentro do acima exposto, os solos de comportamento laterítico e os saprolíticos, como adotado pelo comitê de solos tropicais da ISSMFE (1985), são solos típicos de regiões de clima tropical enquanto que os solos transportados, de formação holocênica (baixadas fluviais, marítimas e de várzea) em que o nível d'água praticamente se localiza na superfície do terreno, tem comportamento bastante similar àqueles encontrados em regiões de clima temperado.

3.2 A investigação Geoambiental

A partir de 1980 constatou-se um aumento significativo de projetos voltados para a identificação da presença de algum tipo de contaminante no solo, bem como do seu caminamento e atenuação. Essas características relacionam-se principalmente com a capacidade do local em atenuar a carga de contaminantes e isolá-la de aquíferos, bem como de águas superficiais. Para tanto é necessário conhecer o perfil geotécnico, as características geotécnicas, hidrogeologias e geoquímicas do local.

Dentro do cenário mundial descrito no item anterior, tem ocorrido um aumento significativo nos projetos de engenharia ambiental, o que tem exigido da engenharia geotécnica o desenvolvimento de ferramentas e técnicas que possam investigar, caracterizar e monitorar de forma segura o subsolo de uma área.

A investigação geoambiental é um tema recente que vem sendo abordado principalmente no campo das Geociências e da Geotecnia. Existem diferentes interpretações para o significado da investigação e caracterização geoambiental, sendo que esta pode ser entendida como "*o campo de estudo que faz a ligação entre geologia, geotecnia, engenharia ambiental e ciências correlatas, para dar origem a uma área de interesse que incluem todas as preocupações ambientais dentro do meio geológico natural ou modificado*", Campanella & Davies (1997).

Segundo a US-EPA (1989), os principais fatores que devem ser considerados na investigação geoambiental são:

- perfil geotécnico;
- posição do nível d'água;
- condutividade hidráulica;
- composição química e fonte(s)/receptor(es) de contaminantes, potenciais ou existentes.

A presença de contaminantes no solo tem levado a mudanças nas técnicas de investigação e caracterização do subsolo, procurando incluir a identificação do tipo,

quantidade e como se dará o caminhamento do mesmo através da formação de uma pluma de contaminação. Para se obter todas essas informações são necessárias que na investigação do subsolo, utilizem-se técnicas que permitam amostrar solo, água e/ou gás.

Para que um programa de investigação *in situ* seja mais eficiente, tem-se utilizado a geofísica para a determinação dos locais onde deve ser realizado um estudo mais detalhado, incluindo as amostragens. A combinação de uma campanha de campo utilizando ensaios elétricos de superfície, ensaios com o piezocone de resistividade e amostragens de água, têm proporcionado uma rápida e econômica caracterização geoambiental do subsolo naqueles países que detêm essa tecnologia.

3.3 Métodos tradicionais de investigação

Como mencionado no item anterior, a engenharia geotécnica há muito desenvolveu técnicas de investigação aplicadas em projetos de fundações. Essas técnicas, já tradicionalmente usadas, passaram a suprir uma lacuna quando, nos últimos anos, houve um aumento de projetos na área ambiental, tendo que se adaptar a esta nova realidade. Nos últimos anos a engenharia geotécnica se ocupou em desenvolver novas técnicas de investigação, mais apropriadas para a área ambiental, procurando assim, apresentar respostas mais seguras e confiáveis para esta nova realidade.

Os métodos tradicionais de investigação atualmente utilizados no Brasil, como as sondagens a trado e a trado helicoidal, sondagens de simples reconhecimento com SPT, dentre outros, não sofreram a incorporação da tecnologia de instrumentação desenvolvida juntamente com a microeletrônica atual e são praticamente os mesmos implantados nas décadas de 60 e 70.

Dentre tais métodos de investigação, a sondagem de simples reconhecimento com SPT, originalmente desenvolvida no final da década de 20, tem sido extensivamente utilizada na maioria dos países, incluindo o Brasil e, devido a esta longa experiência, está firmemente estabelecida na prática da engenharia.

Considerando-se que os solos superficiais são aqueles localizados até uma profundidade de 1,50 m da superfície., os equipamentos mais comuns para esta coleta são: pás e picaretas; trados de caneco, manuais ou mecânicos; trado de rosca; trado holandês; amostradores tubulares (barrilete – “tubo aberto”, meia-cana, tubo fechado).

A amostragem por pás e picaretas é o mais simples e direto método de coleta de amostras de solo. Seu procedimento consiste basicamente em se remover a camada superior do solo utilizando-se uma enxada ou instrumento similar, até a profundidade desejada, quando

então se coleta o solo com uma pequena pá de aço inoxidável. Esse método pode ser utilizado para a maioria dos tipos de solos existentes, sendo viável apenas para amostragens superficiais. Amostragem com pás em profundidades superiores a 50 cm são muito trabalhosas para a grande maioria dos tipos de solos, pois requer que sejam abertas trincheiras no ponto de amostragem ou que a mesma seja realizada em perfis de solo expostos (cortes de terreno). Amostras relativamente não deformadas podem ser conseguidas utilizando-se uma colher de pedreiro pontiaguda para cortar-se um bloco de solo. Essa forma de amostragem permite que sejam obtidas amostras precisas e representativas, de acordo com os cuidados adotados pelo amostrador, devendo-se evitar instrumentos cromados. É um método de amostragem recomendado na coleta de solos contaminados com compostos semivoláteis, metais, pesticidas PCBs, TPH, Radionuclídeos, podendo também, apesar de não ser o método ideal, ser utilizado na coleta de amostras contendo compostos orgânicos voláteis (US EPA, 1989 e Byrnes, 1994).

Os trados mecânicos e manuais (Foto 3.1) são equipamentos freqüentemente utilizados na coleta de amostras de solo (US EPA, 1991, e Byrnes 1994). Vários tipos de trados podem ser utilizados nesta operação, que variam principalmente com o tipo de solo a ser amostrado.

Os trados são mais indicados à coleta de amostras compostas em locais que não contenham substâncias orgânicas voláteis, uma vez que o movimento de rotação realizado em sua operação automaticamente homogeneíza as amostras, permitindo a perda de substâncias voláteis.

Os amostradores tubulares são instrumentos versáteis na amostragem de solo, tanto de superfície quanto em profundidades maiores. Permitem coletar amostras pouco alteradas, mantendo suas características físicas e químicas originais. Podem ser manuais ou mecanizados, utilizando-se de percussão (elétrico, combustível ou manual) ou pressão (hidráulico) para promover a amostragem.



Foto 3.1 Trado tipo cavadeira (Giacheti, 2001)

A sondagem de simples reconhecimento é um procedimento de campo, capaz de amostrar o subsolo. Essa caracterização é obtida através de amostras deformadas retiradas a cada metro perfurado. Também possibilita uma estimativa da resistência do solo ao longo da profundidade perfurada, chamada de “ N_{SPT} ”, que é o número de golpes necessário para a cravação de um amostrador padrão no solo dos últimos 30cm de cada metro amostrado (queda livre de um peso (martelo) de 65kg caindo de uma altura fixa de 75cm). O SPT também permite a identificação do nível d’água do local investigado.

No final da década de oitenta foi apresentado pela “International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering”, ISSMFE, um documento intitulado “International Reference Test Procedure”, Décourt et al. (1988), que trata, em linhas gerais, do procedimento recomendado para a execução do ensaio SPT, iniciais em inglês de “Standard Penetration Test”. No Brasil, o ensaio está normalizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, através da Norma Brasileira NBR 6484.

O *SPT* (*Standard Penetration Test*), que foi originalmente desenvolvido no final da década de 20, tem sido extensivamente utilizado na maioria dos países, incluindo o Brasil. Devido a esta longa experiência, o ensaio SPT está firmemente estabelecido na prática da engenharia. Entretanto, esse ensaio, que está sujeito a muitos problemas que afetam a precisão

e a reprodutibilidade dos seus resultados, vem sendo paulatinamente substituído por outros tipos de ensaios, especialmente em projetos que exigem um maior rigor e envolvem maiores riscos.

3.4 Métodos geofísicos para investigação geoambiental

3.4.1 Considerações iniciais

Devido a crescente preocupação com a proteção ambiental, tem sido necessário desenvolver novas técnicas e procedimentos para investigação, caracterização e monitoramento geoambiental do subsolo. Alguns métodos geofísicos - principalmente os elétricos - vêm sendo utilizados para esse fim e tem levado a resultados promissores (Vogelsang, 1995). Esses trabalhos foram realizados, em sua grande maioria, utilizando-se de sondagens elétricas verticais e caminhamento eletromagnético para mapeamento e monitoramento da pluma de contaminação.

Mais recentemente, a aplicação desses e de outros métodos elétricos têm fornecido informações importantes com respeito à estrutura dos depósitos de resíduos, por exemplo volume de rejeitos e perfil vertical do aterro, definição do sentido de fluxo subterrâneo, bem como as relações envolvendo a quantidade de resíduos introduzida no meio e as características geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas locais (Carpenter et al, 1990; Elis & Zuquette, 1996; 1997).

Novos métodos e técnicas têm sido avaliados, principalmente na determinação e monitoramento da pluma de contaminação, como por exemplo TEM - *Transient Eletromagnetics*, ou Eletromagnético Domínio do Tempo e GPR - *Ground Penetrating Radar*, ou Radar de Penetração no Solo. A técnica desenvolvida mais recentemente para esse tipo de estudo é a associação do piezocone a sensores geofísicos (Bratton et al., 1995) com destaque especial para o piezocone de resistividade.

Os métodos geofísicos são técnicas indiretas de investigação das estruturas de sub superfície através aquisição e interpretação de dados instrumentais, caracterizando-se, portanto, como métodos não invasivos ou não destrutivos.

Essa metodologia permite avaliar as condições geológicas locais através dos contrastes das propriedades físicas dos materiais de sub-superfície, como por exemplo condutividade ou resistividade elétrica, permissividade dielétrica, magnetismo, densidade, etc., que podem ter como origem as diferenciações litológicas e outras heterogeneidades naturais ou não.

Uma das principais vantagens da aplicação das técnicas geofísicas em relação aos métodos tradicionais de investigação de sub superfície, como, por exemplo, as sondagens intrusivas, é a rapidez na avaliação de grandes áreas com custo relativamente menor. Além disso, os levantamentos geofísicos propiciam a execução de perfis contínuos, possibilitando a identificação com maior precisão das variações laterais decorrentes das mudanças litológicas ou originadas pela presença da contaminação subterrânea.

No diagnóstico ambiental de áreas contaminadas, a realização de levantamentos geofísicos tem por objetivo básico a identificação da presença da contaminação subterrânea, além da definição das feições geológicas e hidrogeológicas dos locais investigados.

As características do meio geológico, além da natureza da contaminação, podem determinar o comportamento dos contaminantes em sub superfície. Nesse contexto, a interpretação dos dados geofísicos pode contribuir para a obtenção de informações sobre a litologia, estratigrafia, profundidade do nível d'água, profundidade do embasamento, presença de falhas ou fraturas, existência de aquíferos importantes, caminhos preferenciais de propagação subterrânea e outras feições geológicas de interesse.

Na avaliação da presença da contaminação em profundidade, o emprego dos métodos geofísicos está voltado, especificamente, à localização de valas contendo resíduos, investigação da contaminação disseminada no solo e nas águas subterrâneas, detecção de tambores e tanques enterrados e determinação de vazamentos em tanques ou dutos (Cetesb, 2001).

A aplicação de dois ou mais métodos geofísicos distintos aumenta a precisão das interpretações, sendo que a natureza dos contaminantes e a geologia local são os fatores decisivos na seleção das técnicas geofísicas a ser utilizadas.

Os desvios significativos do padrão normal das medidas geofísicas, que são as anomalias, podem, do ponto de vista ambiental, apontar a presença de contaminantes em sub superfície. A interpretação das anomalias é fundamental, pois pode indicar a intensidade da contaminação presente, proporcionando, assim, dados importantes para as atividades de diagnóstico, monitoramento da propagação dos contaminantes e acompanhamento da recuperação de uma área contaminada.

Dessa forma, as informações derivadas dos levantamentos geofísicos são úteis para a locação dos poços de monitoramento, como também podem fornecer estimativas de área e volume para as atividades de remoção e remediação de solos contaminados. Além disso, podem ser aplicadas para reduzir o risco de perfuração de tanques e tambores enterrados contendo resíduos, ou de dutos e galerias subterrâneas (Cetesb, 2001).

Existe uma variedade de métodos geofísicos que podem ser utilizados nos estudos ambientais, porém os principais métodos, que comumente são aplicados à investigação da contaminação do solo e da água subterrânea são: o geo-radar (GPR), o eletromagnético indutivo (EM), a eletrorresistividade (ER) e a magnetometria (Cetesb, 2001).

A vantagem desses métodos em relação a outros métodos geofísicos consiste basicamente na capacidade de detecção direta da contaminação subterrânea e não apenas na identificação das feições geológicas das áreas em estudo. A seguir é apresentado um resumo dos 3 métodos utilizados neste trabalho: caminhamento elétrico dipolo-dipolo, SEV e EM.

3.4.2 Eletromagnético indutivo (EM)

Na técnica do eletromagnetismo indutivo (EM), a propriedade física determinada é a condutividade elétrica, sendo que o princípio é analisar a indução de campo eletromagnético no subsolo. Esta técnica é utilizada para as definições das condições hidrogeológicas naturais, localização de resíduos, tanques e tanques enterrados, galerias subterrâneas e delimitação de plumas de contaminação inorgânica (Elis, 1998).

Os equipamentos utilizados nesse método são denominados genericamente de condutivímetros. O condutivímetro é composto de duas bobinas: uma para emissão e outra para a recepção. A bobina transmissora emite um campo magnético primário H_p , que induz, em subsuperfície, correntes elétricas, que geram um campo secundário H_s . A combinação destes dois campos é medida pela receptora. Sob certas condições, definidas tecnicamente como “operação de baixa indução”, admite-se que a relação entre os módulos dos dois campos seja dada por $H_s = k.H_p$, onde k depende da frequência do campo, da permeabilidade magnética do material no vácuo, do espaçamento entre as bobinas e da condutividade elétrica do meio. O equipamento é construído de forma a permitir a leitura direta da condutividade em miliSiemens por metro. Os equipamentos mais consagrados nesse método são o EM-31 e o EM-34, de fabricação canadense. São equipamentos construídos para investigar as profundidades pré-determinadas de 3 e 6 m, dependendo da orientação das bobinas (EM-31) e de 7,5 a 60 m, dependendo do comprimento do cabo de referência e da orientação das bobinas (EM-34) (Elis, 1998).

Os ensaios em campo são realizados com muita rapidez, sendo esta uma vantagem da utilização desta técnica. Isto por que os ensaios são feitos por caminhamento, por serem os equipamentos de fácil transporte e manuseio. Como desvantagem há o limite de profundidade a ser investigada, limitando sua utilização para a execução de sondagens.

3.4.3 Eletrorresistividade (ER)

Já nesta técnica, a propriedade física determinada é a resistividade elétrica, em que o princípio básico é analisar a injeção de corrente no solo. Essa técnica é utilizada para a caracterização hidrogeológica, determinação dos estratos geológicos, localização de resíduos enterrados e mapeamento de plumas de contaminantes inorgânicos (Elis, 1998).

Os diferentes tipos de materiais existentes apresentam como uma de suas propriedades fundamentais o parâmetro físico resistividade elétrica, o qual reflete suas principais características servindo para caracterizar seu estado e até identifica-lo.

Da Física Elementar, temos que relação entre a resistividade e a resistência de um condutor homogêneo, de forma cilíndrica ou prismática, é dada pela fórmula:

$$R = \rho L / S \quad (\text{ohm}), \quad \text{Equação 3.1}$$

Em que, L é o comprimento e S a seção transversal do condutor. A magnitude ρ é um coeficiente que depende da natureza e do estado físico do corpo considerado e recebe o nome de resistividade.

Desse modo podemos definir a resistividade elétrica desse corpo como:

$$\rho = R \cdot S / L \quad (\text{ohm.m}) \quad \text{Equação 3.2}$$

De maneira simplista, a resistividade pode ser definida como sendo uma medida da dificuldade que a corrente elétrica encontra na sua passagem em um determinado material, e isso esta ligado aos mecanismos pelos quais a corrente elétrica se propaga.

Nas rochas estes mecanismos são caracterizados pela sua condutividade " σ ", que numericamente pode ser expressa como o inverso da resistividade, portanto:

$$\sigma = 1 / \rho \quad \text{Equação 3.3}$$

Esses mecanismos de propagação das correntes elétricas podem ser do tipo condutividade eletrônica ou iônica. A classificação desses tipos de condutividade podem ser sintetizadas da seguinte maneira:

- Condutividade eletrônica: metais e semicondutores;
- Condutividade iônica: eletrólitos sólidos (dielétricos) e eletrólitos líquidos.

A condutividade eletrônica é devida ao transporte de elétrons na matriz da rocha, sendo a sua resistividade governada pelo modo de agregação dos minerais e do grau de impurezas (é o caso de certos minerais metálicos e dos xistos grafitosos). A condutividade

iônica deve-se ao deslocamento dos íons existentes na água contida nos poros e fissuras da rocha.

A resistividade das rochas que possuem condutividade iônica é função decrescente da quantidade de água e da natureza dos sais dissolvidos, e da porosidade total comunicante (a água contida em vacúolos isolados tem pouca importância). Praticamente, todas as rochas possuem poros em proporção maior ou menor, os quais podem estar ocupados total ou parcialmente por eletrólitos; em conjunto elas se comportam como condutores iônicos, de resistividades muito variáveis.

Ao introduzir uma corrente elétrica (I) através dos eletrodos A e B, e entre os eletrodos M e N medir a diferença de potencial criada (ΔV), resulta que as medidas pertinentes serão utilizadas para o cálculo da resistividade aparente pela fórmula:

$$\rho_a = K \cdot \Delta V / I \quad (\text{ohm.m}) \quad \text{Equação 3.4}$$

em que:

ρ_a = resistividade elétrica (ohm.m)

K = fator geométrico

ΔV = diferença de potencial entre os eletrodos M e N (mV)

I = intensidade de corrente que passa entre os eletrodos A e B (mA)

Sendo K um fator geométrico que só depende do espaçamento entre os quatro eletrodos, calculado da seguinte maneira:

$$K = \pi \cdot (AM \cdot AN) / MN \quad \text{Equação 3.5}$$

Como na prática o subsolo não pode ser considerado um meio homogêneo, a quantia medida representa uma "média" ponderada de todas as resistividades verdadeiras em um volume de material em subsuperfície relativamente grande, portanto ao efetuarmos as medições pertinentes obteremos uma resistividade aparente " ρ_a ". Esta é a variável que expressa os resultados das medições na maioria dos métodos geoeletricos e é a que se toma como base para a interpretação final.

A técnica de sondagem elétrica vertical, arranjo Schlumberger, caracteriza-se por uma série de determinações de resistividade aparente, efetuadas com o mesmo tipo de dispositivo eletródico (são possíveis vários dispositivos eletródicos) e separação crescente entre os eletrodos de emissão e recepção. Esse procedimento permite a observação dos

valores de resistividade aparente, em um ponto fixo, a profundidades cada vez maiores, através da separação crescente entre os eletrodos A e B de corrente.

Os valores de resistividade aparente obtidos nas SEVs são representados, em relação às distâncias entre os eletrodos de corrente, através de uma curva construída sobre uma base bilogarítmica. Esse gráfico é normalmente denominado de curva de sondagem elétrica vertical e é o que se toma como base para interpretação quantitativa do ensaio.

O arranjo de campo Schlumberger é o mais utilizado em SEVs, devido à qualidade das curvas de campo, facilidade e rapidez na execução do ensaio e menor susceptibilidade as variações laterais de resistividade e ruídos, como correntes naturais no subsolo.

O arranjo compreende uma configuração onde se utiliza quatro eletrodos, sendo 2 para injetar a corrente (A e B) e 2 para a leitura de diferença de potencial (M e N), todos dispostos no terreno de acordo com um mesmo alinhamento. A principal característica desse arranjo é que a distância MN deve ser bastante pequena em relação a AB, procurando sempre satisfazer a relação $MN \leq AB/5$ (Figura 3.2). Na prática, quando o sinal ΔV medido torna-se muito fraco, aumenta-se a distância MN, isto é, adota-se um primeiro intervalo MN e realizam-se várias medidas com diferentes AB, depois aumenta-se MN que se conserva constante para outra série de deslocamentos de AB e assim por diante, evitando deslocar ao mesmo tempo os eletrodos de corrente e de potencial e mantendo a relação $MN \leq AB/5$. Esta manobra recebe a denominação de “embreagem” e permite uma checagem da qualidade dos dados obtidos durante o processo de campo.

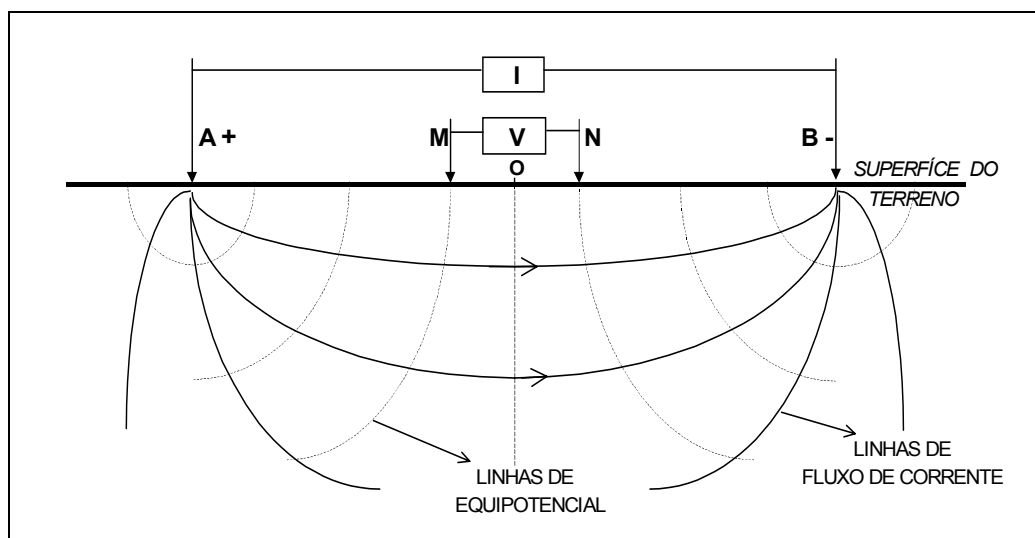


Figura 3.2: Arranjo de campo - sondagem elétrica vertical Schlumberger (Elis, 1993)

O ponto de atribuição do ensaio é sempre localizado no centro geométrico do arranjo. Os valores de resistividade aparente obtidos são plotados em relação aos valores da distância $AB/2$, fornecendo a curva de resistividade aparente, a qual é passível de interpretação quantitativa. A interpretação de uma SEV objetiva determinar a distribuição espacial dos estratos com diferentes resistividades no subsolo, partindo dos dados de resistividade aparente medidos na superfície. A seguir é feita a interpretação do significado geológico dos estratos com diferentes resistividades. A interpretação da curva de SEV baseia-se em leis físico-matemáticas, o que a torna um processo trabalhoso e de difícil execução. Inicialmente, as curvas obtidas em campo são interpretadas pelo método da superposição e ponto auxiliar de Ebert (IPT, 1988 citado por Elis, 1993), através de modelos matemáticos convencionais - ábacos ou curvas padrão - disponíveis, para obter-se um modelo inicial. Posteriormente, o refinamento do modelo encontrado é feito através de softwares específicos, a partir do método das aproximações sucessivas ou de inversão usando regressão em cadeia.

As investigações pelo Caminhamento Elétrico (CE) são realizadas ao longo de perfis e os resultados obtidos se relacionam entre si através, ou de um estudo em mapas a uma ou mais profundidades determinadas ou de seções com várias profundidades de investigação (vários níveis de investigação). Devido ao caráter de detalhe e precisão dos resultados a serem obtidos, o arranjo utilizado no presente trabalho foi o Dipolo-Dipolo.

A Figura 3.3 ilustra a disposição no campo, dos eletrodos de emissão de corrente e recepção de potencial, no desenvolvimento da técnica do CE - arranjo de campo dipolo-dipolo. No desenvolvimento desse arranjo de campo, pode-se utilizar simultaneamente vários dipolos de recepção dispostos ao longo da linha a ser levantada. Cada dipolo refere-se a um nível de investigação, podendo, dependendo do caráter da pesquisa, estudar as variações horizontais de um parâmetro físico ao longo de um perfil com um ou até cinco dipolos, respectivamente, com uma e cinco profundidades de investigações.

Nesse tipo de arranjo a profundidade teórica atingida em cada nível investigado, pode ser tomada como sendo $R/2$ (metros).

O ensaio é desenvolvido ao longo de perfis previamente estaqueados, com espaçamento constante, em função das profundidades de investigações requeridas, pois tanto o espaçamento entre os dipolos como os números de dipolos utilizados regulam as profundidades de investigações atingidas.

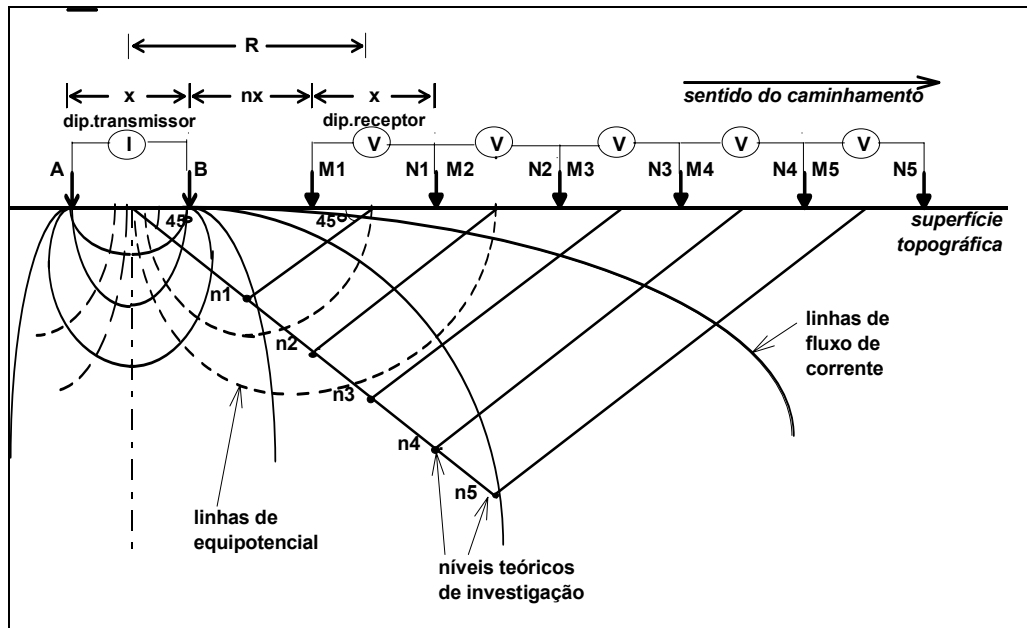


Figura 3.3: Disposição no campo do arranjo Dipolo-Dipolo - Caminhamento Elétrico.
(Elis, 1993)

Após a disposição do arranjo no terreno, fixados os níveis de investigações, e obtidas as leituras pertinentes, todo o arranjo é deslocado para a estaca seguinte e efetuadas as leituras correspondentes, continuando este procedimento sucessivamente até atingir-se o final do perfil a ser levantado.

O sistema de plotagem dos parâmetros físicos obtidos é efetuado considerando como ponto de atribuição das leituras, uma projeção de 45° a partir dos centros dos dipolos AB e MN, até atingir-se o ponto médio entre os centros destes dipolos.

Após a plotagem de todos os parâmetros geoeletricos obtidos em um perfil levantado, tem-se uma seção geoeletrica aparente.

3.5 Tecnologia do piezocone

3.5.1 Considerações iniciais

O cone e o piezocone são ensaios de penetração quasi-estática *in situ*, que permitem identificar o perfil geotécnico do terreno e avaliar preliminarmente os parâmetros geotécnicos dos solos. Um desenho esquemático desta ferramenta e a terminologia utilizada são apresentadas na Figura 3.4. O procedimento de ensaio está padronizado pela ASTM D3441 (1986), tanto para o ensaio com medida de poro-pressões (CPTU – Cone Penetration test Undrained), como para o ensaio sem essa medida (CPT – Cone Penetration test). Esses

ensaios podem ser realizados de duas maneiras distintas, utilizando um equipamento mecânico ou um elétrico. No Brasil, o ensaio é padronizado pela ABNT, MB 3406 (1990).

As vantagens do uso do CPTU em relação ao CPT são a possibilidade de:

- Diferenciar o comportamento drenado do parcialmente drenado e do não-drenado;
- Avaliar as características de fluxo e de consolidação;
- Avaliar as condições de equilíbrio de água subterrânea;
- Melhor identificação e definição do perfil geotécnico;
- Melhor avaliação dos parâmetros geotécnicos.

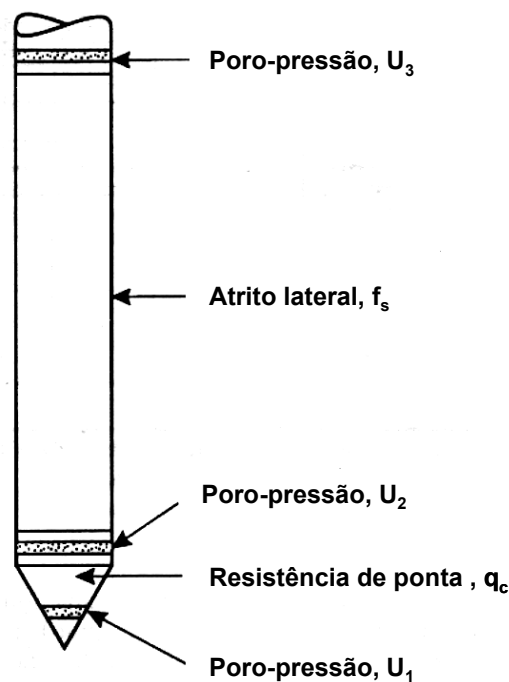


Figura 3.4 Desenho esquemático para CPTU e terminologia utilizada (Quaresma et al, 1996).

Em locais onde a geologia é bem conhecida e que apresenta uma certa uniformidade e as previsões baseadas em dados do CPT ou CPTU foram verificadas com a observação do comportamento de estruturas, esses ensaios podem ser os únicos utilizados para projeto. Entretanto, mesmo nessas circunstâncias, Campanella et al (1995) recomendam que o CPT ou o CPTU seja acompanhado de furos, amostragens e ensaios, pelas seguintes razões:

- É possível uma melhor definição do perfil geotécnico;
- É possível verificar correlações locais;

- Melhor interpretação de dados em solos com comportamento parcialmente drenado.

3.5.2 Equipamentos

a) CPT e CPTU

O primeiro cone elétrico foi introduzido em 1948 e melhorado mais tarde por de Ruitter (1971). Desde então, diversos modelos foram desenvolvidos. Um cone de 10 cm² de área na ponta, com uma ponta de 60° é o normalmente aceito como padrão e foi recomendado pelas normas européia e americana (ISSMFE, 1977 e ASTM, 1986). A luva de atrito localizada acima da ponta cônica tem uma área padronizada de 150 cm². A luva de atrito nos cones elétricos tem o mesmo diâmetro da ponta cônica e das hastes, isto é, 35,7 mm.

Os penetrômetros elétricos possuem células de carga que registram a resistência de ponta (q_c) e o atrito lateral (f_s). Extensômetros de resistência elétrica colados em locais apropriados do penetrômetro são os dispositivos normalmente utilizados como células de carga devido sua simplicidade, robustez, estabilidade e grande precisão nas leituras. Os detalhes do projeto de um piezocone elétrico são apresentados por Robertson & Campanella (1986). Na Foto 3.2 tem-se um piezocone e na Figura 3.5 tem-se um desenho esquemático de um cone elétrico.



Foto 3.2: Piezocone com medida de poro-pressão atrás da ponta (U_2) (Giacheti, 2001).

A introdução da medida de poro-pressão no cone elétrico permitiu ampliar a aplicação desse tipo de sondagem. Entretanto, para realizar medidas de poro-pressão é necessário um cuidado especial no projeto e na utilização do penetrômetro, principalmente quanto à escolha da posição do elemento poroso e quanto à sua saturação (Campanella & Robertson, 1988). O projeto mecânico do cone precisa garantir que, enquanto a ponta estiver sendo solicitada, nenhuma carga seja transferida para o transdutor de poro-pressão. A verificação dessa componente do projeto pode ser feita no laboratório, carregando-se a ponta, após sua montagem e completa saturação, e observando-se o comportamento da poro-pressão. Se nenhuma transferência mecânica ocorrer, nenhuma poro-pressão deve ser observada.

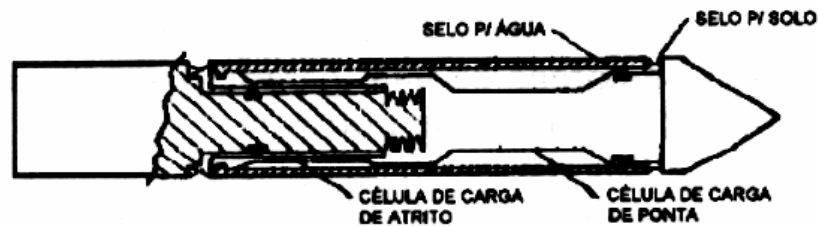


Figura 3.5: Esquema de um cone elétrico de atrito convencional (Schaap e Zuidberg, 1982 in Quaresma et al., 1996).

Uma outra característica importante no projeto do piezocone é a existência de uma pequena cavidade que deve ser preenchida com um fluido de baixa compressibilidade, o qual fica em contato com um transdutor de pressão rígido ou de baixa deformabilidade. É necessário também que se encontre o equilíbrio entre a permeabilidade do elemento poroso, a qual deve ser elevada, para manter uma resposta rápida e, ao mesmo tempo, baixa, para que se tenha uma elevada resistência à entrada de ar, garantindo assim a saturação.

b) Equipamentos para penetração

O sistema de reação utilizado para penetração do cone consiste basicamente de um macaco hidráulico, com capacidade usualmente variando entre 100 e 200 kN, uma vez que 200 kN é a máxima carga que pode ser aplicada no hasteamento rotineiramente utilizado, que possui 35,7 mm de diâmetro. Também é possível a utilização de sistemas de 20 a 50 kN uma vez que, conforme relatado por Campanella et al. (1995), 95% dos ensaios exigem reação de no máximo 10 kN para penetrações de até 30 m de profundidade em solos normalmente adensados, não cimentados, e que não possuem pedregulhos ou matacões.

Estes sistemas de reação são geralmente montados em pesados caminhões com um lastro de 150 kN e com um sistema de ancoragem especial, quando é necessário atingir 200 kN. Esse sistema de reação pode também ser montado em carretas leves, que serão ancoradas no terreno. Existem ainda penetrômetro com funções múltiplas, que permitem a realização de ensaios de penetração, perfuração de furo utilizando trado e ainda a realização de sondagens a percussão. Sistemas de reação versáteis e eficientes, quando trabalham em condições favoráveis de subsolo, podem produzir até 250 m de perfuração num dia de trabalho, ao passo que aqueles montados em carretas, nas mesmas condições, produzirão apenas metade, pois se gasta muito tempo na operação de ancoragem.

O hasteamento é composto por barras de um metro conectadas uma as outras através de rosca com aperto manual. Raramente se utilizam ferramentas para desmontá-lo. Para possibilitar que se aplique um menor esforço de cravação do cone é comum utilizar-se de um

reductor de atrito instalado a uma distância que varia entre 0,3 a 1,0 m da ponta do cone, com a finalidade de expandir o diâmetro do furo e reduzir o contato do solo contra as hastes. Campanella et al. (1995) relatam que quanto mais distante estiver este reductor de atrito, maiores são as chances de se manter o furo alinhado verticalmente, entretanto, gasta-se mais energia para vencer o atrito desenvolvido a frente do reductor. O SGI (1995) recomenda que esse reductor fique distante 1 m da ponta do cone (Figura 3.6).

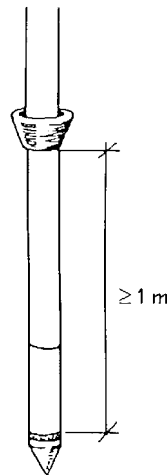


Figura 3.6: Localização do reductor de atrito (SGI, 1995).

c) Calibração

Os cones elétricos dão uma precisão e repetibilidade muito maior do que aquela que se obtém com o cone mecânico. Entretanto, existem alguns cuidados especiais que influenciam na precisão das medidas. Os dois principais fatores de erro são: erro de calibração e erro do zero da célula de carga. Estudos mostram que outra fonte de erro se deve a entrada de solo nas juntas do cone, fato esse que pode ser minimizado com uma inspeção regular e uma freqüente manutenção do equipamento.

Para minimizar as fontes de erro, o aparelho deve ser calibrado freqüentemente. Além disso, é recomendado pelos pesquisadores e profissionais que realizam ensaios com o CPT e CPTU, a utilização de um dispositivo simples, que permita verificações das células de carga e transdutores de pressão no próprio campo.

3.5.3 Tratamento dos dados de ensaio

a) Fatores que afetam as medidas do CPT e CPTU

Quando se realiza uma sondagem com piezocone em solos finos saturados, existem diferenças nas medidas das resistências de ponta e do atrito lateral. As diferenças devido à

ação da pressão de água sobre as ranhuras do cone é importante nos casos onde a poro-pressão gerada é grande em relação à resistência de ponta (q_c), principalmente nos casos de argilas moles, onde os elevados valores de poro-pressão e baixa resistência de ponta podem levar a uma situação fisicamente impossível em que $U > q_c$. Essa correção para a área de ponta não pode ser eliminada a menos que se tenha um cone único; sem juntas (Quaresma et al., 1996).

A poro-pressão pode atuar nas superfícies expostas atrás da ponta do cone e no final da luva de atrito (Figura 3.7). Tais esforços provocados pela água, resultam em um aumento na resistência de ponta (q_c), e no valor do atrito desenvolvido na luva (f_s), os quais não representam resistência em termos de tensões do solo. As diferenças introduzidas nas medidas, podem ser superadas, corrigindo-se o q_c medido e considerando-se os efeitos das áreas desiguais (Baligh et al., 1981; Campanella et al., 1982).

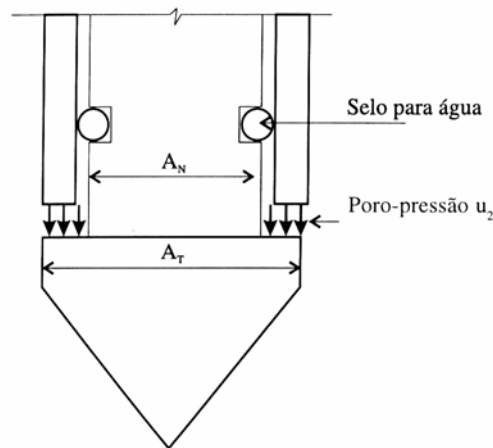


Figura 3.7: Fator de áreas desiguais. Poro-pressão influenciando a medida da resistência de ponta (Quaresma et al., 1996).

Conhecendo-se as áreas finais (A_N e A_T) e a força axial, a resistência de ponta (q_c) pode ser corrigida de acordo com a influência da pressão da água. O tamanho das áreas finais é normalmente expresso pela relação de áreas (a), usada para a correção da medida da resistência de ponta, em que:

$$a = \frac{A_N}{A_T} \cong \frac{(A_T - A_L)}{A_T} \quad \text{Equação 3.6}$$

A correção da resistência de ponta (q_c), em função da poro-pressão medida na base do cone (U_2) foi proposta por Campanella et al. (1982), é expressa como segue:

$$q_t = q_c + U_2 \cdot (1 - a) \quad \text{Equação 3.7}$$

em que:

q_t resistência de ponta corrigida (MPa);

U_2 poro-pressão gerada imediatamente atrás da ponta (KPa);

a fator de áreas desiguais = A_N/A_T .

b) Avaliação dos resultados do CPT e do CPTU

Os resultados de sondagens CPT em solos mais rígidos são, em geral, muito confiáveis. Entretanto, em solos moles, a resistência de ponta será afetada por diversos fatores. Para avaliar o desempenho de um cone em solos moles, as leituras feitas antes e após a conclusão do ensaio são de extrema importância no tratamento desses dados.

Os dados de poro-pressão e de sua dissipação podem ser utilizados para a interpretação do perfil do subsolo, assim como para avaliação da saturação do piezo-elemento, procedimento similar ao normalmente realizado em ensaios triaxiais em laboratório.

3.5.4 O tratamento dos dados e interpretação dos resultados

a) Fatores que afetam a interpretação

Antes de avaliar os resultados de qualquer ensaio feito com um cone elétrico ou piezocone, é necessário ter conhecimento e levar em consideração todos os fatores que podem ser fontes de diferenças. Destacam-se novamente que as três principais fontes de diferenças são:

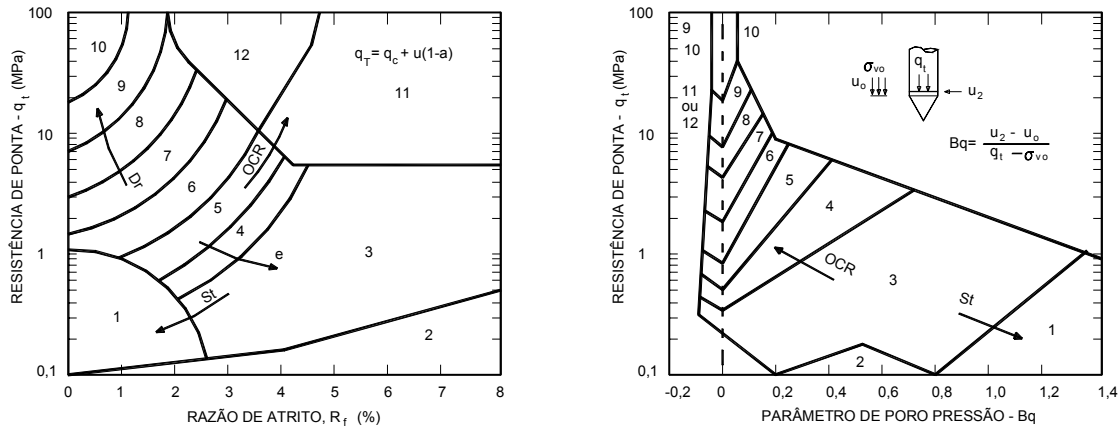
- Efeito de áreas desiguais;
- Localização do piezo-elemento, tamanho e saturação;
- Precisão das medidas.

b) Classificação dos solos e identificação de perfil geotécnico

Uma das principais aplicações do piezocone é a identificação do perfil geotécnico a partir do emprego de cartas de classificação. A experiência tem demonstrado que, tipicamente, a resistência de ponta (q_c) é alta em areias e baixa em argilas, sendo que o atrito lateral (f_s) é baixo em areias e alto em argilas.

Douglas & Olsen (1981) foram os pioneiros em propor uma carta de classificação de solos a partir da resistência de ponta (q_c) e a razão de atrito (R_f) determinada com cones elétricos. Uma das cartas de classificação mais utilizada é a proposta por Robertson et al. (1986), apresentada na Figura 3.8. Esta carta utiliza a resistência de ponta corrigida (q_T) e a razão de atrito corrigida ($R_f = q_T/f_s \times 100$). A carta mostra, além da classificação dos solos, a

tendência de variação da densidade relativa (D_r), do histórico de tensões (OCR), da sensibilidade (St) e do índice de vazios (e). O piezocone permite, ainda, que se classifique o solo utilizando a informação de poro-pressão, através do índice de poro-pressão (B_q). Esse recurso é interessante, especialmente para solos moles, nos quais os valores de resistência de ponta são baixos e a geração de poro-pressão é elevada.



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

* Pré-adensado ou cimentado

Figura 3.8: Carta de classificação de solos utilizando CPT elétrico (Robertson et al., 1986).

A resistência de ponta e o atrito lateral aumentam com a profundidade devido à tensão de confinamento. Portanto, os dados obtidos pelo CPT necessitam de correções, especialmente para as sondagens mais profundas. Por exemplo, em uma camada espessa de argila pré-adensada, a resistência do cone aumentará com a profundidade, resultando em mudanças aparentes na classificação (Robertson, 1998). Assim, uma outra carta de classificação com base em dados obtidos em sondagens CPTU foi proposta por Robertson (1990) e é recomendada para sondagens com profundidade superior a 30 m.

Essas cartas foram elaboradas sem levar em consideração a medida de poro-pressão. As medidas de atrito lateral, às vezes, são menos precisas e confiáveis do que a medida da

resistência de ponta. Também, diferentes cones podem produzir diferentes medidas de f_s . Esse fato deve estar associado a variações nas características dos projetos elétricos e mecânicos da luva de atrito, assim como pelo efeito das áreas desiguais. Para superar os problemas associados às diferentes medidas obtidas para f_s , várias cartas de classificação foram feitas baseadas em valores de q_t e poro-pressão, como por exemplo, àquela apresentada por Senneset & Janbu (1984).

Campanella et al. (1995) não acreditam que é possível identificar o solo apenas baseado em q_t e ΔU . Algumas vezes, variações observadas na razão de atrito podem ser mais úteis para definir mudanças no tipo de solo que ocorre no perfil. Portanto, esse autor recomenda o uso dos três dados (q_t , U , f_s) na forma de q_t , B_q e R_f , para definir o tipo de comportamento do solo. B_q é dado por:

$$B_q = \frac{\Delta U}{(q_t - \sigma_{vo})} \quad \text{Equação 3.8}$$

em que:

ΔU = excesso de poro-pressão medida atrás da ponta;

q_t = resistência de ponta, levando-se em conta as correções por efeito de U ;

σ_v = tensão geostática total

O emprego de cartas de classificação deve ser feito com critério, pois não considera fatores específicos como, por exemplo, histórico de tensões, densidade, rigidez e índice de vazios. A forma que se dará a dissipação de poro-pressão, quando se interrompe a penetração do cone, é um recurso interessante que pode auxiliar na classificação do solo. Em solos argilosos pré-adensados e rijos, a poro-pressão atrás da ponta pode ser muito baixa em comparação com a poro-pressão na face do cone. Quando a penetração é interrompida o registro de poro-pressão imediatamente atrás da ponta pode ser útil antes dela dissipar para a pressão de equilíbrio. Esse aumento de pressão pode ser provocado pela equalização local da elevada pressão nos poros próximos à face do cone, embora a saturação ineficiente também possa provocar comportamento semelhante.

Outro problema relacionado ao emprego de cartas de classificação de solos baseados em dados do CPTU é que, com o aumento da profundidade, tem-se um maior efeito da tensão geostática no comportamento dos solos. Portanto, quando se utiliza a classificação para profundidades superiores a 30 m, pode ocorrer algum erro, já que elas foram feitas baseadas em dados de sondagens até essa profundidade.

Tentativas foram feitas no sentido de procurar normalizar os resultados do cone a partir da tensão geostática efetiva - σ'_{vo} (Robertson & Campanella, 1985). Entretanto, ainda não se chegou a um consenso de como os dados de cone devem ser normalizados. Olsen & Farn (1986) utilizam diferentes métodos na normalização de ensaios para diferentes tipos de solo, que dependem de um processo de interpretação interativo, o qual exige a utilização de um programa de computador. Teoricamente, toda a normalização para considerar o aumento de tensões geostáticas considera as mudanças nas tensões laterais. Isso pode ser eliminado, usando a tensão octaédrica (σ'_m) dada por:

$$\sigma'_m = 1/3 (\sigma'_{vo} (1+k_0)) \quad \text{Equação 3.9}$$

em que

σ'_{vm} Tensão octaédrica;

σ'_{vo} Tensão geostática efetiva;

K_0 Coeficiente de empuxo em repouso

Entretanto, no momento, isso leva apenas a um pequeno benefício, já que é necessário conhecer, a priori, as tensões *in-situ* (K_0). Mesmo que se normalize, utilizando apenas a tensão vertical, é necessário que se conheça o peso específico do solo e a posição do nível da água. Campanella et al. (1995) sugerem que se use o ábaco da Figura 3.8, até que se tenha melhor definido como se fará a normalização das tensões. Recomenda, ainda, cuidado para profundidades superiores a 30 m.

Robertson (1990) propôs um ábaco de classificação dos solos, baseada na resistência de ponta normalizada e razão de atrito para interpretação, considerando a carta em função de B_q . Esse gráfico tem a vantagem de poder ser utilizado para sondagens com profundidade superior a 30 m.

É sempre importante enfatizar que as cartas de classificação são gerais e fornecem apenas uma orientação quanto ao tipo de solo. Essas cartas não podem fornecer uma previsão exata do tipo de solo para qualquer aplicação de engenharia. Entretanto, para locais de geologia conhecida, as mesmas podem ser ajustadas a partir da experiência local levando assim a uma excelente correlação.

A resistência à penetração da ponta do cone é influenciada pelas propriedades de solo a frente e atrás dela. Estudos em câmaras de calibração (Schmertmann, 1978), mostram que a ponta é sensível a uma interface de duas camadas entre 5 a 10 diâmetros da sua parte da frente e da sua parte de trás. Essa distância aumenta como o aumento da rigidez do solo penetrado.

O contínuo monitoramento da poro-pressão durante a penetração do cone pode melhorar significativamente a identificação da estratigrafia do solo (Campanella et al., 1983). O tempo de resposta de um piezômetro totalmente saturado é rápido o suficiente para permitir que se observe mudanças na poro-pressão, num intervalo de tempo inferior a 0,25 segundos. Isso corresponde a uma espessura da camada de cerca de 5 mm ou até menos, para a velocidade de penetração padrão de 20 mm/s. Entretanto, observar essa fina camada, na prática dependerá da resposta do solo ao avanço do cone e ao intervalo de variação de profundidade, para o registro dos dados. Para finas camadas de areia dentro de corpos de argila, as características de drenagem desse material desempenham um papel importante na identificação do perfil.

c) Interpretação direta dos resultados do CPT

Uma forma de interpretação de resultados de sondagens CPT é correlacionar empiricamente q_c e f_s medidos com o comportamento observado em fundações, prática que tem sido utilizada, especialmente no Brasil, provavelmente pela dificuldade de considerar os diversos fatores que afetam o comportamento de solos residuais não saturados. Os métodos empíricos desenvolvidos para a previsão do comportamento de fundações, como por exemplo, o de Aoki & Velloso (1975) são, em geral, para valores de q_c e f_s obtidos utilizando-se o cone mecânico. De Ruitter (1971), recomenda que não se corrija o valor de q_c obtido com cone elétrico no caso de aplicação de métodos originados de dados de cone mecânico, como no caso de capacidade de carga de estacas. Entretanto, quando se utiliza um cone elétrico, as pesquisas realizadas mostram que os valores de atrito lateral medidos em cone mecânico são da ordem do dobro daqueles medidos utilizando-se um cone elétrico. De Ruitter (1971) atribui tal diferença à resistência extra desenvolvida no bordo inferior da luva de atrito do cone de Begemann, a qual é incluída no registro de atrito lateral.

d) A estimativa de parâmetros de projeto

Com base nos valores de q_c , f_s e U medidos, é possível estimar os parâmetros de resistência, compressibilidade e permeabilidade do solo. Essa forma de análise de resultados de sondagens CPT ou CPTU é conhecida como abordagem indireta de interpretação. Para a obtenção desses parâmetros existem inúmeras propostas na literatura internacional. A maioria foi desenvolvida para solos sedimentares, sendo poucos os estudos existentes para avaliar o comportamento de solos residuais.

No caso de areias, os seguintes parâmetros podem ser estimados: densidade relativa (D_r), parâmetro de estado das areias (ψ), coeficiente de empuxo no repouso (K_0), ângulo de atrito interno efetivo (ϕ'), módulos de deformabilidade (E), edométrico (E_d) e de cisalhamento máximo (G_{max}). Já, para as argilas, os seguintes parâmetros podem ser estimados: resistência não drenada (S_u), razão de pré-adensamento (OCR), sensibilidade (S_t), módulos (E , E_d e G_{max}), coeficiente de adensamento (c_h e c_v) e permeabilidade (k_h e k_v). Embora alguns parâmetros listados acima possam ser interpretados segundo uma abordagem teórica, a maioria deles, geralmente, foi obtido através de correlações com resultados de ensaios de laboratório e/ou ensaios específicos de campo (Quaresma et al.; 1996). Recomenda-se sua utilização em estimativas para posterior confirmação, quando necessário, utilizando ensaios específicos de campo ou de laboratório.

3.5.5 Piezocone para estimativa da permeabilidade do solo

Os resultados dos ensaios de penetração do piezocone também podem ser utilizados para uma medida da estimativa da permeabilidade do solo, existindo métodos baseados em uma correlação empírica ou na estimativa do coeficiente de consolidação e o cálculo da permeabilidade usando a teoria unidimensional de consolidação.

Schertmann (1978) propôs uma correlação empírica da permeabilidade com os dados da dissipação do piezocone. Esta correlação foi baseada na taxa de 50% e 90% da dissipação do excesso de poro-pressão gerado.

Baligh e Levadox (1980, 1986) propuseram a seguinte equação para a estimativa do coeficiente de permeabilidade pela dissipação do excesso de poro-pressão em uma camada de solo:

$$k_{h(\text{piezocone})} = \gamma_w / 2,35 \sigma_{vo} R R_{(\text{piezocone})} C_{h(\text{piezocone})} \quad \text{Equação 3.10}$$

em que:

γ_w : peso específico da água;

σ_{vo} : tensão geoestática efetiva;

RR: taxa de recompressão;

Ch: coeficiente de adensamento horizontal

A taxa de recompressão ($= C_r / (1+e_0)$) (em que C_r é o índice de recompressão ou índice de expansão, e e_0 é o índice de vazios) é considerada porque o aumento na poro-pressão causa um decréscimo na tensão efetiva principal, ou contribui para um sobre-adensamento artificial da argila inicialmente normalmente adensada. Conseqüentemente, a consolidação ocorre em um modo de recompressão com a dissipação do excesso de poro-pressão (Mayne e Burns. 1998).

Gupta (1983) estimou a permeabilidade *in situ* da argila de Gainesville, Flórida (EUA), usando uma correlação específica desenvolvida através do ensaio de penetração do cone e ensaios de consolidação em laboratório. A correlação obtida para a argila do Lago Alice, em Gainesville é apresentada a seguir:

$$M = 4q_c \quad \text{Equação 3.11}$$

em que:

M é o módulo confinado (igual a $1/m_v = \Delta u / \Delta u_0$ (%));

m_v é o coeficiente de compressibilidade volumétrica, ou perda específica da água intersticial;

e a permeabilidade é dada pela equação:

$$k = (C_h \gamma_w) / M \quad \text{Equação 3.12}$$

Robertson et al. (1992) propôs uma correlação empírica entre o coeficiente horizontal de permeabilidade e t_{50} observado nas dissipações em testes em solos argilosos (Figura 3.9). A correlação foi baseada nos valores de e e t_{50} obtido com o excesso de poro-pressão medido na posição U_2 (atrás da ponta do cone), porque nesta posição as medidas de poro-pressão resultaram em valores mais consistentes.

Interrompendo a cravação do piezocone é possível observar a dissipação do excesso de poro-pressão, podendo-se com isso, determinar o coeficiente de adensamento horizontal (C_h) *in situ* do solo.

O método de estimativa mais comumente utilizado no momento é aquele proposto por Houlby & Teh (1988), que leva em conta o índice de rigidez I_r do solo através da seguinte definição de fator de tempo:

$$T^* = C_h t / R^2 I_r^{1/2} \quad \text{Equação 3.13}$$

em que:

R: raio do piezocone utilizado;

t: tempo de dissipação

Na falta de informação do solo que permita determinar o índice de rigidez (I_r) Campanella et al (1995) sugere o uso de $I_r = 100$.

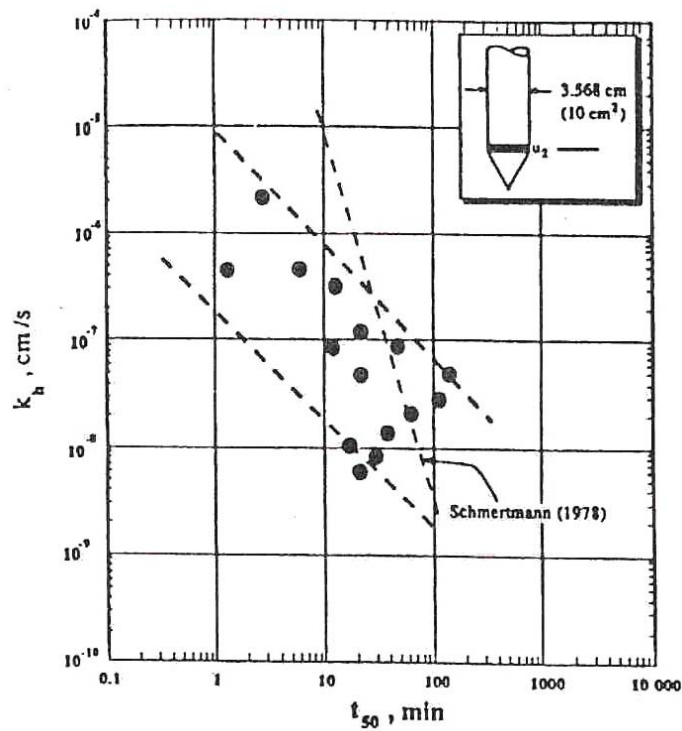


Figura 3.9 Correlação empírica de permeabilidade Robertson et al. (1992)

A Tabela 3.1 apresenta os valores de T^* para as duas posições mais utilizadas do elemento poroso: a face e a base do cone.

Tabela 3.1: Fator tempo T^* para análise dos ensaios de dissipação (Houlsby & Teh, 1988)

| $\Delta u / \Delta u_0$ (%) | Fator tempo T^* | |
|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | Elemento poroso face do cone | Elemento poroso base do cone |
| 80 | 0,014 | 0,038 |
| 70 | 0,032 | 0,078 |
| 60 | 0,063 | 0,142 |
| 50 | 0,118 | 0,245 |
| 40 | 0,226 | 0,439 |
| 30 | 0,463 | 0,804 |
| 20 | 1,040 | 1,600 |

Robertson et al. (1992) propuseram a estimativa direta de C_h a partir de t_{50} , conforme apresentado na Figura 3.10.

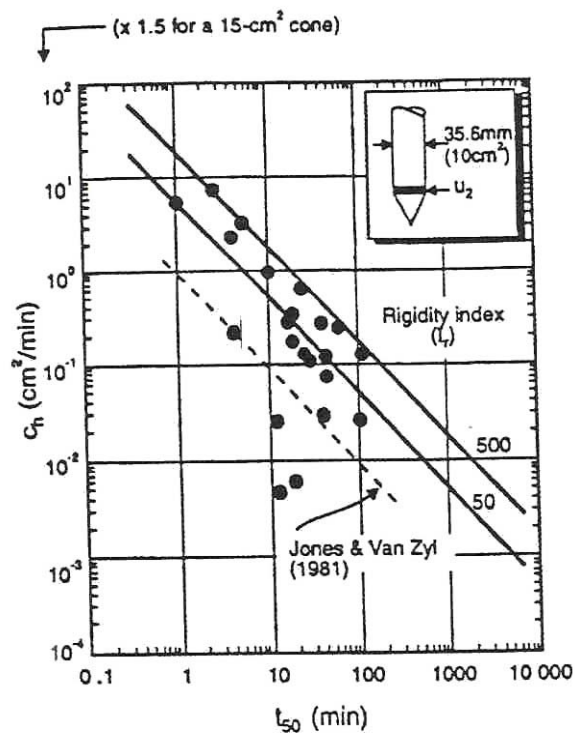


Figura 3.10 Estimativa direta de C_h a partir de t_{50} Robertson et al. (1992)

A estimativa do coeficiente de permeabilidade será feita neste trabalho como exposto a seguir. Os valores do coeficiente de adensamento horizontal, C_h , serão obtidos pela equação

3.13 com o tempo “t” para 50% da dissipação do excesso de poro-pressão gerado com a penetração do piezocone.

Para uma percolação unidimensional em um ensaio de compressão edométrico, o coeficiente de permeabilidade de um solo é definido pela Equação 3.12, que é uma simplificação da equação diferencial do adensamento de camadas de argila (Vargas, 1968).

Para a estimativa do módulo confinado (M) a partir do ensaio de piezocone será considerada a correlação empírica com a resistência de ponta, dada por:

$$M = \alpha \cdot q_c \quad \text{Equação 3.14}$$

em que:

M : é o módulo confinado (igual a $1/m_v = \Delta u / \Delta u_0$ (%)), sendo m_v o coeficiente de compressibilidade volumétrica, ou perda específica da água intersticial;

α : é um coeficiente de correlação empírica;

q_c : é a medida de resistência de ponta na camada ensaiada

Sanglerat (1972), Mitchell e Gardner (1975), Baldi et al (1986) e Robertson e Campanella (1983), compilaram vários valores da literatura para α , apresentados na Tabela 3.3 e Figura 3.11 abaixo.

Tabela 3.2 Valores de α para a estimativa do módulo de confinado para argilas (Mitchell e Gardner, 1975)

| q_c (bar) - w (%) | $M = 1 / m_v = \alpha q_c$ | |
|---------------------|----------------------------|--|
| $q_c < 7$ | $3 < \alpha < 8$ | |
| $7 < q_c < 20$ | $2 < \alpha < 5$ | Argilas de baixa plasticidade (CL) |
| $q_c > 20$ | $1 < \alpha < 2,5$ | |
| $q_c > 20$ | $3 < \alpha < 6$ | Siltes de baixa plasticidade (ML) |
| $q_c < 20$ | $1 < \alpha < 3$ | |
| $q_c < 20$ | $2 < \alpha < 6$ | Siltes de alta plasticidade e argilas (MH, CH) |
| $q_c < 12$ | $2 < \alpha < 8$ | Siltes orgânicos (OL) |
| $q_c < 7$: | | |
| $50 < w < 100$ | $1,5 < \alpha < 4$ | argilas orgânicas (OH) |
| $100 < w < 200$ | $1 < \alpha < 1,5$ | |
| $w > 200$ | $0,4 < \alpha < 1$ | |

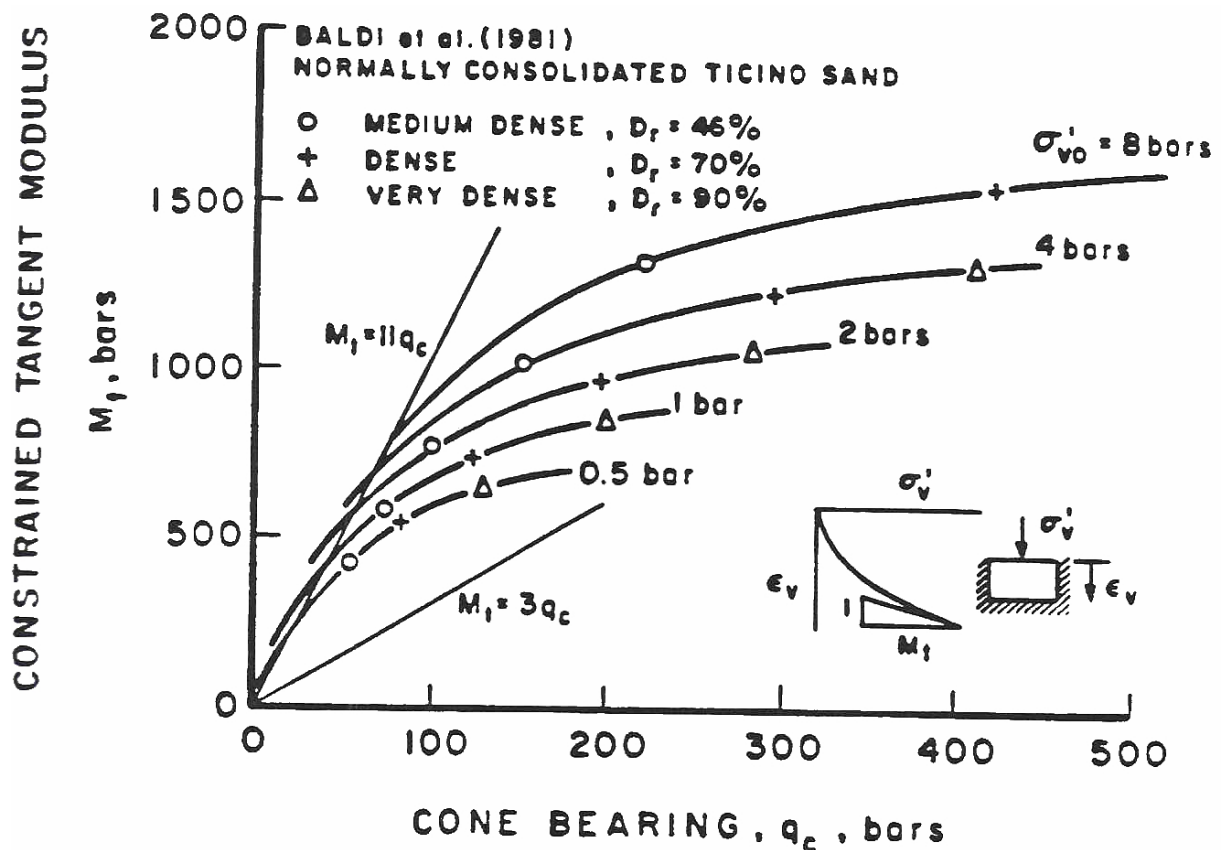


Figura 3.11: Relação entre a resistência de ponta q_c e o módulo confinado para areias normalmente consolidadas (Baldi et al, 1981 in Robertson e Campanella, 1983)

A dificuldade da escolha do valor α pode ser observada acima, onde uma gama muito ampla de valores são fornecidos pela literatura. A experiência pessoal e o conhecimento da geologia local são fatores importantes para a correta escolha do desse fator (Robertson e Campanella, 1983). O valor α é geralmente recomendado na faixa de 1,5 a 4,0 (Robertson e Campanella, 1983). Um valor de $\alpha=3$ se apresenta como uma estimativa mais encontrada nos ensaios já realizados em laboratório. Porém, como já mencionado, a escolha desse valor depende do julgamento e experiência (Robertson e Campanella, 1983).

3.6 Piezocone de Resistividade

3.6.1 Considerações gerais

Para Schino & Nery (citado por Elis, 1993), na perfilagem geofísica em poços de água, apesar da resistividade elétrica de uma rocha ser praticamente infinita, os perfis medem resistividades da ordem de alguns ohm.m. Isso porque a rocha contém água que a torna

condutiva. A água pura não é condutiva e só deixa passar a corrente elétrica quando contém sais dissolvidos: quanto mais salgada a água, mais condutiva (ou menos resistiva) ela se torna. Pode se dizer então, que um perfil de resistividade nada mais é que uma medição da quantidade de sais dissolvidos na água contida nos poros da rocha.

O ensaio de resistividade no solo consiste em introduzir uma corrente elétrica no mesmo e medir a facilidade (ou dificuldade) com que a corrente elétrica flui dentro dele. Essa resposta depende da combinação do teor de umidade do solo, da concentração de íons solúveis e do tipo de solo. Solos úmidos possuem resistividade menor do que solos secos. Solos finos (argilas) possuem resistividades menores do que solos grossos (areias). Solos com alta salinidade possuem baixa resistividade. Dessa maneira pode-se concluir que a resistividade do solo é influenciada pela porosidade, pela permeabilidade, pela porcentagem de íons no fluido contido nos poros e também pelos argilo-minerais.

Assim, deve-se deduzir que, ao se realizar um ensaio piezocone de resistividade, está-se medindo a resistividade do solo, acima do nível d'água, influenciada pelo teor de umidade. Espera-se, nessa situação, condutividades baixas e resistividades altas. Por outro lado, abaixo do nível d'água, os valores de condutividade/resistividade são constantes e influenciados pela salinidade da água. O parâmetro resistividade varia entre largos limites, mesmo para um único tipo de rocha, como apresentado na, Tabela 3.3 (Elis, 1993).

A determinação da resistividade nas rochas pode ser realizada em laboratório, através de testemunhos das rochas. Quando a resistividade é determinada no campo, deve-se considerar que as diferentes camadas de rochas possuem resistividades diferentes e sendo assim, mede-se uma resistividade aparente. O mesmo ocorre quando se está analisando o solo, que não é um meio homogêneo.

Tabela 3.3: Valores de resistividade elétrica de materiais conhecidos, Elis (1993).

| Material | Resistividade (ohm.m) |
|---------------------------------|-----------------------|
| Ar | ∞ |
| Águas doces superficiais | $10 - 10^3$ |
| Água marinha | 0,2 |
| Argilas | $10 - 10^2$ |
| Areias | $10^2 - 10^4$ |
| Areia saturada com água mineral | $10^{-1} - 10$ |
| Aluvião | $10 - 10^3$ |
| Conglomerados | $10 - 10^4$ |
| Arenitos | $10 - 10^8$ |
| Margas arenosas | $10 - 10^2$ |
| Calcários | $10^2 - 10^4$ |
| Basaltos | $10^2 - 10^5$ |
| Granitos | $10^2 - 10^5$ |
| Xistos | $10 - 10^3$ |
| Gnaisses | $10^2 - 10^4$ |

3.6.2 O piezocone de resistividade (RCPTU)

Além do uso de inclinômetros e sensores de temperatura, o piezocone de resistividade (RCPTU) (Foto 3.3) é um outro desenvolvimento da tecnologia do piezocone, relativamente recente (Campanella & Weemees, 1990). Esse recurso permite medir continuamente a resistência a um fluxo de corrente elétrica aplicada ao solo.



Foto 3.3: Dispositivo para medida de resistividade acoplado a piezocone da Unesp-Bauru.

Assim, é possível detectar, através da leitura dos valores de resistividade confrontados com valores de referência, a existência de possíveis pontos críticos. Esses valores de referência são estabelecidos a partir da experiência de campo ou partir de ambientes geológicos similares. Em áreas em que valores de referência são excedidos, pode-se então efetuar uma avaliação complementar através da coleta, em profundidades discretas, de amostras da água subterrânea, para uma posterior análise química. A combinação de ensaios RCPTU com uma amostragem discreta de águas subterrâneas proporciona um meio rápido e econômico de realizar caracterizações geoambientais de campo.

Os resultados de ensaios RCPTU (Davies & Campanella, 1995) mostram uma ampla variação para os valores da resistividade (condutividade), variando de 0,01ohm.m (10^6 μ S/cm) até 100 ohm.m (10 μ S/cm). A resistividade é bastante sensível, tanto a sais dissolvidos, como a contaminantes orgânicos de baixa solubilidade. Em países que costumam utilizar esses ensaios, o custo é praticamente o mesmo de ensaios com o piezocone padrão (CPTU), acrescido de mais ou menos 10% a 20% para considerar a depreciação do aparelho e,

também, para levar em conta a necessidade de tratamento adicional de dados (Davies & Campanella, 1995).

3.6.3 Fundamentos do ensaio RCPTU

A resistividade elétrica dos solos é determinada, primeiramente, medindo-se a resistência elétrica. Isso é feito a partir da medida da voltagem AC (V), através de um par de eletrodos alimentados constantemente com uma corrente (i). Essa resistência é calculada a partir da Lei de Ohm.

$$R = \frac{V}{i} \quad \text{Equação 3.15}$$

em que:

R: Resistência (ohm.m)

I: Corrente elétrica (A)

V: Voltagem (V)

Entretanto, a resistência medida não é uma propriedade intrínseca do material, mas uma função da área da seção transversal e do comprimento do material que conduz corrente. Assim, a resistividade (ρ) pode ser definida como:

$$\rho = \frac{a}{l} \cdot R = \frac{1}{C} \quad \text{Equação 3.16}$$

em que:

ρ : Resistividade (ohm-m)

a: Área de seção transversal (m²)

l: Comprimento (m)

R: Resistência (ohm)

C: Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)

Para o caso de um par de eletrodos num meio condutor homogêneo e isotrópico existe uma relação linear entre resistência e resistividade.

$$\rho = k_r \cdot R \quad \text{Equação 3.17}$$

em que:

k_r é a constante do aparelho, função de geometria do par de eletrodos.

A medida do módulo de resistividade é uma função da resistividade tanto do fluido presente nos poros como das partículas sólidas. O mecanismo de condução de corrente elétrica dominante é a transferência de carga através da condução eletrolítica, isto é, movimento físico de íons em resposta à aplicação de um campo elétrico. Em geral, quanto mais íons presentes no fluido dos poros; menor será a resistividade e maior será a condutividade.

Outro fator a considerar é a viscosidade desse fluido, que afeta a condutividade de um íon específico em um eletrólito. Por sua vez, o fator mais importante que afeta a viscosidade e, por conseguinte, a condutividade, é a temperatura do referido fluido.

Solos contaminados são normalmente um sistema multifásico composto de partículas sólidas do solo, APL (*Aqueous Phase Liquids*), NAPL (*Non-Aqueous Phase Liquid*) e ar. A medida do módulo de resistividade do solo é o resultado da condução (ou falta de condução), através dos componentes mencionados acima e da interação de um com outro. A dificuldade é identificar qual componente provoca mudanças na resistividade.

Das fórmulas que relacionam a resistividade dos diferentes componentes do solo para determinação do módulo de resistividade, a mais simples é a de Archie (1942), que é dada por:

$$F_c = \rho_b / \rho_f = a.n^{-m}.S_r^{-s} \quad \text{Equação 3.18}$$

em que:

F_c : Fator de formação intrínseco, depende da geometria dos poros;

ρ_b : resistividade do solo (ohm.m)

ρ_f : resistividade do fluido (ohm.m)

a : fator de escala da equação, que depende da mineralogia do solo

m : Constante que depende do tipo de solo. Para areias $m=5$ e para uma série de argilas varia de 1,8 a 3,0 (Jackson et al., 1978 citado por Weemees, 1990);

n : Porosidade do solo;

S_r : grau de saturação do solo;

s : expoente que depende da mineralogia do solo. Archie estimou como sendo igual a 2,0 e Dunlap et al. (1949) citado por Daniel, 1997 sugeriu valores entre 1,0 e 2,5.

Um trabalho que mostra a aplicação da Lei de Archie (1942) para a estimativa de resistividade de solos é apresentada por Daniel (1997).

3.6.4 Descrição do dispositivo de medida de resistividade

Durante a sondagem RCPTU, os eletrodos não respondem exclusivamente a uma única camada, a menos que essa camada esteja completamente dentro do espaçamento entre eles. Para um espaçamento entre eletrodos ser sensível a uma camada, esse deve ser menor que a espessura da camada. Um pequeno espaçamento de eletrodos possibilita detectar camadas finas com contraste de resistividade. Um maior espaçamento permite medir a resistividade média para uma maior penetração do campo elétrico dentro do solo, não perturbado. Isso resulta em uma medida mais precisa da determinação da resistividade do solo em um meio homogêneo.

O dispositivo para medida de resistividade, mostrado na Figura 3.12 e na Figura 3.13 (Davies e Campanella, 1995), é composto por um arranjo de quatro eletrodos. Tais condutores são feitos de latão, isolados por um material plástico e selados por anéis de vedação. Os eletrodos, no RCPTU descrito por Davies e Campanella (1995), têm 5 mm de largura e estão espaçados de 15 mm e 150 mm, de centro a centro.

No RCPTU acima citado, o menor espaçamento (15mm) é utilizado para detectar finas camadas, ao passo que o maior espaçamento entre eles (150mm), mede a resistividade média sobre ação mais abrangente do campo elétrico dentro do solo não perturbado.

Keya (1989) observou que a profundidade de penetração do campo elétrico é em torno de duas vezes o espaçamento do eletrodo. O RCPTU mostrado esquematicamente na Figura 3.12 tem, portanto, a capacidade de penetração de 30 mm a 300 mm, respectivamente para os pares mais internos e mais externos.

Medidas contínuas e simultâneas da voltagem são feitas através dos eletrodos de entrada e saída. A conversão da voltagem AC para voltagem *RMS* acontece dentro do furo. O eletrodo mais longe da ponteira é a fonte de corrente. Ele é posicionado no centro do isolamento para minimizar a distância do corpo do cone. O corpo do cone é aterrado e não irá conduzir nenhuma corrente. A condição ideal seria que toda corrente fosse conduzida para o eletrodo aterrado, ou seja, o mais próximo da ponteira.

O dispositivo para medida de resistividade da Unesp Bauru (Foto 3.4), utilizado, neste trabalho, possui a configuração dos eletrodos como no arranjo Werner, que utiliza dois eletrodos de emissão de correntes (AB) e dois eletrodos de medida de potencial MN. A distância “a”, entre todos os eletrodos é constante e igual a 15 mm, sendo que os eletrodos possuem espessura de 5 mm. A medida de resistividade aparente, para esse arranjo, é calculada através da equação:

$$\rho = 2 a (\Delta V / I)$$

em que

ρ : resistividade aparente (ohm.m);

a : distância entre os eletrodos (m);

ΔV : intensidade de corrente (mA)



Foto 3.4 Detalhe do dispositivo para medida de resistividade acoplado ao piezocone (RCPTU) da Unesp Bauru

3.6.5 Calibração do Piezocone de Resistividade

Para que seja possível realizar e confiar nos resultados de ensaios com o piezocone é necessário que este seja calibrado e previamente testado antes de cada ensaio. Uma atividade fundamental para a realização de ensaios de campo é a calibração e checagem dos equipamentos utilizados nesses ensaios, que deve ser realizada rotineiramente para garantir a qualidade dos dados obtidos (q_c , R_f , U), sendo que dentre os principais fatores de erro, pode-se citar a realização de uma calibração inadequada.

O RCPTU mede a resistência elétrica entre eletrodos a qual está relacionada com a resistividade do meio penetrado e a geometria dos mesmos. A resistência medida aumentaria se os eletrodos fossem posicionados mais distantes ou se a área de sua superfície diminuísse. A resistividade é um parâmetro do solo fundamental e, conseqüentemente, seu valor não depende da geometria dos eletrodos.

Para transformar resistência para resistividade, uma calibração de laboratório deve ser feita para ambos os pares de eletrodos de entrada e saída. Para minimizar os efeitos de borda, o RCPTU é colocado em um reservatório com água que envolva totalmente o dispositivo. Esse reservatório é preenchido com água. Adiciona-se sal (cloreto de potássio (KCl), cloreto de sódio (NaCl), por exemplo), pouco a pouco, e mede-se a condutividade para diferentes concentrações. Essa condutividade é medida com um condutímetro portátil e os valores são comparados com a condutividade medida com o dispositivo para medida de resistividade (RCPTU).

3.6.6 Procedimento de Ensaio

Os preparativos de um ensaio RCPTU são similares àqueles de qualquer outro ensaio CPTU (Robertson & Campanella, 1988). O único procedimento adicional é a conexão de um gerador de sinal no sistema de aquisição de dados para controlar o nível de corrente e a frequência para as medidas de resistência elétrica. Os dados são obtidos usando um sistema de aquisição de dados capaz de registrar, simultaneamente, a resistência de ponta, o atrito lateral, a poro-pressão, a temperatura, a inclinação e a resistividade elétrica, normalmente a intervalos de profundidade que variam de 10 a 50 mm.

3.6.7 Resultados típicos

A Tabela 3.4 apresenta valores típicos do módulo de resistividade medidos com o RCPTU e os correspondentes valores da resistividade do fluido presente nos poros. Como a condutividade (C) é o inverso da resistividade (R), é fácil converter uma na outra de acordo com a seguinte expressão:

$$C [\mu\text{S/cm}] = 10000/R [\text{Ohm-m}] \qquad \text{Equação 3.19}$$

Tabela 3.4: Resumo com valores típicos de resistividade (condutividade) com misturas de solo e fluidos (Davies & Campanella, 1995).

| Tipo de material | Resistividade Ω -m | | Condutividade μ S/cm | |
|--|---------------------------|-------------------|--------------------------|-------------|
| | solo ρ_b , | fluido ρ_f , | solo | Fluido |
| Água do mar | --- | 0,2 | --- | 50000 |
| Água potável | --- | >15 | --- | <665 |
| C. E. Fazenda McDonald – Argila (Richmond) | 1,5 | 0,3 | 6700 | 33300 |
| C. E. Laing Bridge – Argila (Richmond) | 20 | 7 | 500 | 1430 |
| C. E. Colebrook – Argila (Langley) | 25 | 18,2 | 400 | 550 |
| C. E. TC @ 232 – Argila (Langley) | 8 | --- | 1250 | --- |
| C. E. Strong Pit – Argila (Abbotsford) | 35 | --- | 285 | --- |
| C. E. Kidd 2 – Argila (Richmond) | 14 | 12,5 | 715 | 800 |
| C. E. Fazenda Mc Donald – Areia (Richmond) | 5-20 | 1,5-6 | 2000-500 | 6700-1670 |
| C. E. Laing Bridge – Areia (Richmond) | 5-40 | 1,5-10 | 2000-250 | 6700-1000 |
| C. E. Colebrook – Areia (Langley) | 70 | | 143 | |
| C. E. Strong Pit site – Areia | 115 | | 89 | |
| C. E. Kidd 2 (Richmond) – Areia | 1,5-40 | 0,5-21 | 6700-225 | 20000-475 |
| Chorume típico de aterro sanitário | 1-30 | 0,5-10 | 10000-330 | 20000-1000 |
| Área de barragem de rejeito (metais) Com chorume de sulfeto oxidado | 0,01-20 | 0,005-15 | 1000000-500 | 2000000-670 |
| Área de barragem de rejeito (metal) Sem chorume de sulfeto oxidado | 20-100 | 15-50 | 145-100 | 665-200 |
| Areia e pedregulho contaminados com arsênico | 1-10 | 0,5-4 | 10000-1000 | 20000-2500 |
| Área industrial – Contaminantes inorgânicos em areias | 0,5-1,5 | 0,3-0,5 | 20000-6500 | 33000-20000 |
| Área industrial – Areias e siltes contaminados por creosoto | 200-1000 | 75-450 | 50-10 | 135-22 |
| Área industrial – Contaminantes orgânicos em areia | 125 | --- | 80 | --- |
| Área do BC Place - Parte 2 – Vancouver (gasômetro) | 200-300 | --- | 50-33 | --- |
| Área do BC Place- Parte 2 (resíduos de madeira) | 300-600 | --- | 33-66 | --- |

C.E. = Campo experimenta

Os resultados da Tabela 3.4 acima mostram que a faixa de variação da resistividade (condutividade) é muito grande, cerca de 0,01 ohm-m (1000000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) para cerca de 100 ohm-m (10 $\mu\text{S}/\text{cm}$), sendo bastante sensível tanto, a sais dissolvidos, como a contaminantes orgânicos de baixa solubilidade.

3.6.8 Piezocone na investigação geotécnica de solos tropicais

No Brasil, o ensaio de penetração estático com o cone mecânico (cone de atrito ou cone de Begeman) tem sido utilizado há muito tempo nos mais diferentes tipos de solos e desempenharam um importante papel para a elaboração de métodos empíricos para a estimativa da capacidade de carga de estacas a partir de correlações com provas de carga, como aquele proposto por Aoki e Velloso (1975), largamente empregado na prática de projeto de fundações.

O piezocone foi introduzido no Brasil para investigação *off-shore* para a obtenção de informações necessárias a prospecção de petróleo. A sua aplicação em projetos geotécnicos tem sido basicamente para obtenção de parâmetros mecânicos de solos moles especialmente do Rio de Janeiro.

Atualmente são reconhecidas mundialmente as vantagens de utilização do piezocone como ferramenta para identificação detalhada do perfil geotécnico. A utilização do CPTU para esse fim no Brasil foi recentemente apresentada por Danziger et al. (1998) onde foram discutidos resultados de ensaios com o piezocone realizados na Rodovia Presidente Dutra, comparando-os com àqueles obtidos em sondagens de simples reconhecimento (SPT).

Esses autores concluíram que o piezocone permite um melhor detalhamento do perfil geotécnico, conforme defende Campanella et al., (1985), e é um recurso poderoso para complementar informações obtidas nas sondagens SPT. Entretanto, alguns dados mostram diferenças entre os resultados obtidos pelas duas técnicas. É importante lembrar que os ábacos de classificação do comportamento do solo a partir do CPT ou CPTU, como aquele sugerido por Robertson et al. (1986), foram desenvolvidos para os solos de países de clima temperado da América do Norte e Europa.

Os princípios para interpretação da resposta a penetração quasi-estática do cone ainda não foram definidos para esses solos tropicais, onde fatores como cimentação, não saturação, anisotropia e quebra da estrutura são complexos e difíceis de serem incorporados. Certamente esta abordagem será distinta dos procedimentos padrões para análise do comportamento de solos sedimentares, que foram desenvolvidos na Europa e América do Norte.

Essas questões são discutidas por Schnaid et al. (1998) que sugerem que ensaios SCPT podem ser utilizados para avaliação do tipo de solo a partir da relação entre G_{max}/q_c . Esta recomendação está de acordo com as conclusões de Giacheti e Carvalho (1994), que mostraram as diferenças de comportamento de horizontes lateríticos e não lateríticos a partir das limitações de formulações desenvolvidas para solos sedimentares para estimativa de G_{max} a partir de valores de N_{SPT} e q_c .

3.6.9 Tecnologia do piezocone na investigação geoambiental

Devido à preocupação com a questão ambiental, as áreas de disposição de resíduos têm merecido especial atenção por parte dos órgãos públicos e instituições de pesquisa relacionadas ao meio ambiente, no sentido de avaliar o nível de poluição causado por estes resíduos e procurar estabelecer procedimentos para minimizar seus impactos nocivos. Dentro desse contexto, a geofísica tem se mostrado como uma das principais ferramentas para a caracterização geoambiental do subsolo. Entretanto, para atender todas as necessidades de um bom programa de investigação e caracterização é necessário que este programa seja complementado com a utilização de algumas técnicas invasivas que permitam amostragem de água, gás e solo.

O piezocone é uma ferramenta consagrada para a descrição contínua do perfil geotécnico, definição da posição do nível d'água e do regime hidrológico, bem como para estimativa de parâmetros mecânicos dos solos. A identificação de perfil geotécnico a partir de dados desta ferramenta, baseado no ábaco de classificação de Robertson et al. (1986), apresentam limitações para os solos das regiões de clima tropical (Giacheti, 2001), (Marques, 2002) onde apesar desse ábaco não resultar na classificação textural do solo, possibilita identificar as camadas que apresentam comportamentos distintos, sendo esse o objetivo do sistema de classificação em questão. Segundo esses autores, é conveniente uma adaptação no ábaco de classificação de Robertson et al. (1986) para que esse possa contemplar solos tropicais. Enquanto isso não é possível, recomenda-se, para uma melhor identificação do perfil geotécnico, a amostragem do solo utilizando amostradores especiais que se adaptam aos equipamentos do CPT como, por exemplo, o amostrador da direct-push. Essa amostragem deve ser feita em regiões do perfil, selecionadas com base nos resultados da sondagem CPT.

Os valores correspondentes à resposta da penetração do piezocone no terreno (q_c, f_s e u) podem auxiliar na identificação da possível presença de contaminantes presentes no solo. Entretanto, para se obter informações relativas à geoquímica do solo e especialmente dos contaminantes presentes é necessário que se utilize acessórios que podem ser incorporados ou

utilizados em conjunto com o piezocone, como os amostradores de solo, água e vapores. O emprego de sensores especiais anexados ao piezocone é um recurso mais interessante para esse fim. Um dos dispositivos que pode ser utilizado é o dispositivo de medida de resistividade, o qual permite detectar a presença de contaminantes orgânicos ou inorgânicos, livres ou dissolvidos na água subterrânea (Campanella et al., 1994). A Figura 3.14 apresenta valores típicos de resistividade obtidos com o dispositivo para medida de resistividade acoplado ao piezocone (RCPTU) para um areia limpa, típica de países de clima temperado, em condições controladas (Campanella, 1998). A utilização desta técnica complementa os resultados de ensaios elétricos de superfície.

Amostras de águas subterrâneas podem ser obtidas com a utilização de amostradores especiais introduzidos no mesmo furo aberto pelo processo de cravação do piezocone. Além disso, é possível monitorar o processo de amostragem e estimar a condutividade hidráulica dos solos. A principal vantagem dessa técnica é não escavar material contaminado, reduzir o contato do operador com esse material e permitir a obtenção de amostras representativas não perturbadas pelo processo de amostragem.

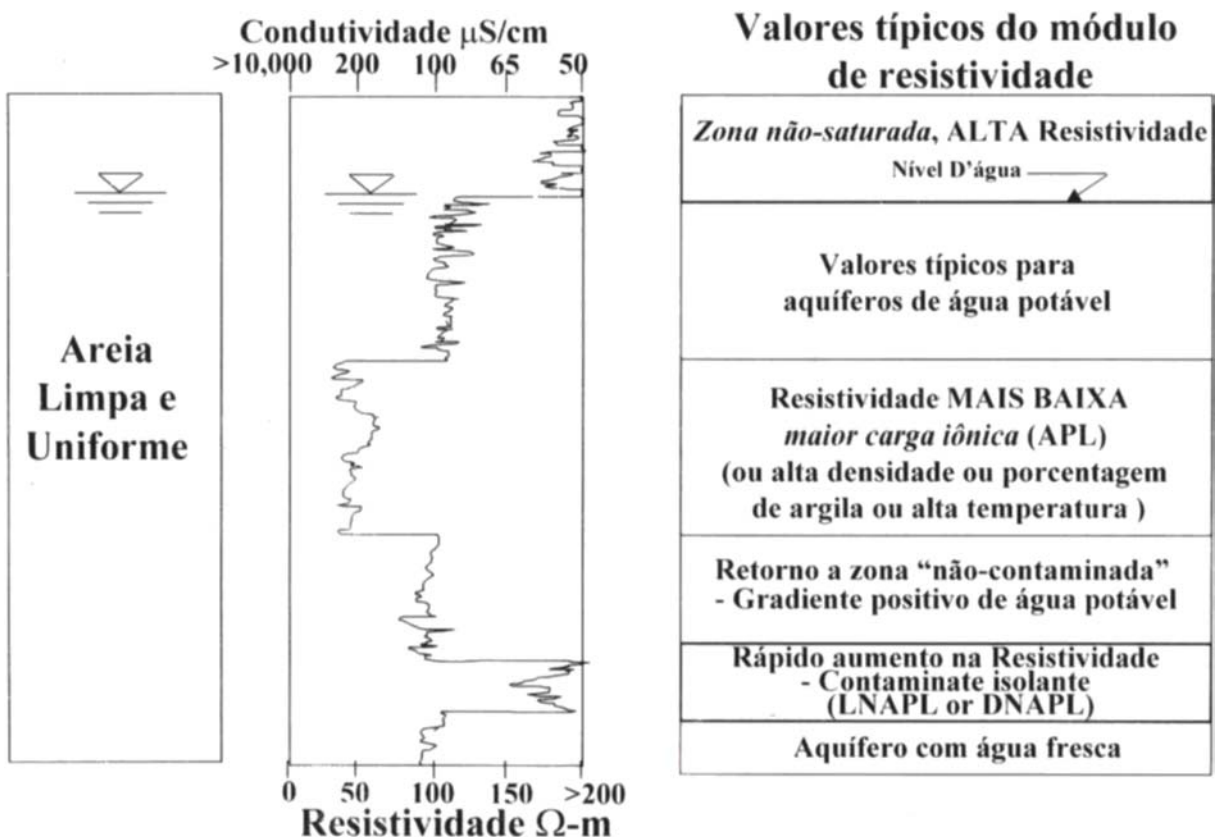


Figura 3.14 Valores típicos de resistividade obtidas com o dispositivo de medida de resistividade, para uma areia limpa típica de países de clima temperado (Campanella, 1998)

3.6.10 Amostradores

Para uma análise geoquímica, especialmente para avaliação do tipo e quantidade de contaminantes presentes, é necessária a amostragem do solo, água e/ou gás. Quando possível, o recurso mais interessante é amostrar água, pois é nela que se concentra a maioria dos contaminantes. Além disso, sua amostragem é mais fácil. Diversos são os dispositivos existentes no momento para amostragem do solo, água e/ou gás e monitoramento de águas subterrâneas.

3.6.10.1 Amostradores de solo

Na Foto 3.5 é apresentado um amostrador de solo que é utilizado como acessório importante da tecnologia do piezocone. As amostras de solo são coletadas, utilizando tubos plásticos de parede fina (Foto 3.6). A vantagem do emprego dessa técnica é a produção de poucos resíduos e redução da exposição dos operários ao contaminante.

O amostrador, da marca Geoprobe®, consiste de um tubo de PVC rígido e transparente, com uma ponteira cônica maciça e outra de PVC flexível, ambas instalada na extremidade inferior.

Primeiramente, o amostrador é cravado com o mesmo equipamento utilizado para o ensaio CPTU até a profundidade de amostragem, quando a ponteira cônica é destravada. Logo após, conjunto haste-amostrador é empurrado até a profundidade final de amostragem. Nessa operação a ponteira cônica é empurrada pelo solo para dentro do amostrador e a de PVC, que é oca e assim permite a entrada do solo, permanece na extremidade. Terminada a manobra, o amostrador é puxado para a superfície sendo que nessa etapa a ponteira de PVC flexível é fechada pelo peso próprio do solo, impedindo que o mesmo caia dentro do furo (Figura 3.15).



Foto 3.5: Amostrador de solo *direct push*



Foto 3.6: Amostra de solo coletada, em *liner* de amostrador da tecnologia *direct-push*

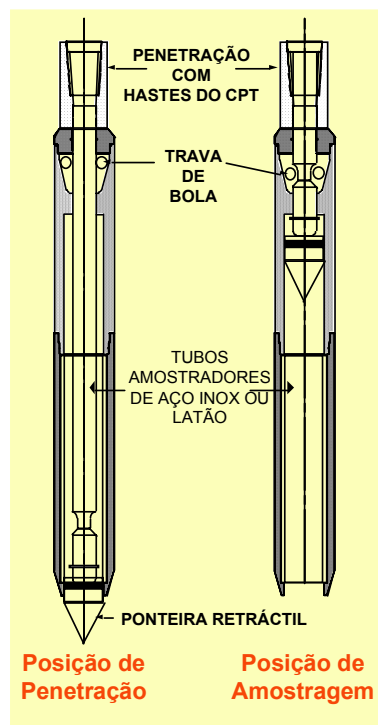


Figura 3.15: Desenho esquemático de um amostrador de solo com tubo de plástico para uso na investigação geoambiental (Giacheti, 2001)

3.6.10.2 Sistema *direct-push* – Amostragem de água

O sistema “Point 15” têm sido designado tanto para investigação de subsolo quanto a coleta de amostras de águas subterrâneas. A amostra de água pode ser coletada no instante, ou esta amostra pode ser coletada após dias ou semanas. A instalação do sistema necessita de hastes que permitam a cravação e o armazenamento da amostra, por um longo tempo de uso. Este sistema permite que se possa retirar várias amostras ao longo do tempo não necessitando de se fazer novas perfurações.

O sistema “Point 15” usa como material na haste aço inoxidável ou tubo de 80 PVC (38mm), envolvendo o sistema, e utiliza como ponteira uma combinação de metais para resistir uma maior profundidade de cravação. O sistema é envolvido com Neoprene para prevenir infiltração de fluidos até a profundidade desejada. A coleta é feita com tubos de polipropileno 3/8” com micro-válvula de pé, a qual permite extração de pequenas quantidades de água até profundidades de 20 m. Permite ainda a identificação da posição do nível d’água.



Foto 3.7: Penetração de amostrador de água *direct-push* sendo executado no campo (www.geoprobe.com)

É um processo rápido, sem geração de resíduos, e quando realizado em maiores quantidades permite a estimativa da permeabilidade e o estabelecimento das direções de fluxo. Em terrenos pouco permeáveis o tempo de recarga é longo, o que dificulta a coleta. É mais adequado para medições rápidas (até 24 horas). Pode ser utilizado como sistema de monitoramento por longo período, porém tem custo elevado.

Descreve-se a seguir o procedimento utilizado para amostragem de água. Inicialmente, crava-se o amostrador até a cota onde deseja-se iniciar a amostragem da água, Figura 3.16(a). Para isso é utilizado o mesmo penetrômetro para cravar o piezocone. A profundidade é determinada com base nos resultados de resistividade e do perfil geotécnico obtidos através do RCPTU. Atingida a profundidade, inicia-se a inserção do filtro e separação da ponteira cônica Figura 3.16(b). O filtro está mostrado na Foto 3.8. Inicia-se, então, a coleta

de água dentro do filtro por bombeamento Figura 3.16(c). O tempo de execução dessa etapa depende da permeabilidade do solo, pode ser praticamente imediata para solos arenosos, ou demorar horas para solos argilosos. Terminada a coleta, recomenda-se completar o furo com calda de cimento (Figura 3.16(d)).

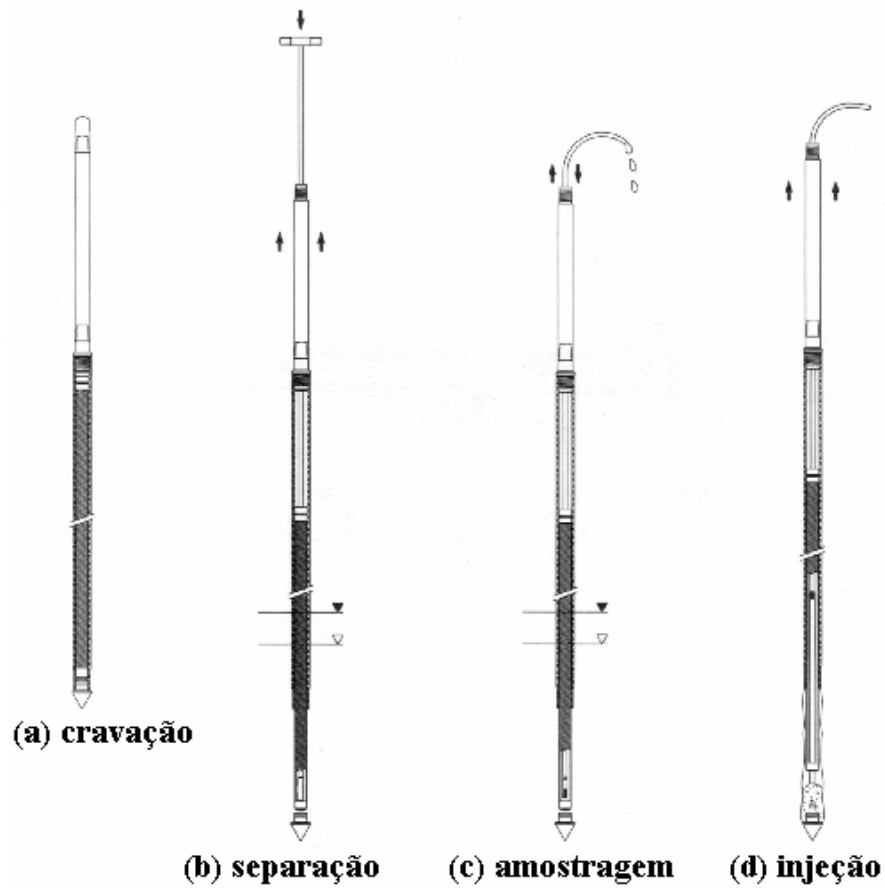


Figura 3.16 Amostrador direct-push.(Giacheti, 2001)



Foto 3.8: Filtro do amostrador de água direct-push

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Locais Estudados

O presente trabalho foi realizado com base em resultados de ensaios executados em três áreas: aterro sanitário de Bauru, cidade situada no interior do estado de São Paulo; campo experimental do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo (USP), em São Paulo; e uma área localizada no litoral do estado do Paraná, próximo ao cais do porto da cidade de Paranaguá. No aterro e no litoral do Paraná ensaios de geofísica de superfície foram executados, preliminarmente aos ensaios RCPTU, servindo de orientação para a locação destes. Ensaios de dissipação de poro-pressões utilizando-se de graxa e glicerina para saturação do elemento poroso foram executados no aterro e no campo experimental do IAG-USP. No aterro sanitário foram, também, coletadas amostras de água e solo, em pontos previamente selecionados para caracterização a partir de ensaios de laboratório.

4.1.1 Aterro Sanitário da cidade de Bauru-SP

4.1.1.1 Aspectos Gerais

A cidade de Bauru localiza-se a oeste da cidade de São Paulo, ocupando uma área de 702 km² (Figura 4.1). O centro da cidade apresenta coordenadas de 22°21'30" latitude sul do equador e 49°01'37" longitude oeste de Greenwich.

A área ocupada pelo município pertence a Bacia Sedimentar do Paraná e esta inserida no Planalto Arenítico-Basáltico do estado de São Paulo (Planalto Ocidental Paulista), onde o quadro geológico regional é dominado por rochas do Grupo Bauru (Cretáceo Superior, Formações Marília e Adamantina) recobrimo rochas vulcânicas da Formação Geral que afloram em direção ao vale do rio Tietê. O grupo Bauru de deposição flúvio-lacustre corresponde a um quarto ciclo de deposição mesozóica, de idade cretácea superior, sendo que na área do município ocorrem as formações Adamantina, subjacentes à Formação Marília.

A textura do solo é predominantemente areia fina pouco argilosa, porosa, colapsível, cuja compacidade aumenta com a profundidade, possuindo comportamento laterítico nos primeiros metros de profundidade.

O local estudado é o aterro sanitário da cidade de Bauru (aproximadamente 330.000 habitantes, conforme o CENSO 2001). Localiza-se a 15km do centro da cidade, em direção ao

leste. A área deste aterro situa-se a aproximadamente a 1 km de uma área de drenagem. Existem, ainda, áreas de pastagem cujas sedes estão instaladas num raio superior a 2 km.

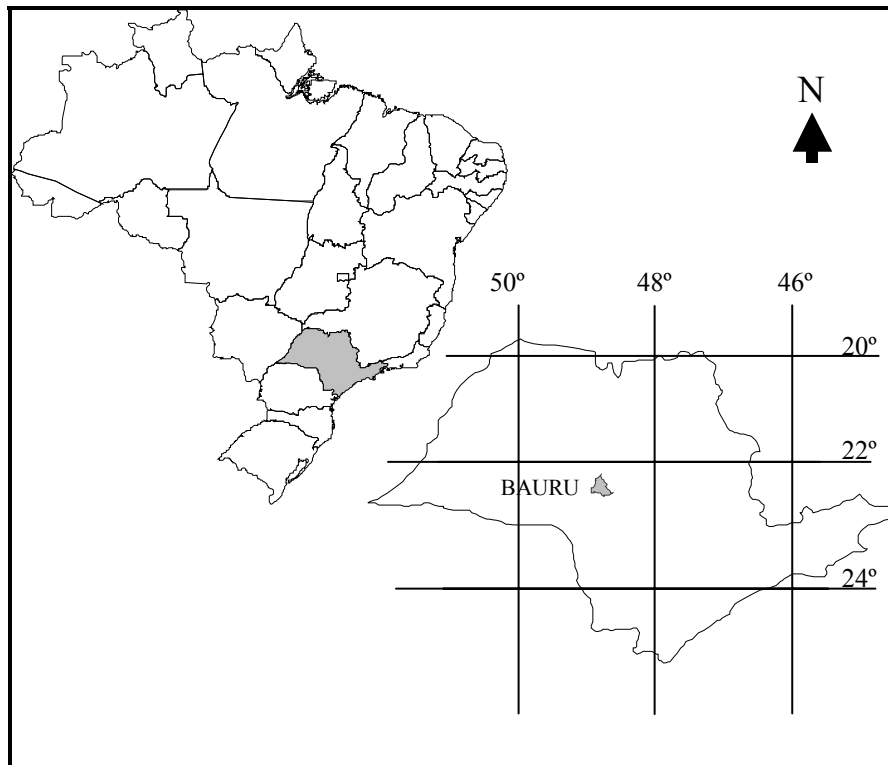


Figura 4.1: Localização da cidade de Bauru, onde se localiza o aterro para resíduos sólidos estudado.

4.1.1.2 Descrição do aterro

O aterro de Bauru (Foto 4.1) foi projetado, em 1992, para uma vida útil estimada em 10 anos. Além da atual área disponível de 300.000 m², possui, também, uma área contígua que poderá vir a ser utilizada para futuras expansões ou eventuais emergências. Atualmente, o aterro encontra-se na sua terceira e última camada prevista em projeto. As áreas de cada camada são assim definidas em projeto: 1º camada: 24.858 m², 2º camada: 76.516 m² e 3º camada: 90.276 m². Para a estimativa da vida útil do aterro foi considerado no projeto inicial um volume total de 958.250m³, dois quais, 766.600m³ correspondem ao volume ocupado pelos resíduos (80% do total) (FIPAI, 1992).

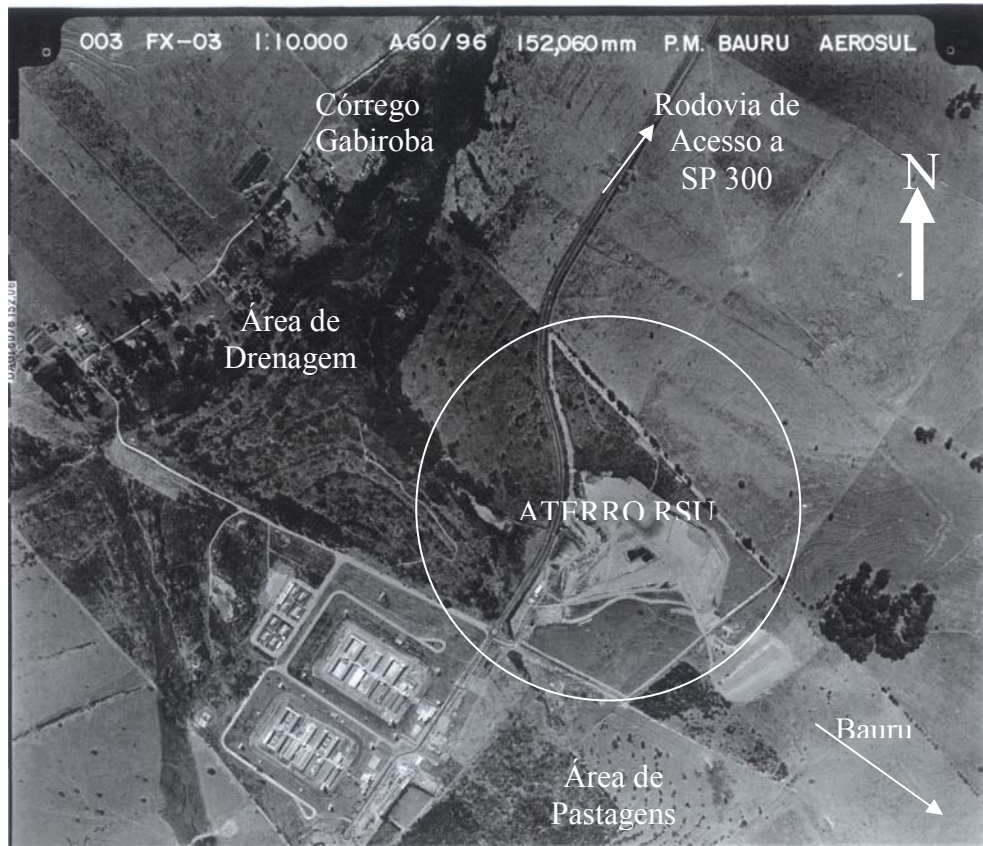


Foto 4.1: Foto aérea (de 1996) do local de implantação do aterro de Bauru.



Foto 4.2: Vista do aterro de Bauru (Julho/2003) em que se observa, em primeiro plano, a 1ª Camada de disposição de resíduos.

4.1.1.3 Aspectos Geológicos

O aterro está sobre uma área caracterizada geologicamente por arenitos do Grupo Bauru. O solo superficial nas proximidades é constituído ora por uma camada de aluvião de areia fina, silto-argilosa de cor acinzentada, seguida de solo coluvionar, ora, do próprio coluvião composto por areia argilosa, marrom-avermelhada. Abaixo dessas camadas é encontrado o solo de alteração de arenito sobre a rocha inalterada (FIPAI, 1992).

O solo da área do aterro possui textura de areia fina a média argilosa. Segundo a classificação MCT é classificado como solo arenoso de comportamento laterítico (LA'). O lençol freático localiza-se a uma profundidade no mínimo superior a 5m da cota da base do aterro (FIPAI, 1992)

4.1.1.4 Ensaios realizados

A partir de novembro de 2001, o Grupo de Pesquisa em Geotecnia de Solos Tropicais da Unesp de Bauru, passou a realizar ensaios no local. Para o desenvolvimento desta pesquisa foram realizadas duas campanhas de ensaios elétricos de superfície, uma campanha de ensaios CPTU e três campanhas de ensaios RCPTU, duas delas com coleta de amostras de solos e água. Também foram instalados, no local, poços de monitoramento temporário. A localização desses ensaios são apresentados na Figura 4.2.

Paralelamente a estes trabalhos foram realizados ensaios de caracterização de solo em amostras coletadas na região do aterro, em um talude localizado fora da cava de resíduos e à nordeste desta. As amostras deformadas e indeformadas foram retiradas das profundidades 1,7 m; 3,7 m e 7,0 m deste talude (Mondelli, 2004).

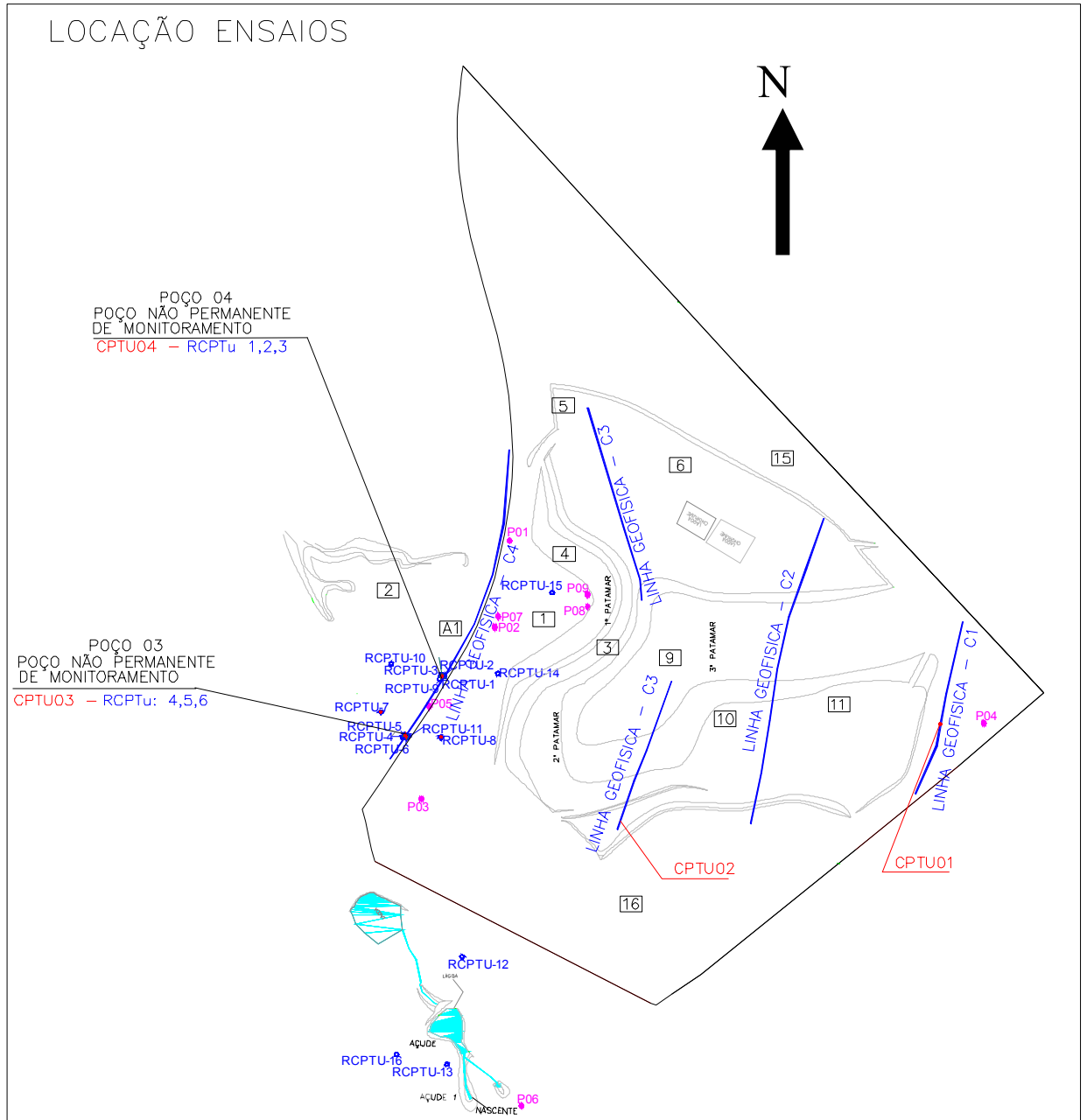


Figura 4.2: Localização dos diversos ensaios realizados na área do aterro para resíduos sólidos urbanos de Bauru.

4.1.1.4.1 Caracterização do solo do aterro sanitário de Bauru - Resultados do EIA-RIMA (FIPAI, 1992)

Por ocasião da implantação do aterro sanitário de Bauru, foi executado o Estudo de Impacto Ambiental e seu respectivo Relatório de Impacto do Meio Ambiente (EIA-RIMA), pelos órgãos competente. A seguir apresenta-se um resumo da caracterização do solo contida no volume 5 destes documentos (FIPAI, 1992)

Tabela 4.1 Resultados dos ensaios de caracterização granulométrica e táctil-visual da área do aterro para resíduos sólidos urbanos de Bauru (FIPAI, 1992).

| Amostra | Granulometria | | | | Textura |
|----------|-----------------|----------------|-----------|------------|---------------------|
| | Areia Média (%) | Areia Fina (%) | Silte (%) | Argila (%) | |
| 1 | 1,0 | 81,0 | 2,0 | 16,0 | Areia Fina Argilosa |
| 2 (verm) | 2,0 | 57,0 | 5,0 | 36,0 | Areia Fina Argilosa |
| SPT 3 | 3,0 | 74,0 | 6,0 | 17,0 | Areia Fina Argilosa |
| SPT 4 | 4,0 | 94,8 | 0,2 | 1,0 | Areia Fina |
| SPT 5 | 1,0 | 61,0 | 14,0 | 24,0 | Areia Fina Argilosa |
| SPT 6 | 4,0 | 87,0 | 4,0 | 5,0 | Areia Fina Argilosa |
| SPT 9 | 2,0 | 88,0 | 3,0 | 7,0 | Areia Fina Argilosa |
| SPT 10 | 4,0 | 80,0 | 5,0 | 11,0 | Areia Fina Argilosa |
| SPT 10A | 2,0 | 86,0 | 3,0 | 9,0 | Areia Fina Argilosa |

Na Figura 4.3 (a) é apresentado um esquema representativo do perfil admitido para o aterro de Bauru, sendo que este foi elaborado com base nas informações do EIA/RIMA. A localização desses pontos e dos SPT realizados para o EIA/RIMA do aterro de Bauru são apresentados na Figura 4.3 (b).

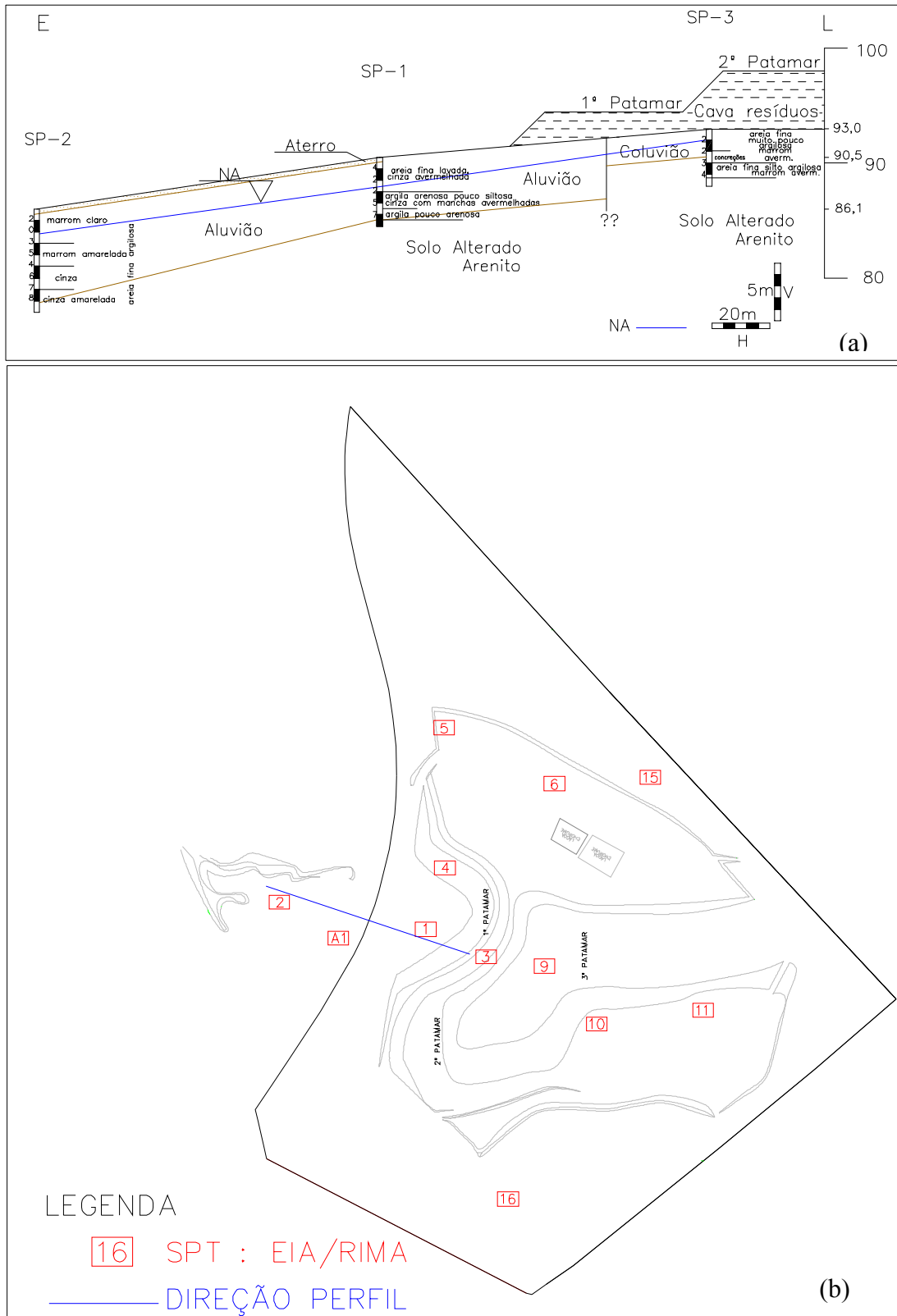


Figura 4.3: Direção e detalhe do perfil representativo do aterro de Bauru com base nos dados do EIA-RIMA (FIPAI, 1992) (a) e Localização das sondagens SPT na área do Aterro Sanitário de Bauru (b).

4.1.1.4.2 *Ensaio elétrico de superfície*

Foram executadas, inicialmente campanhas de eletrorresistividade de superfície, pela técnica do caminhamento elétrico. Estes ensaios foram realizados antes e após o período de chuvas na região, para possibilitar a avaliação do efeito das águas pluviais nos resultados (Elis, 2002). O objetivo destas campanhas foi o de orientar a localização das sondagens intrusivas que seriam feitas posteriormente, avaliando-se também o caminhamento da possível pluma de contaminação. Nestas etapas foi utilizado o sistema de resistividade Iris SYSCAL R2, com potência máxima de 250 W e resolução de 1 mV, que aparece em detalhes nas Foto 4.3 e Foto 4.4 abaixo, sendo que a Foto 4.5 mostra um momento da execução dos ensaios no aterro de Bauru.



Foto 4.3: Detalhe do resistivímetro utilizado no Aterro de Bauru-SP por técnicos do IAG da USP.



Foto 4.4: Detalhes do resistivímetro utilizado no momento da realização da 1ª campanha de Geofísica, no aterro de Bauru, realizada por técnicos do IAG da USP.



Foto 4.5: Ensaio de Eletrorresistividade de Superfície pela técnica do Caminhamento Elétrico Dipolo-Dipolo, sendo executada no aterro de Bauru.

Na primeira campanha, antes do período de chuvas (outubro de 2001) foram executadas 4 linhas de caminhamento elétrico dipolo-dipolo, denominadas linhas 1; 2; 3 e 4. A localização dessas linhas procurou cobrir uniformemente toda a área do aterro estudado (Figura 4.4). O espaçamento utilizado entre os dipolos foi de 10 m, tendo sido amostrados 5 níveis de profundidade teóricas, permitindo abranger uma faixa de investigação de 30 m (10 m, 15 m, 20 m, 25 m, 30 m).

Na segunda campanha, logo após o período chuvoso na região (abril 2002), foram realizados ensaios de caminhamento elétrico nas mesmas linhas 1; 2; 3 e 4, com espaçamentos iguais ao da primeira campanha. Foram, também, executados ensaios com o método EM indutivo na linha 3 (3EM) e em uma linha denominada (5EM), investigando profundidades teóricas de 7,5 m e de 15 m. Para se estudar a profundidade da zona saturada e o fluxo subterrâneo na área foram executados, nesta etapa, 7 sondagens elétricas verticais (SEV).

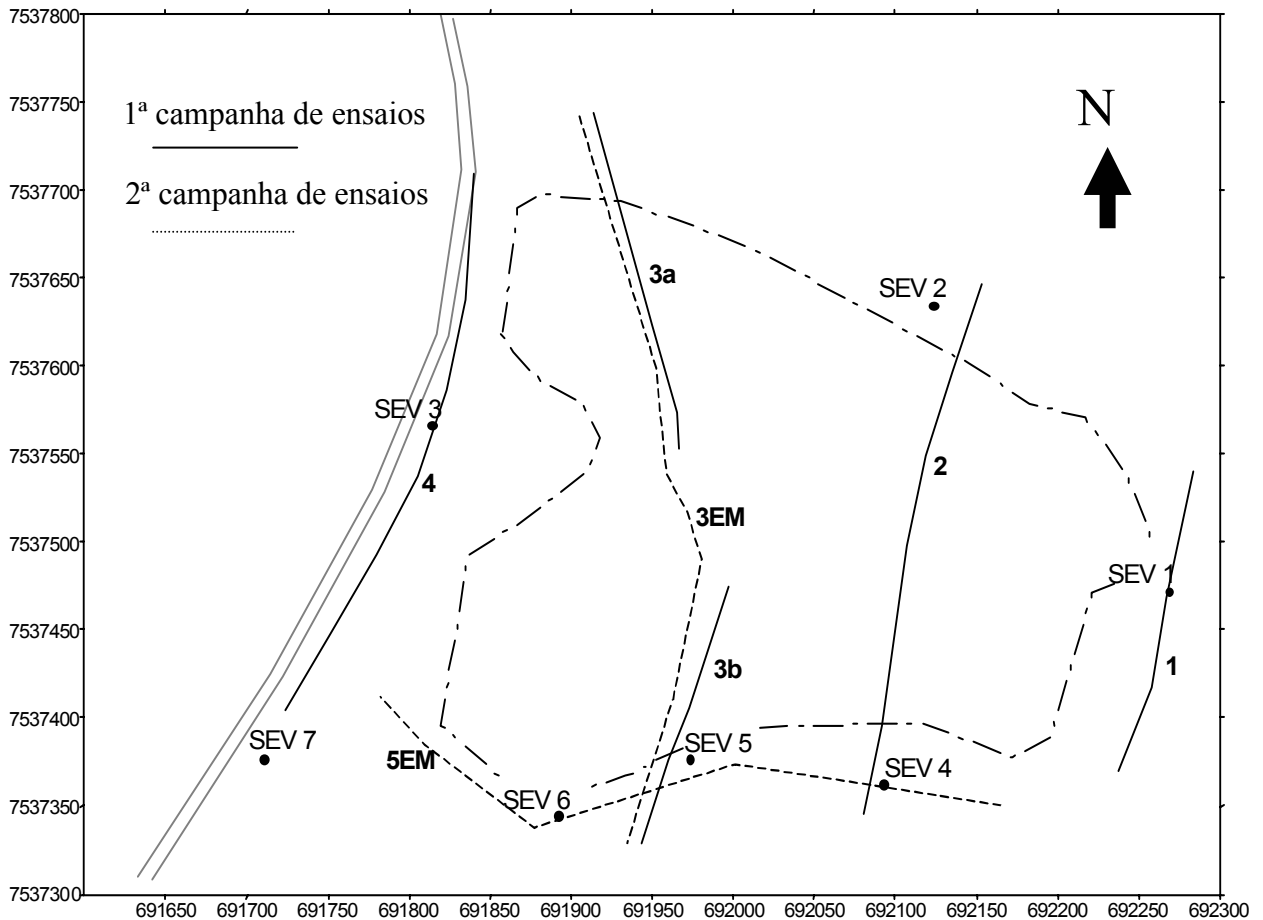


Figura 4.4 Localização das linhas e pontos de ensaio na área do aterro (Elis, 2001).

4.1.1.4.3 Sondagens com Piezocone e Piezocone de resistividade

Foram realizadas quatro campanhas de ensaios piezocone totalizando quatro ensaios com piezocone e dezesseis ensaios com piezocone de resistividade.

O local desses ensaios são apresentados na Figura 4.5 e compreendem, de maneira geral, o seguinte:

- CPTU 01, a montante do aterro;
- CPTU 02, dentro do aterro, fora de sua cava de resíduos;
- CPTU 03, RCPTU 04, 05, 06 e 11, a jusante do aterro, no entorno do poço de monitoramento temporário PMT03;
- CPTU 04, RCPTU 01, 02, 03 e 09, jusante do aterro, no entorno do poço de monitoramento temporário PMT04;
- RCPTU 08, 14 e 15, a jusante do aterro, próximos a cava de resíduos;
- RCPTU 07 e 10, a jusante do aterro, próximos à erosão na área de drenagem;

- RCPTU 12, 13 e 16, em área fora do aterro.

Ensaio de dissipação de poro pressão foram executados no CPTU 3 e RCPTU 5, utilizando-se duas formas diferentes para registro de poro-pressão: a convencional, com o elemento poroso saturado com glicerina, e também com o filtro de cavidade preenchido com graxa automotiva, com o objetivo de se estimar a permeabilidade do solo e avaliar a eficiência do recurso pouco convencional do filtro de cavidade com graxa.

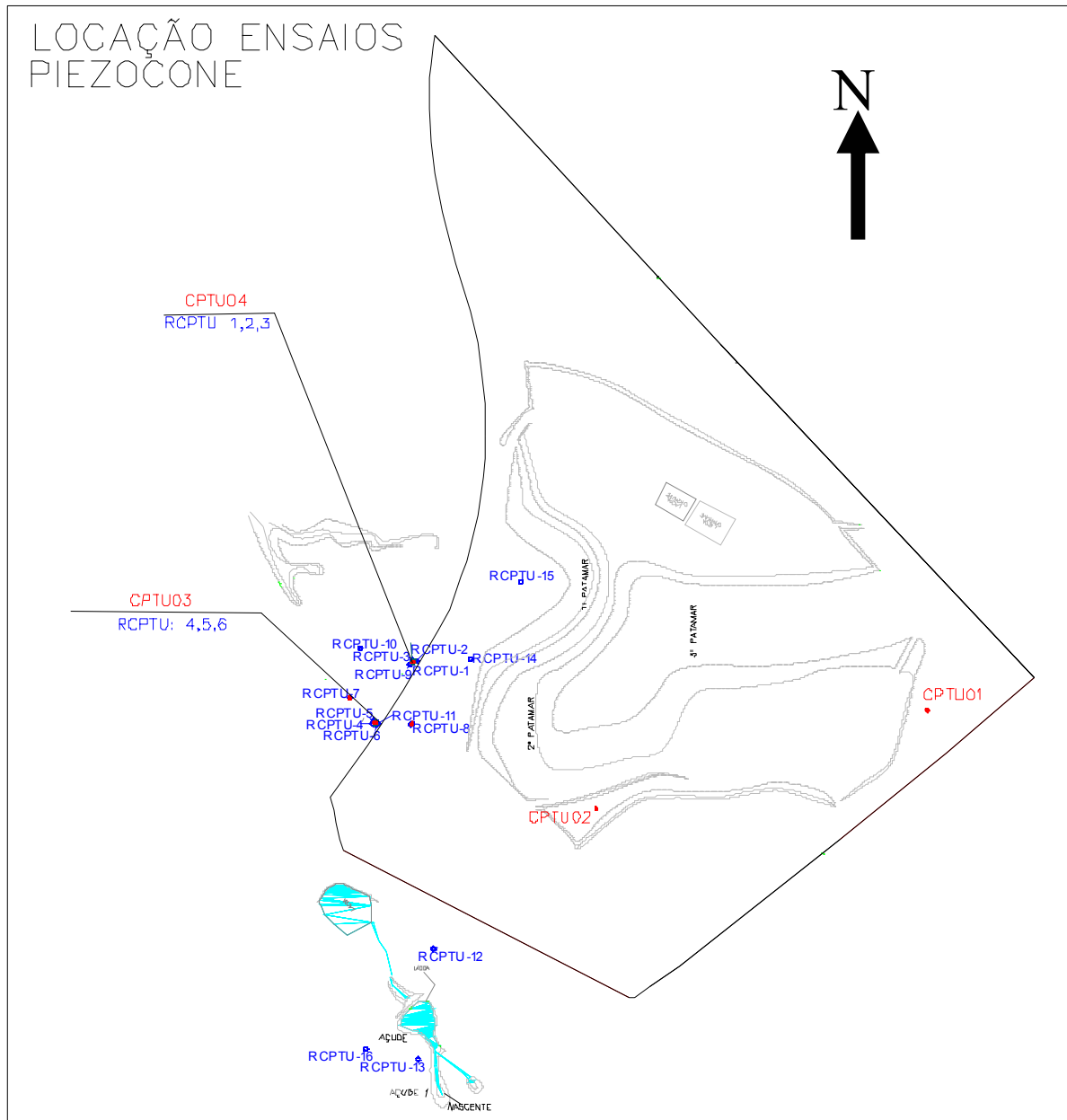


Figura 4.5 Localização dos ensaios CPTU e RCPTU executados no aterro de Bauru.

4.1.1.4.4 Amostragem de água/solo e poços temporários de monitoramento

No aterro de Bauru-SP, em alguns dos locais onde se executaram as sondagens intrusivas CPTU e RCPTU, coletaram-se, também, amostras de solo e água para análise laboratorial, sendo que para estas coletas utilizou-se o sistema Geoprobe® para amostragem de água (Foto 4.6) e solo (Foto 4.7). Para permitir a obtenção futura de novas coletas de água para análise, foram executados com o mesmo penetrômetro multi-função (Foto 4.8) utilizado para a execução das sondagens CPTU e RCPTU, 2 poços temporários de monitoramento (Foto 4.9). Esses poços de monitoramento foram executados no mesmo local do CPTU3 e CPTU 4, na mesma época da realização dos ensaios RCPTU executados nestes locais.



Foto 4.6: Amostragem de água na área do aterro de Bauru utilizando o Geoprobe®.



Foto 4.7: Amostragem de solo utilizado no aterro de Bauru utilizando o Geoprobe®.



Foto 4.8: Perfuração do poço temporário de monitoramento no aterro de Bauru



Foto 4.9: Detalhe de um dos poços temporários de monitoramento instalado no aterro de Bauru.

4.1.2 Litoral do Paraná - Paranaguá

4.1.2.1 Aspectos Gerais

A área de estudo situa-se na planície litorânea do estado do Paraná, junto a cidade de Paranaguá. Está distante a aproximadamente 300 m de um braço de mar, em local onde também está localizado o Porto de Paranaguá. Neste local está ocorrendo a contaminação do aquífero litorâneo sedimentar raso, de água doce, possivelmente devido à intrusão de cunhas de água salina. Nesta área existem poços perfurados a mais de 20 anos, tanto rasos como profundos, utilizados para o abastecimento industrial, estando diversos deles paralisados devido aos teores de cloretos nestas águas. Informações pouco precisas obtidas junto a antigos

funcionários de uma empresa que atua no local indicam que esses poços, antes com boa qualidade de água, acabaram se tornando salobros, e esse problema vem se agravando no transcorrer dos anos. O monitoramento dos teores de sais indica um teor crescente ao longo dos anos (De Mio, 2003).

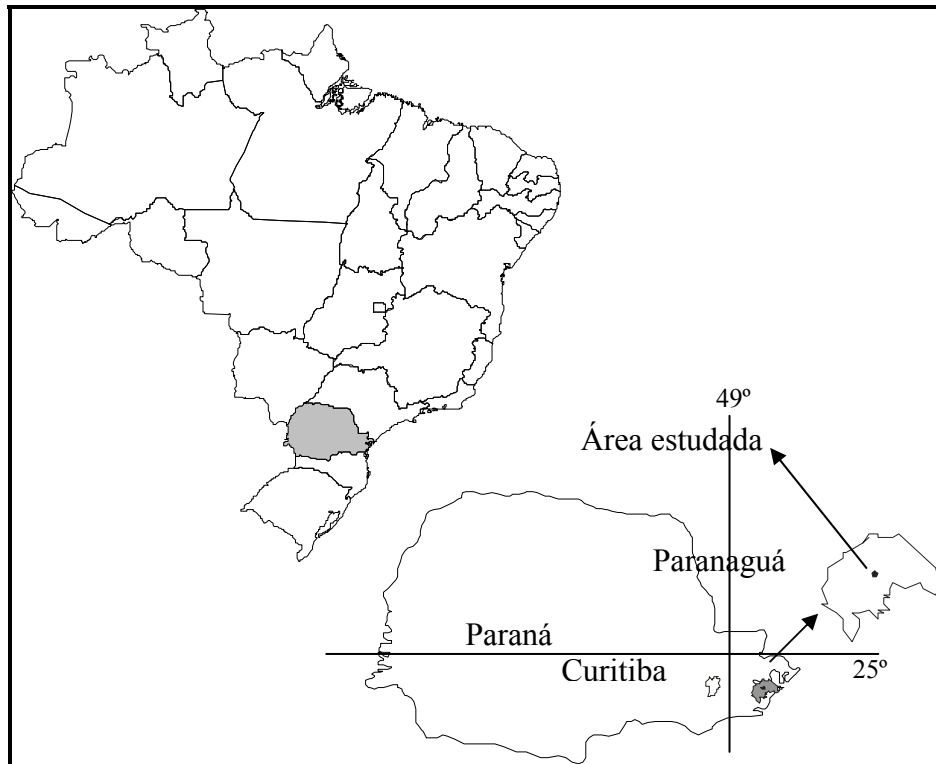


Figura 4.6 Localização da cidade de Paranaguá e local dos ensaios realizados

4.1.2.2 Aspectos Geológicos

Geologicamente, a área é constituída de sedimentos marinhos a transicionais, depositados durante pelo menos duas fases de transgressão/regressão. Caracteriza-se por intercalações de pacotes argilosos/siltosos e arenosos, com espessuras da ordem de 60 m, indicadas pelos perfis de poços profundos. Abaixo desses pacotes ocorrem rochas cristalinas do embasamento. Na área de estudo são caracterizados dois tipos de aquíferos: um mais superficial (20-40 m) do tipo sedimentar e outro mais profundo, do tipo fratura em rocha cristalina (120-150 m). Ocorrem contaminações por água salina, tanto no aquífero superficial como no profundo, indicadas pelas análises químicas das águas de poços, evidenciando uma interconectividade dos aquíferos por fraturamento (Gois, 2002).

4.1.2.3 Ensaios Realizados

Assim como no aterro de Bauru, ensaios de geofísica de superfície antecederam os ensaios RCPTU para auxiliar na escolha dos pontos a serem investigados. No local foram executados um total de quatro ensaios RCPTU sendo que os ensaios de geofísica de superfície com a utilização de métodos elétricos, que antecederam os ensaios RCPTU, foram elaborados pelo Laboratório de Pesquisa e Geofísica Aplicada da Universidade Federal do Paraná (LPGA-UFPR) (Figura 4.7). Os ensaios de geofísica de superfície foram executados utilizando-se equipamentos da Íris Instruments com os seguintes módulos: transmissor de alta potência VIP3000W, gerador Honda EM5000S e receptor multicanal e espectral ELREC10. Os processamentos de dados geofísicos foram realizados em ambiente computacional através de software especialista como o pacote Oásis MontajTM e Zonge 2D Inversion for InteractivTM da Geosoft/Interpex.

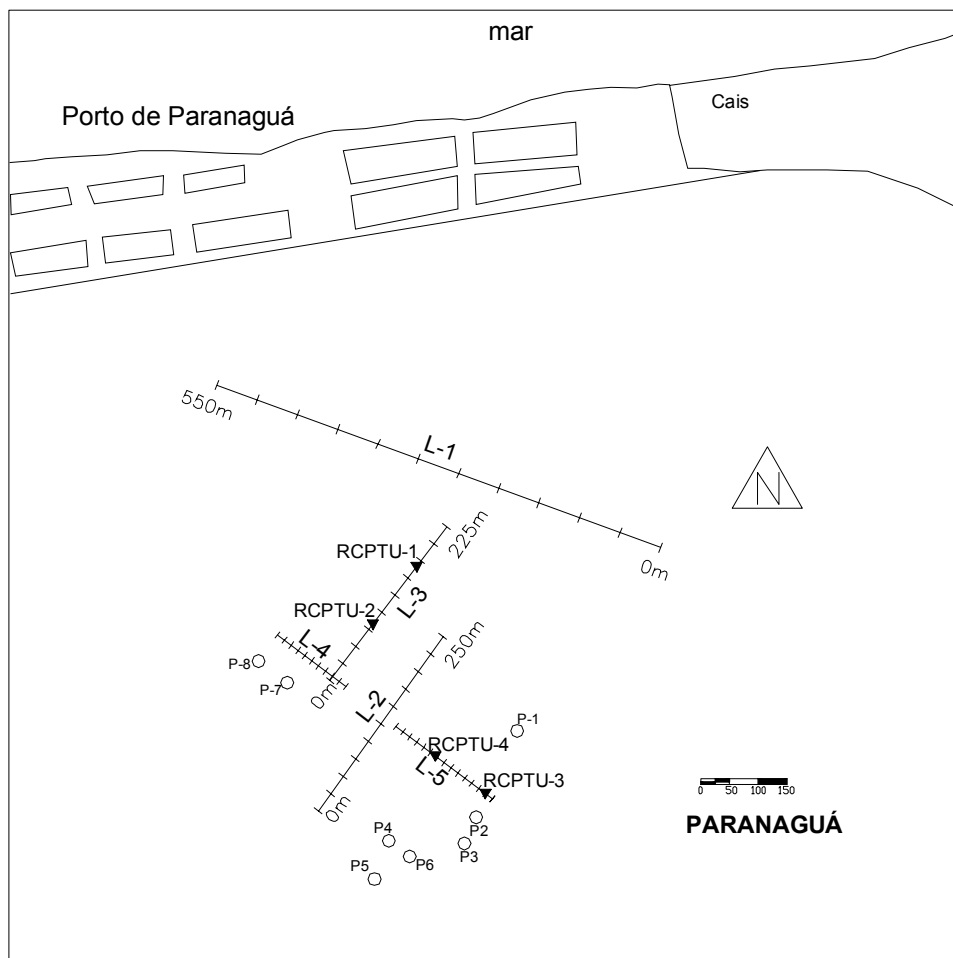


Figura 4.7 Localização das linhas de geofísica de superfície e dos ensaios RCPTU executados no litoral do Paraná.

As quatro sondagens RCPTU realizadas nesse local tiveram como objetivo avaliar a aplicabilidade dessa técnica em perfis de solo sedimentares saturados, semelhantes àqueles que ocorrem em países de clima temperado. Além disso, com esses resultados, procurou-se complementar a campanha de eletrorresistividade de superfície, executada neste local, a fim de confirmar os aspectos observados e esclarecer algumas dúvidas levantadas por essa campanha de ensaios de geofísica de superfície.

As sondagens de RCPTU foram locadas a partir dos resultados da campanha de eletrorresistividade de superfície. Das sondagens com o piezocone de resistividade realizadas sobre a linha 3 aquela identificada como RCPTU-01 foi executada na posição 125 m, sobre uma anomalia positiva, com resistividade entre 30 e 60 ohm.m. Já a sondagens RCPTU-02 foi locada na posição 70 m, que indicava nos perfis das ensaios elétricos de superfície uma anomalia positiva, com resistividade na faixa de 10 a 100 ohm m, crescente em profundidade.

Sobre a linha 5 foram executados os ensaios RCPTU-03, na posição 130 m e RCPTU-04 na posição 60 m. O local do RCPTU-04 indica uma resistividade relativamente homogênea, na vertical, com valores de 30 a 50 ohm.m. Na posição do RCPTU-04 a resistividade começa com valores elevados (100 ohm.m a 200 ohm.m), com transição marcante nesta profundidade passando a resistividades mais baixas, de 20 ohm.m a 30 ohm.m até 35 m – 40 m. A localização desses ensaios encontram-se na Figura 4.7.

4.1.3 Campo experimental do IAG da USP

4.1.3.1 Aspectos Gerais

O campo experimental do IAG da USP é uma área de 1500 m², situado no interior do campus da USP em São Paulo, localizada em frente ao IAG e próxima ao Instituto de Física. Esta área se localiza na borda sedimentar da Bacia de São Paulo (Figura 4.8). Este local vem sendo utilizado para experimentos geofísicos desde 1993. A localização do campo experimental do IAG no interior do campus da USP é apresentado na Figura 4.9.

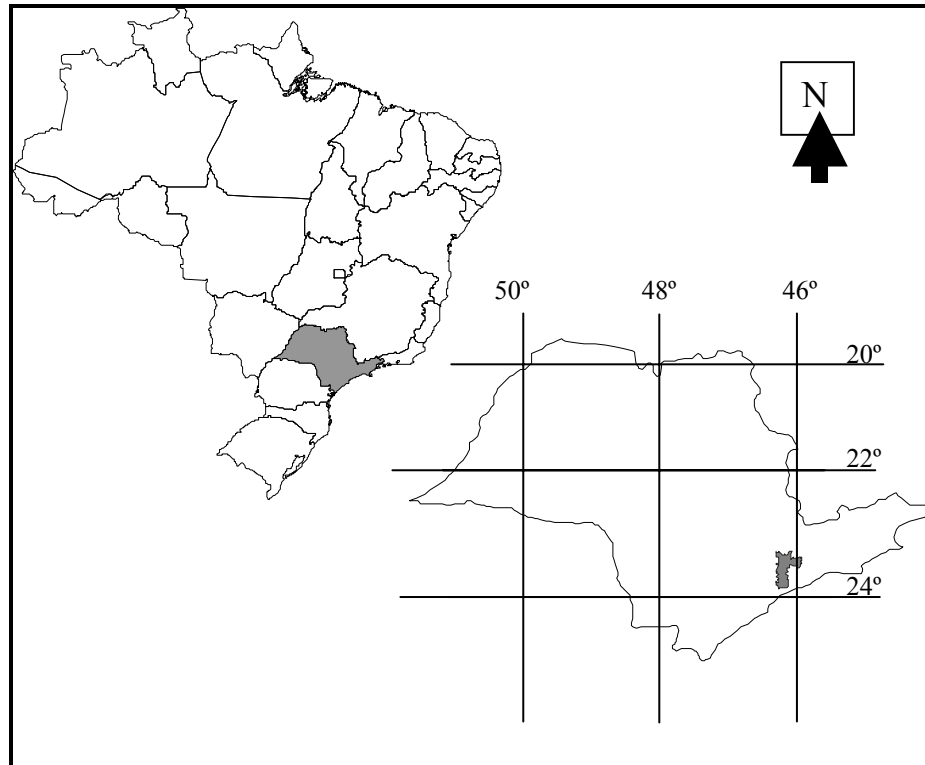


Figura 4.8 localização da cidade de São Paulo, centro urbano em que foram realizados os ensaios de RCPTU

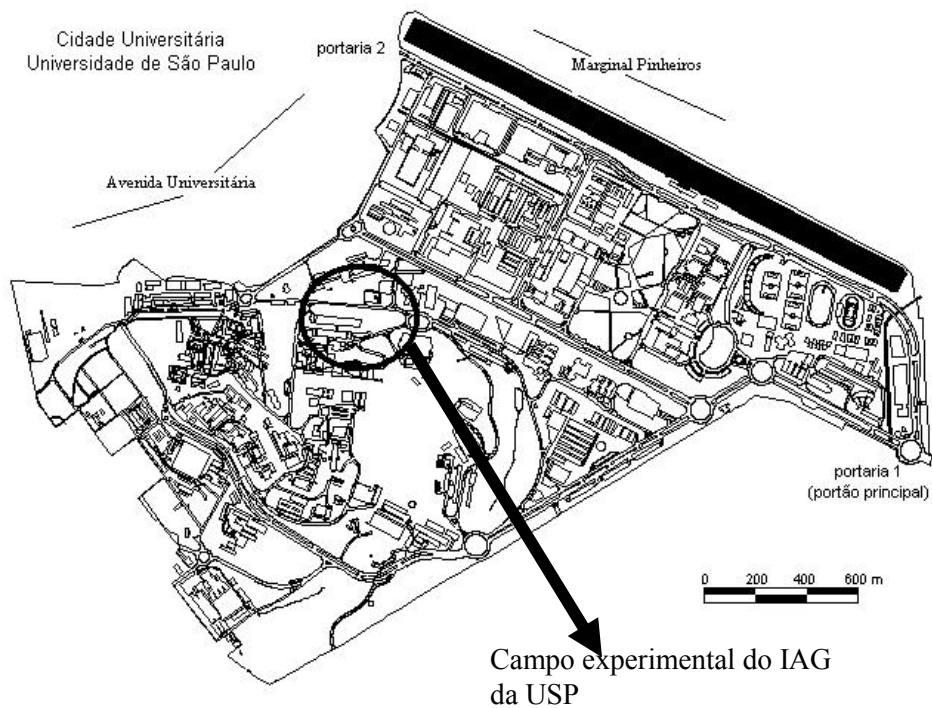


Figura 4.9 Localização do campo experimental do IAG no interior do campus da USP, local dos ensaios RCPTU

4.1.3.2 Aspectos Geológicos

A área está situada na Bacia Sedimentar Terciária de São Paulo, sendo constituída predominantemente por sedimentos areno-argilosos de idade terciária (formações Resende e São Paulo), sobrepostos ao embasamento granito-gnáissico de idade pré-cambriana, com diferentes graus de intemperização (Iritani, 1993). Ensaios realizados no local mostram que a espessura dos sedimentos não ultrapassa 53 m (Porsani, 2003).

4.1.3.3 Ensaios Realizados

Foram realizados 5 ensaios RCPTU identificados de R1 a R5 (Figura 4.10) aproximadamente alinhados entre si, sendo que nos ensaios R2 e R3 foram executados ensaios de dissipação de poro-pressão, em que a saturação do piezo-elemento foi feita, para o ensaio R2, com o procedimento convencional utilizando-se glicerina e, para o ensaio R3, o recurso do filtro de cavidade preenchido com graxa. Os ensaios foram realizados próximos a poços de investigação geológica existente no local (P1, P2, P3). O ensaio R5 foi repetido devido a problemas na execução do primeiro ensaio previsto, e que teve que ser interrompido, sendo que novo ensaio foi executado a menos de um metro de distância deste e identificado como R5a.

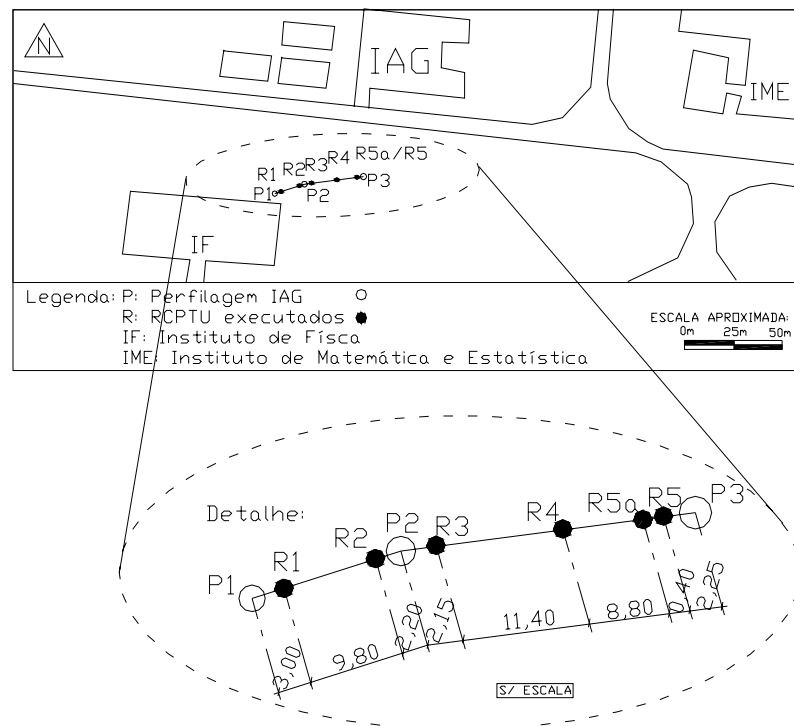


Figura 4.10 Localização dos ensaios RCPTU no campo experimental do IAG da USP

4.2 Equipamentos Utilizados

4.2.1 Piezocone

4.2.1.1 Considerações Gerais

Foram executados ensaios de piezocone nas 3 áreas estudadas. Para garantir a qualidade dos dados obtidos com o piezocone, foi utilizado um sistema de checagem e calibração de piezocone que já havia sido desenvolvido e utilizado na Unesp-Bauru, cujos procedimentos podem ser encontrados com maiores detalhes em Marques (2002). Vale ressaltar que é de suma importância a checagem e calibração do piezocone (calibração do canal do transdutor de pressão “U”; Calibração da célula de carga da resistência de ponta “ q_c ” e de atrito lateral “ f_s ”; determinação do fator de áreas desiguais “a”) antes da execução das sondagens com estes equipamentos.

4.2.1.2 Descrição do Piezocone

O piezocone utilizado nessa pesquisa, de fabricação da Geotech AB[®], transmite os sinais através de ondas sonoras. O aparelho possui um inclinômetro incorporado que é útil para monitorar a verticalidade do furo. Esse aparelho possui um transdutor de poro-pressão na posição padrão (U_2) que, além de permitir o uso de um filtro convencional saturado com água ou glicerina, possibilita ainda o emprego do filtro de cavidade preenchido com graxa, recurso que foi empregado no aterro de Bauru e no IAG da USP. A Foto 4.10 mostra o piezocone utilizado, com pilhas usadas para geração dos sinais sonoros e filtro de cavidade.

O equipamento utilizado para penetração do cone foi um penetrômetro multi-função, que possui um sistema hidráulico modelo TG 73 200, com capacidade de 200 kN em função da possibilidade de ancorar-se ao solo através de um sistema de hastes helicoidais dispostas em sua base. A Foto 4.11 apresenta o penetrômetro multi-função utilizado.

Em uma das sondagens CPTU realizadas no aterro de Bauru, foi utilizado o piezocone com um filtro de cavidade preenchido com glicerina para registro do excesso de poro-pressão. Esse ensaio foi realizado a 1 metro de distância de outro ensaio sem esse recurso para efeito de comparação dos resultados (CPTU-3 e CPTU-3a). Também no IAG da USP tal recurso foi empregado (RCPTU 2 e RCPTU 3) com a mesma finalidade.

Os ensaios CPTU foram realizados nas áreas estudadas, determinando-se a resistência de ponta, atrito lateral e poro-pressão na posição U_2 , a intervalos regulares de 25 mm. Monitorava-se sempre a inclinação do furo através de inclinômetro incorporado ao piezocone

para garantir a qualidade do resultado e especialmente para não comprometer o aparelho utilizado.

Posteriormente, os dados obtidos foram transferidos para planilhas eletrônicas, trabalhados e apresentados em forma gráfica para permitir a interpretação dos resultados.



Foto 4.10: Piezocone sem fio com filtro com cavidade utilizado nas sondagens CPTU.



Foto 4.11: Penetrômetro multi-função utilizado nos ensaios com piezocone durante ensaio no aterro de Bauru.

4.2.2 Piezocone de Resistividade

4.2.2.1 Considerações Gerais

Foram realizados 16 ensaios RCPTU em 3 campanhas na área do aterro de Bauru, escolhidos com base nos resultados dos ensaios geofísicos de superfície, 4 ensaios no litoral do Paraná e 5 ensaios no IAG da USP. Para garantir a qualidade dos dados obtidos com o piezocone de resistividade, desenvolveu-se um sistema para checagem e calibração do dispositivo para medida de resistividade.

4.2.2.2 Dispositivo para medida de resistividade acoplado ao piezocone

a) Descrição do dispositivo utilizado

O dispositivo para medida de resistividade utilizado transmite os sinais através de ondas sonoras e foi fabricado pela Geotech AB. A Foto 4.12 apresenta o piezocone de resistividade utilizado. Para os dispositivos de medida de resistividade disponíveis existem dois tipos principais de configurações de eletrodo: o arranjo Schlumberger e o arranjo Werner. O arranjo Werner é a configuração do piezocone de resistividade adquirido pela Unesp-Bauru conforme descrito no manual que acompanha o equipamento (Geotech, 2001). O arranjo Werner (Figura 4.11) utiliza dois eletrodos de emissão de corrente (AB) e dois eletrodos de medida de potencial MN instalados em um material isolante. A distância “a” entre todos os eletrodos é igual. A medida da resistividade aparente para esse arranjo é calculada através de :

$$\rho = 2a \times \frac{\Delta V}{I} \quad \text{Equação 4.1}$$

em que:

ρ : resistividade aparente (ohm.m)

a: distância entre os eletrodos (m)

ΔV : diferença de potencial entre M e N (mV)

I: intensidade de corrente (mA)

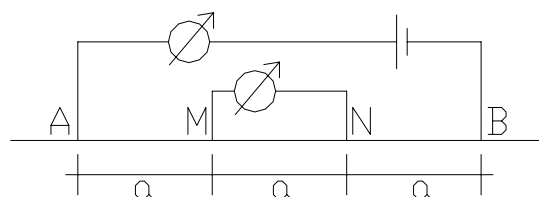


Figura 4.11: Esquema representativo do arranjo Werner (Elis, 1993)

b) Sistema de reação

O dispositivo para medida de resistividade sempre é cravado no terreno em conjunto com o piezocone. Assim utilizou-se o piezocone e o penetrômetro multi-função já descrito anteriormente. A Foto 4.13 mostra detalhe do momento de um ensaio, no aterro de Bauru, utilizando-se estes dois equipamentos.



Foto 4.13: Detalhe da sondagem com piezocone de resistividade sendo realizada na área do aterro de Bauru.

4.2.3 O Sistema para calibração e checagem do dispositivo para medida de resistividade

Assim como observado para o CPTU, também para o RCPTU a realização da calibração e da checagem do equipamento é fundamental para garantia da qualidade dos dados obtidos nos ensaios. O piezocone de resistividade tem, além da necessidade de se checar e calibrar os mesmos itens do piezocone citados anteriormente, o imperativo de se calibrar e checar o seu dispositivo para medida de resistividade. Dessa forma, desenvolveu-se um sistema para calibração e checagem desse dispositivo para medida de resistividade que será descrito detalhadamente a seguir.

O sistema desenvolvido é constituído basicamente de um reservatório de água adaptado para esse fim, com diâmetro tal que: (a) não cause efeito de borda nas leituras; (b)

possibilite o acoplamento do dispositivo para medida de resistividade na posição vertical e (c) composto de material inerte, não causando a contaminação da água utilizada na calibração. Esse sistema foi montado em uma sala que permitisse o controle da temperatura ambiente durante o ensaio. Na Foto 4.14 está apresentado o esquema de calibração utilizado.

Também foram seguidas as instruções do fabricante do equipamento (Geotech, 2001) que são transcritos a seguir:

- Dispositivo para medida de resistividade elétrica foi calibrado tomando-se como base valores de três águas com salinidades diferentes:
- Água potável: condutividade 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (ou resistividade: 50 ohm.m);
- Água salgada (salinidade abaixo da saturação): condutividade aproximada 12500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (ou resistividade 0,8 ohm.m);
- Água salgada (salinidade abaixo da saturação): condutividade aproximada 25000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (ou resistividade: 0,4 ohm.m);
- Durante a calibração, é importante que o eletrodo não seja afetado pelo efeito de borda do reservatório. Assim, o diâmetro do reservatório deve ter no mínimo 70 cm.;
- As leituras são executadas a temperatura ambiente e os três valores acima citados de resistividade resultam numa função linear de inclinação $1/B$, que intercepta o eixo das abscissas em um ponto “A”. O inverso dessa função resulta numa função hiperbólica.

Várias calibrações foram feitas para servirem de aperfeiçoamento e aprendizagem na utilização do sistema de calibração e análise da sensibilidade das leituras. O ensaio considerado como real e definitivo para a calibração e avaliação do sistema de condutividade foi iniciado com água destilada e, posteriormente, foi-se aumentando a concentração de sal (NaCl) até cerca de 33000 ppm, que corresponde a uma concentração aproximada da água do mar.

O programa utilizado para a aquisição de dados durante a calibração foi o “CPT Data Acquisition Software” da Geotech AB® (Foto 4.15). Através desse software é possível, tanto a aquisição dos dados durante a cravação ou calibração do cone, como a apresentação dos dados em tempo real.



Foto 4.14: Sistema de calibração do dispositivo para medida de resistividade acoplado ao piezocone.

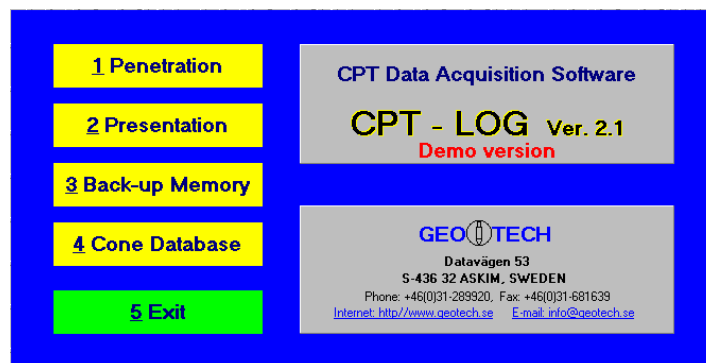


Foto 4.15: Tela principal do programa de aquisição de dados do ensaio de piezocone de resistividade.

O piezocone foi instalado e fixado verticalmente no interior do reservatório de polietileno, com medidas externas 142x116x105 cm (topo-base-altura) (Foto 4.16), o qual foi posteriormente preenchido com água destilada até o nível desta ultrapassar inteiramente o dispositivo para medida de resistividade, o qual ficou totalmente submerso. As calibrações consistiram em obter os valores de condutividade da água a diferentes salinidades, obtidas cuidadosamente por acréscimo de solução de água e cloreto de sódio (NaCl), este pesado em balança de precisão, preparada antes de sua introdução no sistema e homogeneizado. As medidas de condutividade foram obtidas tanto através do condutímetro Thermo-Orion modelo 115 (Foto 4.17), como através do piezocone de resistividade, para possibilitar a calibração.

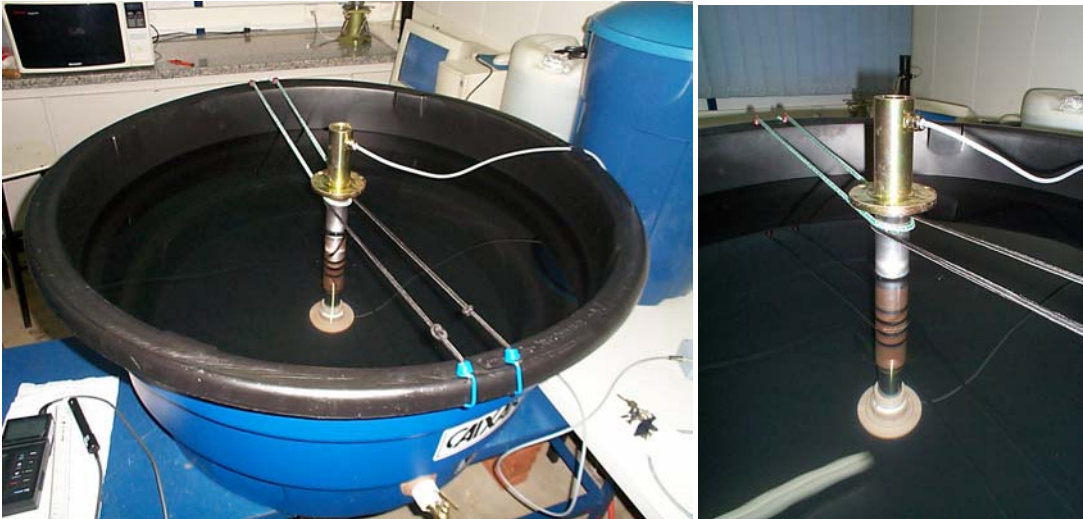


Foto 4.16 Detalhe da instalação do piezocone de resistividade no reservatório de água para calibração do seu dispositivo para medida de resistividade.



Foto 4.17: Condutivímetro Thermo-Orion modelo 115 utilizado na calibração do dispositivo para medida de resistividade.

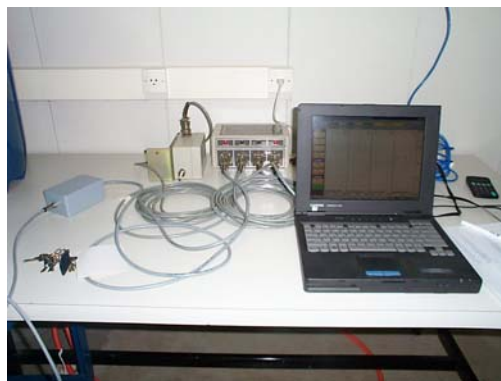


Foto 4.18: Sistema de Aquisição de dados utilizado na calibração do dispositivo para medida de resistividade

5 RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 Considerações Gerais

Para a realização deste trabalho, foram analisados os resultados das campanhas de campo realizadas no aterro sanitário da cidade de Bauru no campo experimental do IAG da USP e numa área do litoral do Paraná, em Paranaguá. Os resultados da calibração e checagem do piezocone e do dispositivo para medida de resistividade serão apresentados, já que é etapa imprescindível para a realização de qualquer ensaio em que se utilize este equipamento. Serão apresentados e discutidos os principais resultados obtidos, com o objetivo de se avaliar o emprego desta ferramenta para a investigação geotécnica e geoambiental de solos tropicais.

5.2 Calibração e Checagem do Piezocone e Dispositivo Para Medida de Resistividade

5.2.1 Resultados

5.2.1.1 Piezocone

Na Tabela 5.1 é apresentado um resumo com valores da constante α obtidos na calibração do piezocone.

Tabela 5.1 Resumo dos resultados de calibração para o piezocone utilizado.

| Item | α | R ² | Intervalo aplicável MPa |
|---|----------|----------------|-------------------------|
| Transdutor de poro-pressão (U) | 1,007 | 1,0000 | 0 a 483 |
| Célula de Carga de resistência de ponta (q_c) | 0,994 | 0,9995 | 0 a 35,0 |
| Célula de Carga de resistência de ponta (q_c) | 1,066 | 0,9999 | 0 a 8,0 |
| Célula de Carga d Atrito Lateral (f_s) | 0,970 | 0,9999 | 0 a 0,5 |
| Fator de áreas desiguais (a) | 0,640 | ---- | ---- |

5.2.1.2 Dispositivo para medida de resistividade

Neste item são apresentados os resultados da calibração do dispositivo para medida de resistividade. Os resultados são obtidos a partir de uma correlação entre o dispositivo e o

condutivímetro utilizado na calibração. A Tabela 5.2 e a Figura 5.1 apresentam esses valores obtidos a partir dos dados gerais obtidos em laboratório que estão detalhados na Tabela 5.3.

Tabela 5.2 Resumo da calibração do dispositivo de medida de resistividade acoplado ao piezocone utilizado.

| Equação da reta ajustada | R ² | Intervalo Aplicável ohm.m |
|--------------------------|----------------|---------------------------|
| 0,9859x - 9,8821 | 0,9989 | 2 a 5000 |
| 0,9913x - 0,7918 | 0,9994 | 2 a 300 |

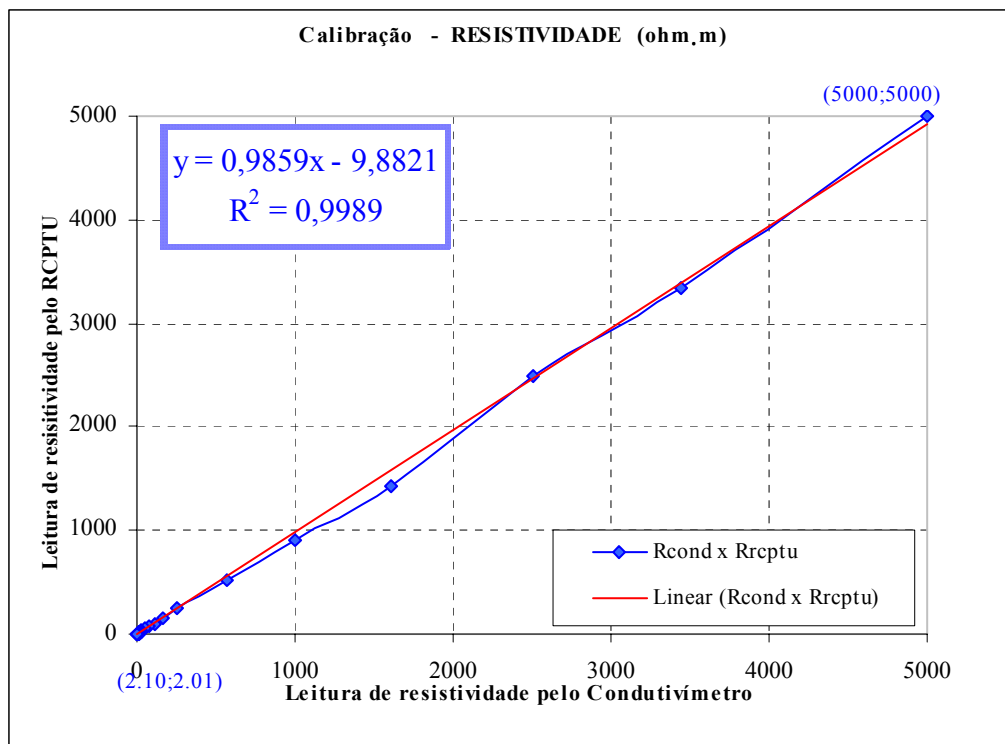


Figura 5.1: Calibração do dispositivo de medida de resistividade. Faixa de valores de resistividade: 2 a 5.000 ohm.m.

Tabela 5.3 Resultados da calibração, em laboratório, do dispositivo de medida de resistividade acoplado ao piezocone utilizado.

| Concentração NaCl | | Condutímetro | | | RCPTU | | | Diferença (%) |
|-------------------|-----------|--------------|-----------|-----------|--------|-----------|-----------|---------------|
| Seq. | PPP | T (°C) | C (µS/cm) | R (ohm.m) | T (°C) | C (µS/cm) | R (ohm.m) | R (ohm.m) |
| 0 | 0 | 22,8 | 1,7 | 5882,35 | 20,7 | 2 | 5000 | 15,00 |
| 1 | 0,012 | 22,8 | 1,6 | 6250 | 20,7 | 2 | 5000 | 20,00 |
| 2 | 0,023 | 22,7 | 1,7 | 5882,35 | 20,7 | 2 | 5000 | 15,00 |
| 3 | 0,07 | 22,7 | 1,8 | 5555,56 | 20,7 | 2 | 5000 | 10,00 |
| 4 | 0,173 | 22,7 | 2 | 5000 | 20,7 | 2 | 5000 | 0,00 |
| 5 | 0,565 | 22,7 | 2,9 | 3448,28 | 20,7 | 3 | 3333,33 | 3,33 |
| 6 | 1,068 | 22,7 | 4 | 2500 | 20,7 | 4 | 2500 | 0,00 |
| 7 | 2,099 | 22,7 | 6,2 | 1612,9 | 20,8 | 7 | 1428,57 | 11,43 |
| 8 | 3,888 | 22,6 | 10 | 1000 | 20,8 | 11 | 909,09 | 9,09 |
| 9 | 7,584 | 22,5 | 17,5 | 571,43 | 20,9 | 19 | 526,32 | 7,89 |
| 10 | 16,746 | 22,5 | 39 | 256,41 | 21 | 39 | 256,41 | 0,00 |
| 11 | 29,198 | 22,6 | 63,1 | 158,48 | 21 | 64 | 156,25 | 1,41 |
| 12 | 45,404 | 22,4 | 89,9 | 111,23 | 21,1 | 95 | 105,26 | 5,37 |
| 13 | 69,932 | 22,5 | 136,1 | 73,48 | 21,1 | 147,56 | 67,77 | 7,77 |
| 14 | 95,389 | 22,5 | 194,2 | 51,49 | 21,2 | 202 | 49,5 | 3,86 |
| 15 | 159,265 | 22,4 | 328 | 30,49 | 21,4 | 336 | 29,76 | 2,39 |
| 16 | 207,716 | 22,4 | 427 | 23,42 | 21,5 | 436 | 22,94 | 2,05 |
| 17 | 270,286 | 22,3 | 514 | 19,46 | 21,7 | 547,64 | 18,26 | 6,17 |
| 18 | 348,903 | 22,3 | 637 | 15,7 | 21,7 | 659,68 | 15,16 | 3,44 |
| 19 | 443,405 | 22,3 | 779 | 12,84 | 21,8 | 800,69 | 12,49 | 2,73 |
| 20 | 545,905 | 22,3 | 946 | 10,57 | 21,9 | 1008,22 | 9,92 | 6,15 |
| 21 | 667,188 | 22,3 | 1184 | 8,45 | 22 | 1265,22 | 7,9 | 6,51 |
| 22 | 814,438 | 22,3 | 1511 | 6,62 | 22,1 | 1603,51 | 6,24 | 5,74 |
| 23 | 982,02 | 22,3 | 1793 | 5,58 | 22,2 | 1872,87 | 5,34 | 4,30 |
| 24 | 1176,394 | 22,3 | 2170 | 4,61 | 22,2 | 2291,6 | 4,36 | 5,42 |
| 25 | 1612,867 | 22,3 | 3030 | 3,3 | 22,5 | 3261,87 | 3,07 | 6,97 |
| 26 | 1921,33 | 22,3 | 3610 | 2,77 | 22,6 | 3907,58 | 2,56 | 7,58 |
| 27 | 2257,722 | 22,3 | 4130 | 2,42 | 22,6 | 4557,88 | 2,19 | 9,50 |
| 28 | 2576,482 | 22,3 | 4760 | 2,1 | 22,7 | 4977,42 | 2,01 | 4,29 |
| 29 | 2885,417 | 22,3 | 5270 | 1,9 | 22,7 | 6117,75 | 1,63 | 14,21 |
| 30 | 3263,487 | 22,3 | 5940 | 1,68 | 22,8 | 6957,57 | 1,44 | 14,29 |
| 31 | 3639,032 | 22,2 | 6530 | 1,53 | 22,9 | 7738,5 | 1,29 | 15,69 |
| 32 | 4085,569 | 22,3 | 7310 | 1,37 | 22,9 | 8903,25 | 1,12 | 18,25 |
| 33 | 4532,107 | 22,3 | 8020 | 1,25 | 22,9 | 8745,44 | 1,14 | 8,80 |
| 34 | 4978,645 | 22,3 | 8600 | 1,16 | 23 | 10208,49 | 0,98 | 15,52 |
| 35 | 5425,183 | 22,3 | 9340 | 1,07 | 23,1 | 11957,83 | 0,84 | 21,50 |
| 36 | 5871,721 | 22,3 | 9820 | 1,02 | 23,2 | 12762,32 | 0,78 | 23,53 |
| 37 | 6318,259 | 22,2 | 10700 | 0,93 | 23,3 | 13485,06 | 0,74 | 20,43 |
| 38 | 7211,334 | 22,3 | 11950 | 0,84 | 23,3 | 16726,57 | 0,6 | 28,57 |
| 39 | 8104,41 | 22,3 | 13530 | 0,74 | 23,4 | 20462,57 | 0,49 | 33,78 |
| 40 | 8997,486 | 22,3 | 15160 | 0,66 | 23,5 | 23527,84 | 0,43 | 34,85 |
| 41 | 10337,099 | 22,3 | 17000 | 0,59 | 23,5 | 25945,65 | 0,39 | 33,90 |
| 42 | 12123,251 | 22,2 | 19320 | 0,52 | 23,5 | 33057,04 | 0,3 | 42,31 |
| 43 | 14355,94 | 22,2 | 23200 | 0,43 | 23,7 | 52271,1 | 0,19 | 55,81 |
| 44 | 16588,629 | 22,2 | 27600 | 0,36 | 23,7 | 71949,56 | 0,14 | 61,11 |
| 45 | 25519,387 | 22,1 | 40400 | 0,25 | 23,8 | 181918,16 | 0,05 | 80,00 |
| 46 | 29544,665 | 22,1 | 45800 | 0,22 | 23,8 | 703618 | 0,01 | 95,45 |
| 47 | 33569,944 | 22 | 50100 | 0,2 | 23,7 | 532700,36 | 0,02 | 90,00 |

5.2.2 Análise dos resultados

5.2.2.1 Piezocone

Para permitir a comparação entre os valores aplicados, medidos pelos dispositivos de referência utilizados, e os valores medidos pelo piezocone ensaiado, calculou-se a diferença relativa entre essas medidas (Tabela 5.4). Após a definição dos fatores de correção obtidos com o ajuste dos dados a uma equação de reta, calcularam-se as novas diferenças relativas máximas, mínimas e médias. Estas diferenças calculadas para poro-pressão (U), resistência de ponta (q_c) e atrito lateral após a aplicação dos fatores de correção tiveram seus valores reduzidos, sempre inferiores a 2,0%.

Tabela 5.4 Diferenças relativas máxima, mínima e médias das leituras de U , q_c e f_s para o piezocone utilizado

| Diferença relativa (%) | Poro-pressão (U) kPa | | Resistência de ponta (q_c) MPa | | Atrito lateral (f_s) MPa | |
|------------------------|-----------------------------|-----------------|---------------------------------------|-----------------|---------------------------------|-----------------|
| | Antes da Calibração | Após Calibração | Antes da Calibração | Após Calibração | Antes da Calibração | Após Calibração |
| Média | 0,6 | 0,3 | 1,6 | 1,4 | 3,1 | 0,3 |
| Máxima | 1,1 | 0,6 | 5,5 | 4,9 | 3,8 | 1,1 |
| Mínima | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 2,0 | 0,1 |

5.2.2.2 Dispositivo de Medida de Resistividade

A Figura 5.1 apresenta os resultados da calibração do dispositivo de medida de resistividade feitos com base nos resultados da Tabela 5.3. Ressalte-se que esse procedimento permitiu avaliar a capacidade mínima e máxima do equipamento. Para valores na faixa de $2\mu\text{S/cm}$ (ou resistividade 5000 ohm.m) e $5000\mu\text{S/cm}$ (ou resistividade 2 ohm.m), as diferenças relativas mostraram-se menores que 10%, em destaque na Figura 5.1. Há uma leitura que apresentou uma diferença superior, de 11,43%, sendo este considerado um valor discrepante dentro desta faixa de valores, possivelmente ocasionado por algum erro isolado que tenha ocorrido no andamento do procedimento de calibração que durou mais de 10 horas. Ressalte-se que quantidades mínimas de sal (NaCl) utilizadas na calibração podem interferir no resultado, o que exige a perfeita limpeza dos equipamentos utilizados neste procedimento, para evitar a perturbação no sistema medido. Observa-se que na faixa de 2 a 300 ohm.m essas diferenças são ainda menores (Figura 5.2), apresentando uma diferença relativa média de

4,7%. Já para valores acima da faixa de 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (2,0 ohm.m) as leituras obtidos através do dispositivo para medida de resistividade não são mais confiáveis, apresentando diferenças relativas da ordem de 95% para valores abaixo de 2 ohm.m e 20% para valores acima de 5000 ohm.m. No catálogo do fabricante (Geotech & Geomil, 2001) a faixa de valores para utilização recomendada é: de 0,5 mS/m a 3000 mS/m (0,3 ohm.m a 2000 ohm.m). Apesar da recomendação do fabricante, entre as faixas 0,3 ohm.m a 2,0 ohm.m os valores não se mostraram confiáveis.

No caso dos ensaios realizados em campo, os valores obtidos se situaram dentro da faixa confiável obtida na calibração executada em laboratório (na faixa de 2 ohm.m a 2000 ohm.m aproximadamente), possibilitando a utilização dessa ferramenta.

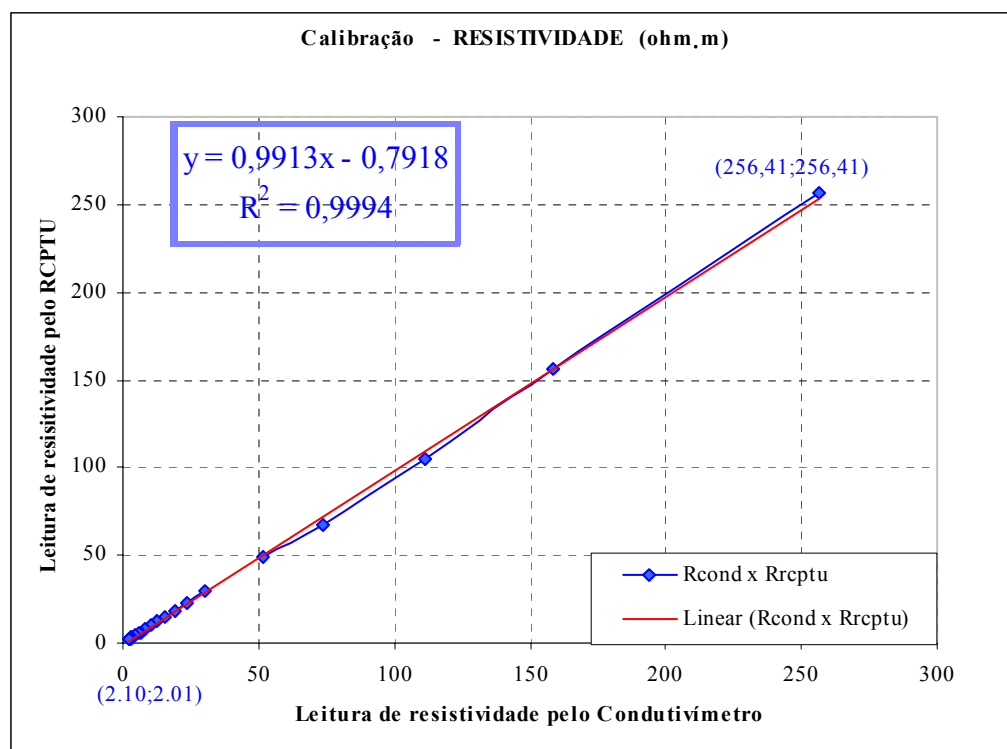


Figura 5.2 Calibração do dispositivo de medida de resistividade. Faixa de valores de resistividade: 2 a 300 ohm.m

5.3 Aterro Sanitário da cidade de Bauru

5.3.1 Resultados

5.3.1.1 Ensaios Elétricos de Superfície

Os resultados das campanhas de eletrorresistividade de superfície, Elis (2001), foram utilizados para orientar quanto à localização dos ensaios de piezocone. Aqui será apresentado

o resultado obtido para um dos ensaios executados, em que se pode observar as resistividades para a pseudo-seção da linha 4 (executada a jusante do aterro) e o mapa de resistividade aparente do nível teórico 10m.

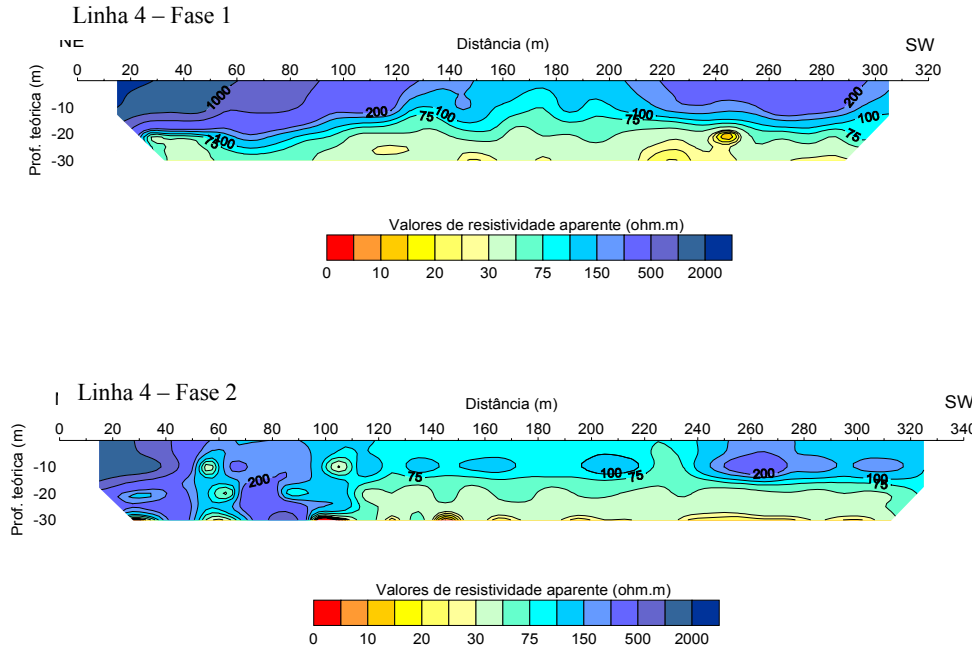


Figura 5.3: Pseudo-seções da Linhas 4 nas suas duas campanhas de eletrorresistividade de superfície realizados no aterro de Bauru (Elis, 2001).

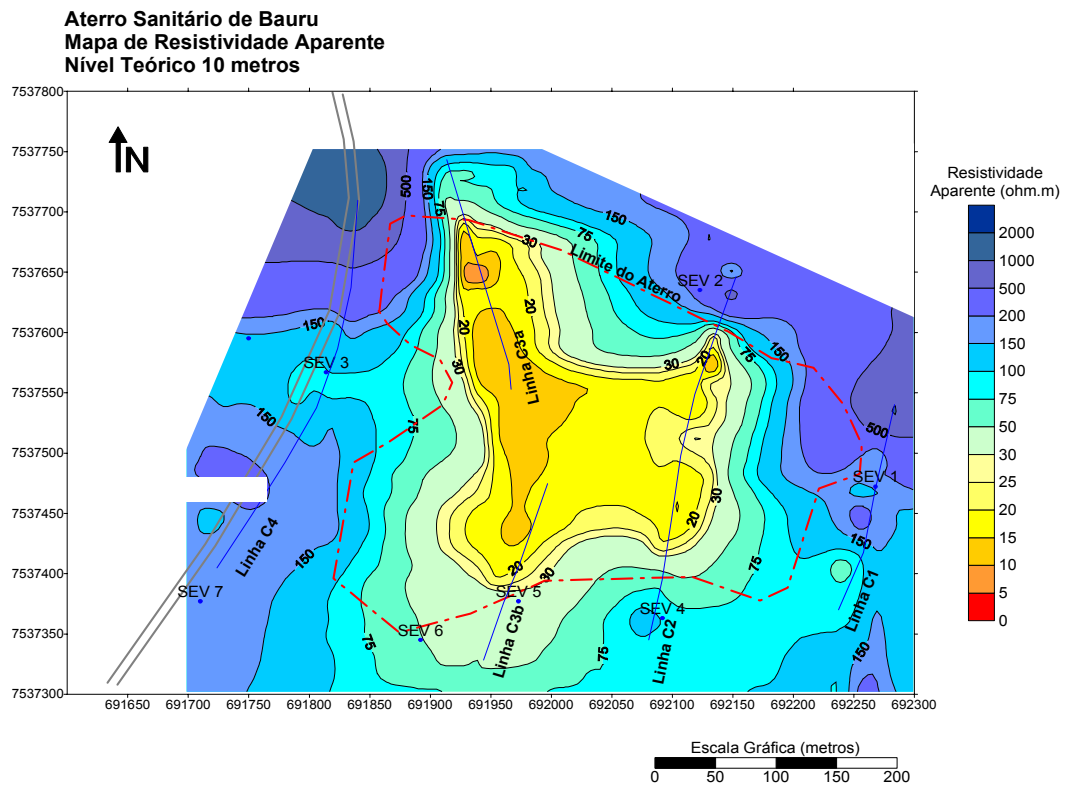


Figura 5.4: Mapa de resistividade aparente do nível teórico 10 m (Elis, 2001).

Nas pseudo-seções da linha 4 (Figura 5.3), os resultados dos ensaios geofísicos mostram algumas zonas de menor resistividade dentro da zona saturada, em pontos onde sugere-se os ensaios com o piezocone. Esses pontos são os mesmos para as duas fases de ensaios realizados, localizados entre as posições 150 e 170, 220 e 240, e no final do perfil (280 a 300 metros). Existe uma diferença entre as duas fases de ensaios para os níveis superiores nessa porção central da linha. Os valores de resistividade aparente são menores que os da primeira fase e essa zona de baixa resistividade também desenvolve-se em uma porção maior da seção. Esse comportamento pode ter relação com o aumento do conteúdo de líquidos dentro dos resíduos e o fluxo desses líquidos junto com as águas subterrâneas (Elis, 2001).

5.3.1.2 Piezocone e Piezocone de Resistividade

Foram realizadas quatro campanhas de ensaios piezocone totalizando quatro ensaios com piezocone e dezesseis ensaios com piezocone de resistividade.

Esses ensaios estão aqui apresentados da seguinte maneira:

- na Figura 5.5, os resultados do CPTU 01 (montante do aterro);
- na Figura 5.6, os resultados do CPTU 02 (dentro do aterro);
- na Figura 5.7, os resultados dos CPTU 03, RCPTU 04, 05, 06 e 11 (jusante do aterro e no entorno do poço de monitoramento temporário PMT03);
- na Figura 5.8, os resultados dos CPTU 04, RCPTU 01, 02, 03 e 09 (jusante do aterro e no entorno do poço de monitoramento temporário PMT04);
- na Figura 5.9, os resultados dos RCPTU 08, 14 e 15 (jusante próximos ao aterro);
- na Figura 5.10, os resultados dos RCPTU 07 e 10 (jusante e próximos à erosão);
- na Figura 5.11, os resultados dos RCPTU 12, 13 e 16 (área fora do aterro).
- na Figura 5.12 a Figura 5.14 os resultados obtidos com a dissipação do excesso de poro-pressão executadas em quatro ensaios: RCPTU 4, RCPTU 6 e RCPTU 8;
- na Tabela 5.5 os resultados do coeficiente de permeabilidade calculado a partir dos resultados de dissipação do excesso de poro-pressão dos ensaios acima.

Os resultados dos ensaios CPTU e RCPTU são apresentados com a interpretação do perfil geotécnico realizado com base no ábaco de classificação de solos proposto por Robertson et al. (1986).

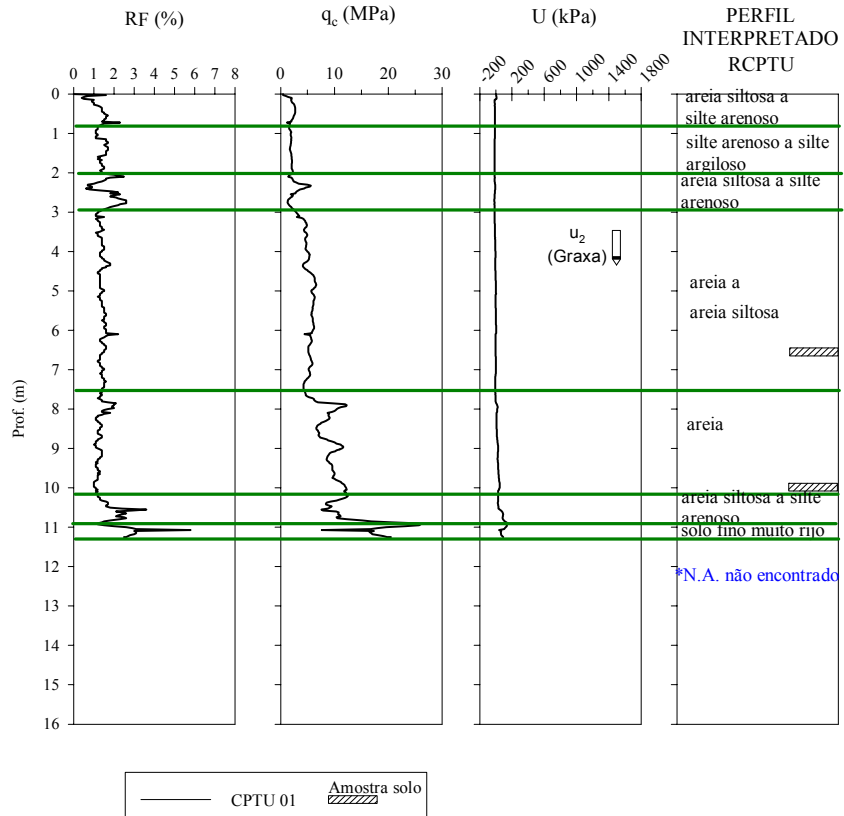


Figura 5.5: Resultados do ensaio CPTU 01 realizado a montante do aterro.

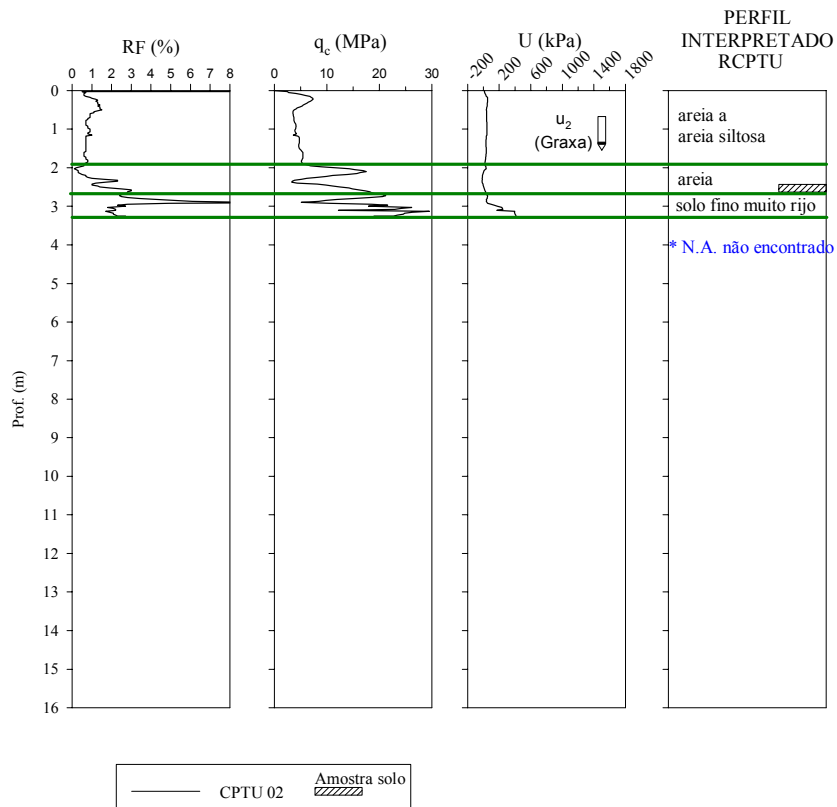


Figura 5.6: Resultados do ensaio CPTU 02 realizado na área do aterro.

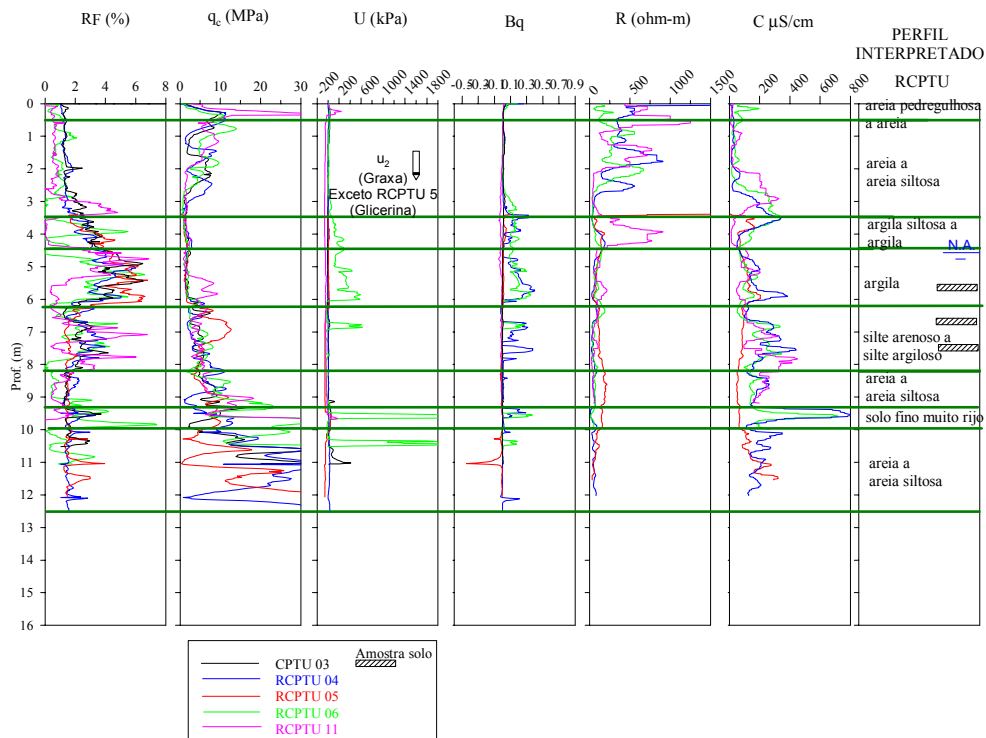


Figura 5.7: Resultados dos ensaios CPTU 03, RCPTU 04, 05, 06 e 11 realizados a jusante do aterro, no entorno do poço de monitoramento temporário PMT03.

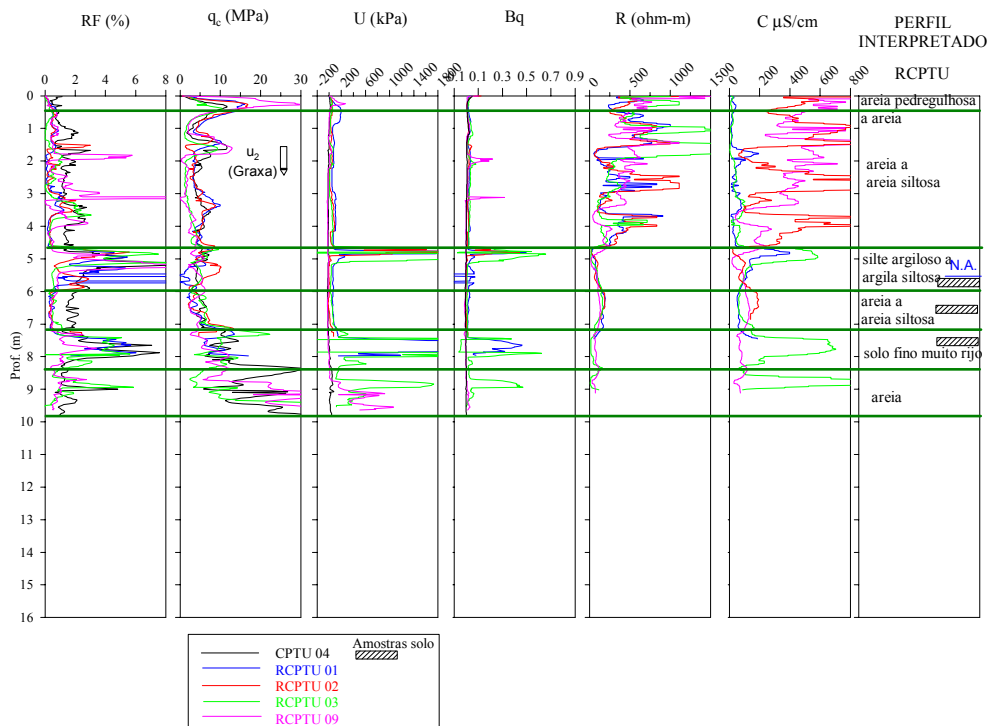


Figura 5.8: Resultados dos ensaios CPTU 04, RCPTU 01, 02, 03 e 09 realizados a jusante do aterro, no entorno do poço de monitoramento temporário PMT04.

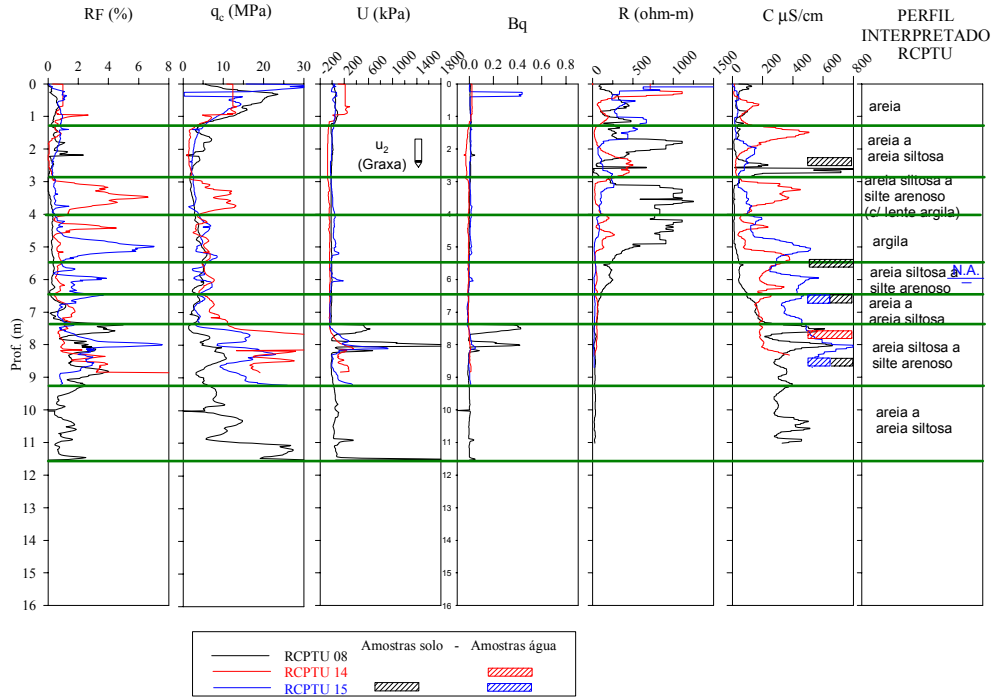


Figura 5.9: Resultados dos ensaios RCPTU 08, 14 e 15 realizados a jusante, próximas aos limites da área aterro.

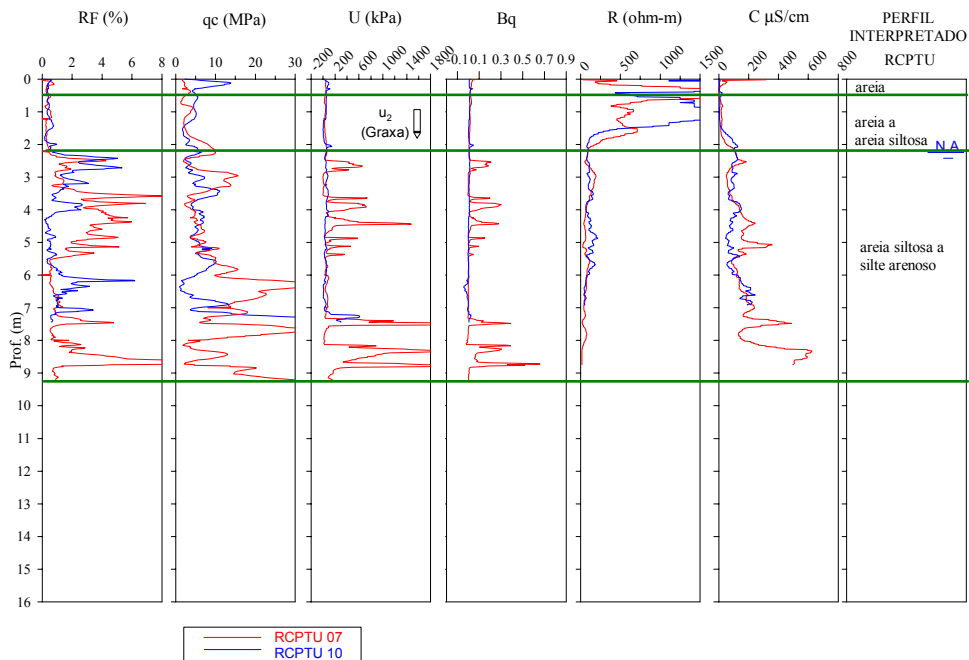


Figura 5.10: Resultados dos ensaios RCPTU 07 e 10 realizados a jusante, próximos à erosão existente na área de drenagem.

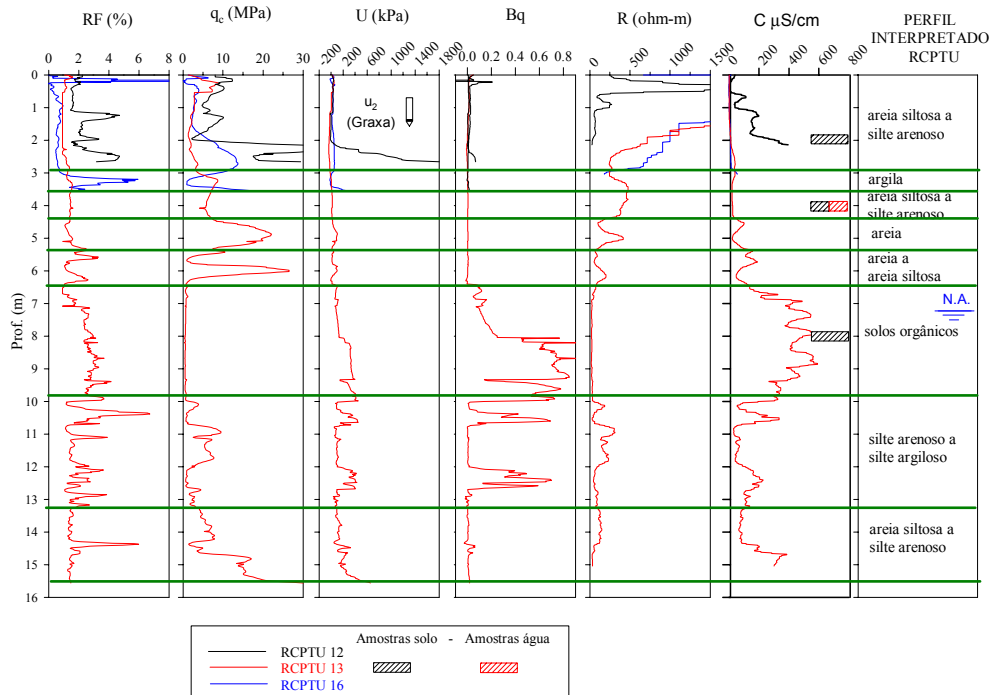


Figura 5.11: Resultados dos ensaios RCPTU 12, 13 e 16 realizados na área localizada fora do aterro.

5.3.1.3 Dissipação de excesso de poro-pressão

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios RCPTU 4, RCPTU 6 e RCPTU 8, feitos com o filtro de cavidade preenchido com graxa. O ensaio de dissipação no ensaio RCPTU 4 foi executado na profundidade 9,50 m, sendo que o nível d'água no momento do ensaio se encontrava na profundidade 6,0 m. O ensaio de dissipação no ensaio RCPTU 6 foi executado na profundidade 5,15 m, com nível d'água na profundidade 6,0 m assim como no RCPTU 8, executado na profundidade 8,06 m, no interior da área do aterro, a jusante da cava de resíduos. A dissipação do excesso de poro pressão executada no ensaio RCPTU 5, na profundidade 9,46 m e nível d'água 6,0 m, com o piezo-elemento saturado com glicerina, sendo que para este ensaio foi executado um pré-furo de pouco mais de 3,0 m, por problemas operacionais do penetrômetro durante a execução inviabilizou-se a obtenção de 50% da dissipação do excesso de poro-pressão e a posterior utilização e análise desse ensaio. O valor de α , como dito anteriormente, varia em uma faixa muito ampla de valores, sendo recomendado entre 1,5 a 4,0 (Robertson e Campanella, 1983). Neste trabalho adotou-se $\alpha=3$, valor dentro da faixa acima citada, que atende também a uma faixa ampla de valores para q_c (Tabela 3.2) e por ser um valor normalmente encontrado nas faixas de valores recomendadas para vários tipos de solo.

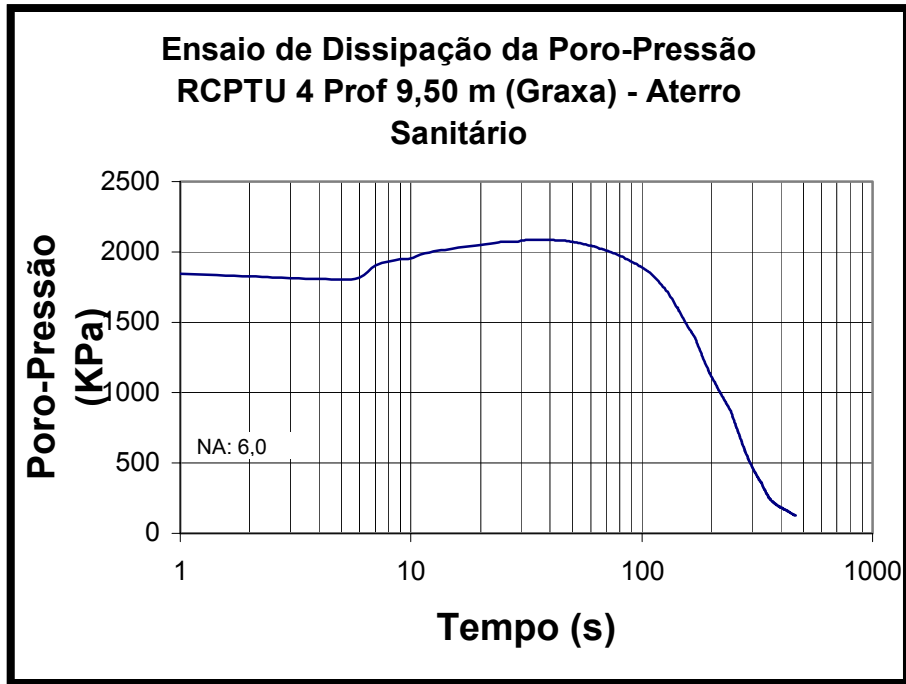


Figura 5.12: Resultados da dissipação da poro-pressão no ensaio RCPTU 4, profundidade 9,50m, em camada de areia siltosa a silte arenoso interpretada segundo o ábaco de Robertson et al. (1986).

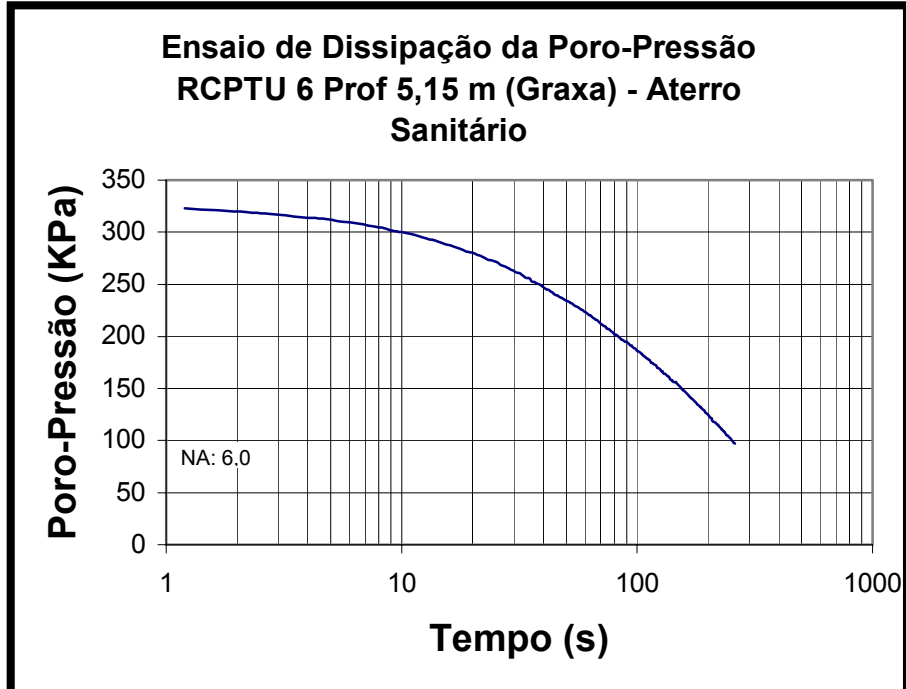


Figura 5.13 :Resultados da dissipação da poro-pressão no ensaio RCPTU 6, profundidade 5,15m, em camada de argila interpretada segundo o ábaco de Robertson et al. (1986).

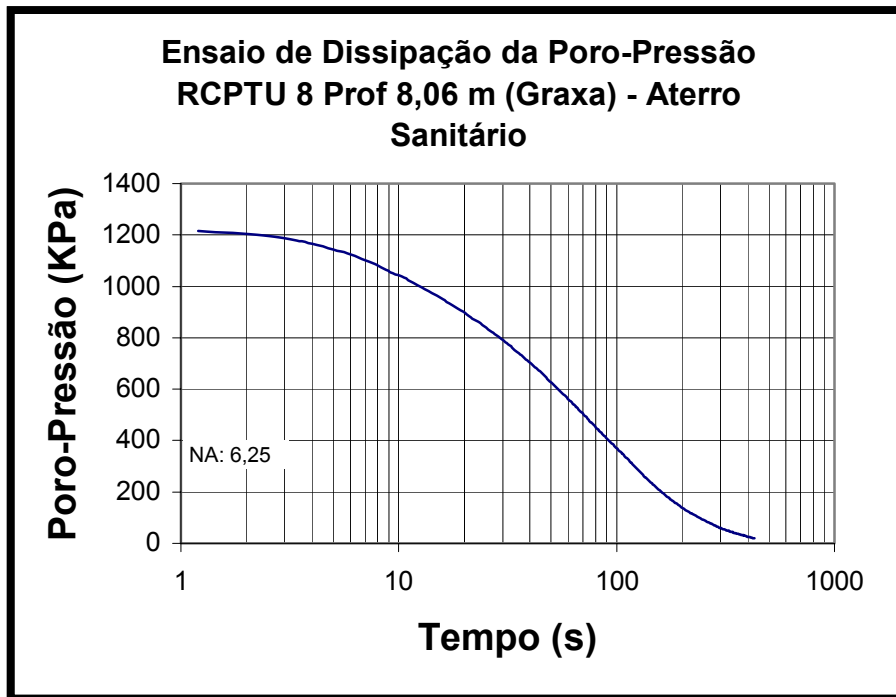


Figura 5.14 Resultados da dissipação da poro-pressão no ensaio RCPTU 8, profundidade 8,06m, em camada identificada como silte arenoso a silte argiloso interpretada segundo o ábaco de Robertson et al. (1986)

Tabela 5.5 Coeficiente de permeabilidade determinado a partir dos resultados dos ensaios de dissipação

| RCPTU | Prof (m) | Ch (m ² /s) | α | q_c (bar) | M (bar) | k (cm/s) | Camada Dissipação (Interpretação RCPTU) |
|-------|----------|------------------------|----------|-------------|---------|----------|---|
| 4 | 9,50 | 2,55E-06 | 3,0 | 62,55 | 187,65 | 1,3E-05 | AREIA SILTOSA a SILTE ARENOSO |
| 6 | 5,15 | 3,022E-06 | 3,0 | 14,55 | 43,65 | 6,8E-05 | ARGILA |
| 8 | 8,06 | 1,517E-05 | 3,0 | 47,64 | 142,92 | 1,04E-04 | SILTE ARENOSO a SILTE ARGILOSO |

5.3.1.4 Amostras de solo e água no aterro de Bauru

Na Tabela 5.6 está apresentado um quadro resumo das amostras coletadas com o amostrador direct-push. As profundidades de coleta foram determinadas a partir da interpretação dos resultados dos ensaios com o piezocone.

Tabela 5.6: Quadro-resumo identificando as amostras de solo coletadas com Geoprobe® e o teor de umidade das mesmas

| Ensaio | No. amostra | Data | Prof. inicial (m) | Prof. final (m) | Teor de Umidade (%) |
|----------|-------------|----------|-------------------|-----------------|---------------------|
| CPTU 01 | 1 | Dez/2001 | 6,0 | 7,0 | 11,7 |
| | 2 | Dez/2001 | 9,5 | 10,5 | 6,8 |
| CPTU 02 | 1 | Dez/2001 | 2,0 | 3,0 | - |
| CPTU 03 | 1 | Dez/2001 | 5,0 | 6,0 | 21,5 |
| | 2 | Dez/2001 | 6,0 | 7,0 | 17,6 |
| | 3 | Dez/2001 | 7,0 | 8,0 | 18,6 |
| CPTU 04 | 1 | Dez/2001 | 5,0 | 6,0 | 21,5 |
| | 2 | Dez/2001 | 6,0 | 7,0 | 16,6 |
| | 3 | Dez/2001 | 7,0 | 8,0 | 21,5 |
| RCPTU 13 | 1 | Jul/2002 | 1,5 | 2,5 | 2,5 |
| | 2 | Jul/2002 | 3,5 | 4,5 | 18,6 |
| | 3 | Jul/2002 | 7,50 | 8,5 | 9,7 |
| RCPTU 15 | 1 | Jul/2002 | 2,0 | 3,0 | 5,1 |
| | 2 | Jul/2002 | 5,0 | 6,0 | 18,1 |
| | 3 | Jul/2002 | 6,0 | 7,0 | 18,1 |
| | 4 | Jul/2002 | 8,0 | 9,0 | 20,1 |

Na Tabela 5.7 está apresentado o quadro resumo das coletas de amostras de água realizadas através da técnica direct-push, com amostradores Geoprobe® que foram realizadas em Julho de 2002.

Tabela 5.7: Quadro-resumo identificando as amostras de água coletadas com Geoprobe®.

| Ensaio | No. amostra | Prof. inicial (m) | Prof. final (m) |
|----------|-------------|-------------------|-----------------|
| RCPTU 13 | 1 | 3,5 | 4,5 |
| RCPTU 14 | 1 | 7,3 | 8,3 |
| RCPTU 15 | 1 | 6,0 | 7,0 |
| | 2 | 8,0 | 9,0 |

5.3.1.5 Ensaios de Caracterização Geotécnica

Em uma primeira etapa foram realizados ensaios de caracterização das amostras de solo obtidas com o amostrador direct-push. Os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica estão apresentados na Tabela 5.8 e Tabela 5.9.

Tabela 5.8: Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica

| Ensaio | Prof. (m) | ρ_s (g/cm ³) | Granulometria (%) | | | LL (%) | IP (%) | CTC (meq/100g) | Vb (g/100g) |
|---------------------------|------------|-------------------------------|-------------------|-------|-------|--------|--------|----------------|-------------|
| | | | argila | silte | areia | | | | |
| CPTU 1A | 6,0 a 7,0 | 2,636 | 33,0 | 20,0 | 47,0 | ENR | | 3,36 | 1,08 |
| | 9,5 a 10,5 | 2,644 | 4,0 | 7,0 | 89,0 | ENR | | 5,03 | 1,61 |
| CPTU 2A | 2,0 a 3,0 | 2,654 | 5,0 | 6,0 | 89,0 | ENR | | 2,55 | 0,82 |
| CPTU 3A | 5,0 a 6,0 | 2,663 | 27,5 | 15,5 | 57,0 | 32 | 12 | 6,00 | 1,92 |
| | 6,0 a 7,0 | 2,642 | 18,0 | 2,0 | 80,0 | ENR | | 2,88 | 0,92 |
| | 7,0 a 8,0 | 2,651 | 16,0 | 4,5 | 79,5 | ENR | | 2,74 | 0,88 |
| CPTU 4A | 5,0 a 6,0 | 2,707 | 8,5 | 14,5 | 77,0 | ENR | | 5,36 | 1,72 |
| | 6,0 a 7,0 | 2,630 | 5,0 | 8,5 | 86,5 | ENR | | 2,56 | 0,82 |
| | 7,0 a 7,7 | 2,676 | 10,0 | 12,0 | 78,0 | ENR | | 6,96 | 2,23 |
| | 7,7 a 8,0 | 2,665 | 34,0 | 18,5 | 47,5 | 45 | 20 | 12,09 | 3,87 |
| RCPTU 13A | 1,5 a 2,5 | 2,663 | 7,0 | 1,0 | 92,0 | ENR | | 1,97 | 0,63 |
| | 3,5 a 4,5 | 2,627 | 1,0 | 1,5 | 97,5 | ENR | | 0,18 | 0,06 |
| | 7,5 a 8,5 | 2,517 | 22,5 | 22,5 | 55,0 | 37 | 11 | 7,90 | 2,55 |
| RCPTU 15A | 2,0 a 3,0 | 2,666 | 5,5 | 6,5 | 88,0 | ENR | | 1,83 | 0,58 |
| | 5,0 a 6,0 | 2,730 | 8,5 | 9,5 | 82,0 | ENR | | 6,88 | 2,20 |
| | 6,0 a 7,0 | 2,699 | 11,0 | 11,0 | 78,0 | ENR | | 6,81 | 2,18 |
| | 8,0 a 9,0 | 2,753 | 5,0 | 14,8 | 80,2 | ENR | | 9,41 | 3,01 |
| ENR: Ensaio Não Realizado | | | | | | | | | |

Tabela 5.9 Resultados dos ensaios de caracterização da atividade das argilas segundo Lautrin (1989).

| ensaio | Prof. (m) | CTC | Vb | (%) argila | Acb (g/100g) | Interpretação segundo Lautrin (1989) | |
|-----------|------------|-------|------|------------|--------------|--------------------------------------|----------------|
| CPTU 1A | 6,0 a 7,0 | 3,36 | 1,08 | 33,00 | 3,27 | pouco ativa | caulinita |
| | 9,5 a 10,5 | 5,03 | 1,61 | 4,00 | 40,25 | nociva | montmorilonita |
| CPTU 2A | 2,0 a 3,0 | 2,55 | 0,82 | 5,00 | 16,40 | muito ativa | ilita |
| CPTU 3A | 5,0 a 6,0 | 6,00 | 1,92 | 27,50 | 6,98 | normal | caulinita |
| | 6,0 a 7,0 | 2,88 | 0,92 | 18,00 | 5,11 | normal | caulinita |
| | 7,0 a 8,0 | 2,74 | 0,88 | 16,00 | 5,50 | normal | caulinita |
| CPTU 4A | 5,0 a 6,0 | 5,36 | 1,72 | 8,00 | 20,24 | nociva | montmorilonita |
| | 6,0 a 7,0 | 2,56 | 0,82 | 5,00 | 16,40 | muito ativa | ilita |
| | 7,0 a 7,7 | 6,96 | 2,23 | 10,00 | 22,30 | muito ativa | montmorilonita |
| | 7,7 a 8,0 | 12,09 | 3,87 | 34,00 | 11,38 | Ativa | montmorilonita |
| RCPTU 13A | 1,5 a 2,5 | 1,97 | 0,63 | 7,00 | 9,00 | Ativa | caulinita |
| | 3,5 a 4,5 | 0,18 | 0,06 | 1,00 | 6,00 | normal | caulinita |
| | 7,5 a 8,5 | 7,90 | 2,55 | 22,50 | 11,33 | Ativa | ilita |
| RCPTU 15A | 2,0 a 3,0 | 1,83 | 0,58 | 5,50 | 10,55 | Ativa | caulinita |
| | 5,0 a 6,0 | 6,88 | 2,20 | 8,50 | 25,88 | nociva | montmorilonita |
| | 6,0 a 7,0 | 6,81 | 2,18 | 11,00 | 19,82 | nociva | montmorilonita |
| | 8,0 a 9,0 | 9,41 | 3,01 | 5,00 | 60,20 | nociva | montmorilonita |

5.3.2 Análise dos Resultados

5.3.2.1 Piezocone e Piezocone de Resistividade

a. Identificação do perfil geotécnico

Para permitir uma comparação das interpretações feitas com base no ábaco de Robertson et al. (1986) com o tipo de solo que ocorre no local, amostras de solo foram coletadas, em alguns ensaios, em diferentes profundidades.

A interpretação dos resultados do ensaio CPTU 1 (Figura 5.5), executado a montante da área do aterro, numa área fora da influência dos resíduos, indica, com base no ábaco de Robertson et al. (1986), a ocorrência de uma areia fina siltosa, praticamente ao longo de todo o perfil. Nesse ensaio o nível d'água não foi encontrado. As amostras coletadas neste ensaio confirmam a ocorrência de um material com as características semelhantes àqueles indicadas pelo ábaco de Robertson et al. (1986), em duas profundidades amostradas (6,5 m e 10,0 m). Observa-se, a partir da profundidade de 7,5 m, um aumento gradual nos valores de resistência de ponta (q_c) apresentam um aumento gradual, mostrando a ocorrência de material mais arenoso, o que coincide com a amostra coletada nesta região, que possui um 89% de areia em sua constituição (Tabela 5.8).

O ensaio CPTU 2 (Figura 5.6), foi interrompido a 3 m de profundidade, devido à presença de pedras. A presença dessas pedras já havia sido notada nesse ensaio a partir dos seus 2 m de profundidade, em que os picos de q_c praticamente ocorrem ao longo de todo esse último metro ensaiado. Na amostra coletada a 2,5 m de profundidade observa-se a ocorrência de uma areia (88%, Tabela 5.8), intercalada pelas pedras que aí ocorrem, mostrando boa correlação com a interpretação feita a partir do ábaco de Robertson et al. (1986), que indica a ocorrência de um material com essas características nesse ponto.

O ensaio CPTU 3 (Figura 5.7) teve amostras coletadas a: 5,5 m; 6,5 m e 7,5 m de profundidade. Note-se, a 5,5 m de profundidade, a ocorrência de baixos valores de q_c e altos valores para R_f . Nesse ponto os ensaios de caracterização indicaram a ocorrência de uma areia argilosa, sendo que a interpretação dos resultados do ensaio CPTU, pelo ábaco de Robertson et al. (1986) classificou esse solo como uma argila. Nas profundidades 6,5 m e 7,5 m, ocorre uma areia argilosa, sendo que os resultados do piezocone, interpretados pelo ábaco de Robertson et al. (1986), classificam esse solo de silte arenoso. Observa-se que a diminuição da porcentagem de argila, e aumento na fração arenosa entre essas duas profundidades é identificada nos resultados do piezocone, em que os valores de R_f têm uma redução acompanhada por um aumento nos valores de q_c . Se considerarmos que os resultados do piezocone possibilitam identificar o comportamento do solo, e não a sua textura, pode-se considerar que esses resultados foram bons. Os ensaios RCPTU 4, RCPTU 5, RCPTU 6, RCPTU 11 executados ao redor do CPTU 3, com distâncias inferiores a 2,0 m, mostram um comportamento muito similar, indicando a repetibilidade dos resultados e permitindo a sua avaliação em conjunto (Figura 5.7).

Os resultados dos ensaios RCPTU 1, RCPTU 2, RCPTU 3, RCPTU 9 realizados no entorno do ponto do CPTU 4 (Figura 5.8), também apresentam uma resposta muito similar, possibilitando a sua análise em conjunto. Nas profundidades 5,5 m; 6,5 m e 7,5 m, amostras para caracterização também foram coletadas. Na profundidade de 5,5 m, em que foi identificado, pelo ábaco de Robertson et al. (1986), a ocorrência de um silte argiloso, teve-se, pelas amostras, identificada uma camada de areia silto-argilosa (72% areia – 15,5 % silte e 12,5 % argila, Tabela 5.8). Os 28% de finos presentes no solo devem ser os responsáveis pelos altos picos de R_f registrados pelo piezocone. A diminuição destes finos na camada seguinte, é acompanhada de uma redução dos valores de R_f e um aumento gradual de q_c , comportamento típico de areias, para um material que é composto por 82% de areia. Na camada seguinte, o aumento dos valores de R_f e de q_c levam, pelo ábaco de Robertson et al. (1986), a classificar um solo fino muito rijo, sendo que na amostra aí coletada tem-se um teor

quase idêntico de argila e areia (44% e 45% respectivamente), mais uma vez mostrando que houve uma boa interpretação dos resultados do piezocone a partir do ábaco de Robertson et al. (1986).

Na Figura 5.15 é apresentado um perfil esquemático do local onde foram instalados os poços temporários de monitoramento. Nesta figura já constam valores de condutividade (inverso da resistividade) que serão apresentados no próximo item. Esse perfil foi interpretado com base nos resultados CPTU e RCPTU realizados nesse local. A partir destes resultados, pode-se considerar que o ensaio RCPTU possibilitou identificar o perfil geotécnico desse local. Fatores como a pouca experiência na utilização desses ensaios em solos tropicais, mais a necessidade de se adaptar o ábaco de Robertson et al. (1986) para a esses solos, são determinantes para justificar as diferenças encontradas. Marques (2002) já havia demonstrado que os ensaios de piezocone em solos tropicais eram capazes de identificar camadas de solos de diferentes comportamentos, entretanto, estes não fornecem informações sobre a textura do solo, que deve ser confirmada com amostragens em pontos selecionados com base na interpretação dos registros de q_c e R_f .

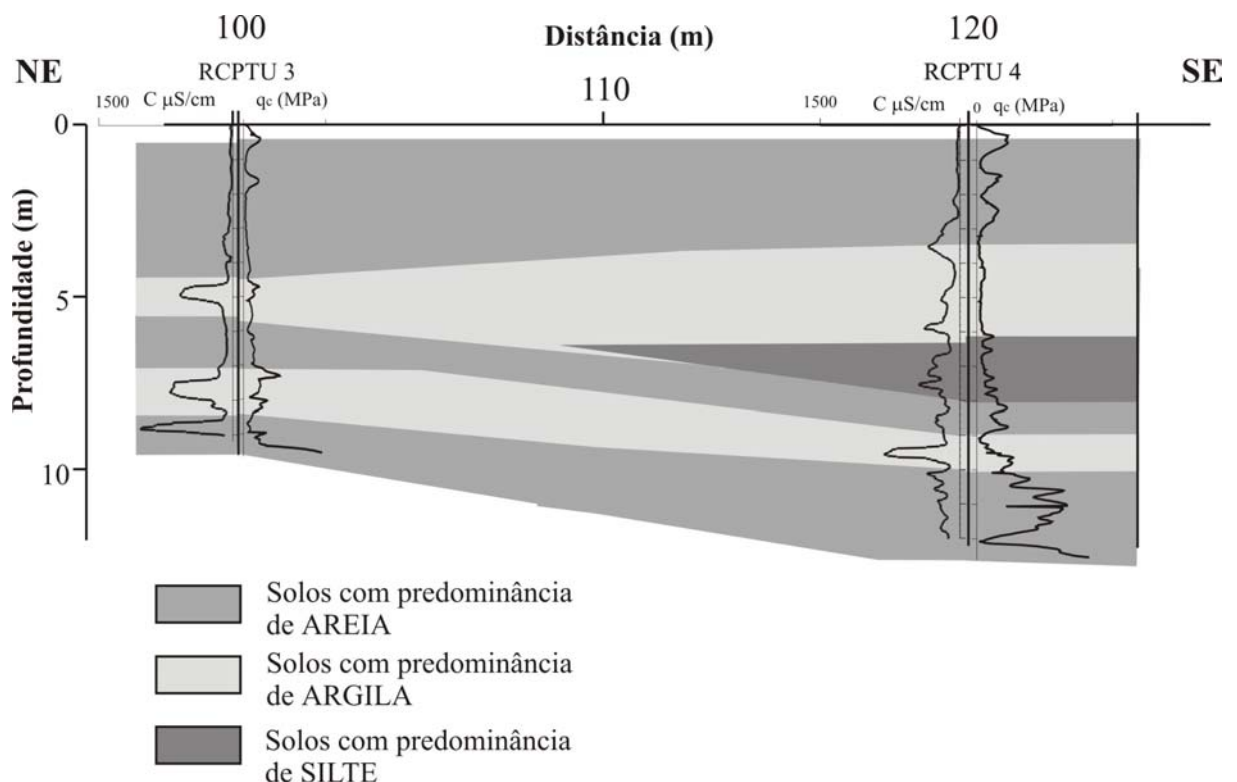


Figura 5.15 Perfil geotécnico esquemático, interpretado com base nos resultados de ensaios RCPTU executados no aterro de Bauru, á jusante, no local onde foram instalados os poços temporários de monitoramento

b. Posição do nível d'água

Os ensaios CPTU realizados no aterro de Bauru não permitiram a definição precisa da posição do nível d'água pelo registro das poro-pressões. Nos ensaios realizados no entorno dos poços temporários de monitoramento, próximos aos ensaios CPTU 3 e CPTU 4, onde o nível d'água pode ser identificado a qualquer momento, observa-se o aumento do excesso de poro-pressão em camada identificada, pelo ábaco de Robertson et al. (1986) como constituída de solo fino, sendo que na camada imediatamente acima, de predominância de material arenoso, o excesso de poro pressão foi praticamente nulo (Figura 5.16). Percebe-se pequeno aumento de excesso de poro-pressão especialmente no ensaio RCPTU 03, em camada de material identificado como silte-argiloso (onde se encontra o nível d'água identificado no campo, na profundidade 6 m), possivelmente por ser esta uma zona de ascensão capilar.

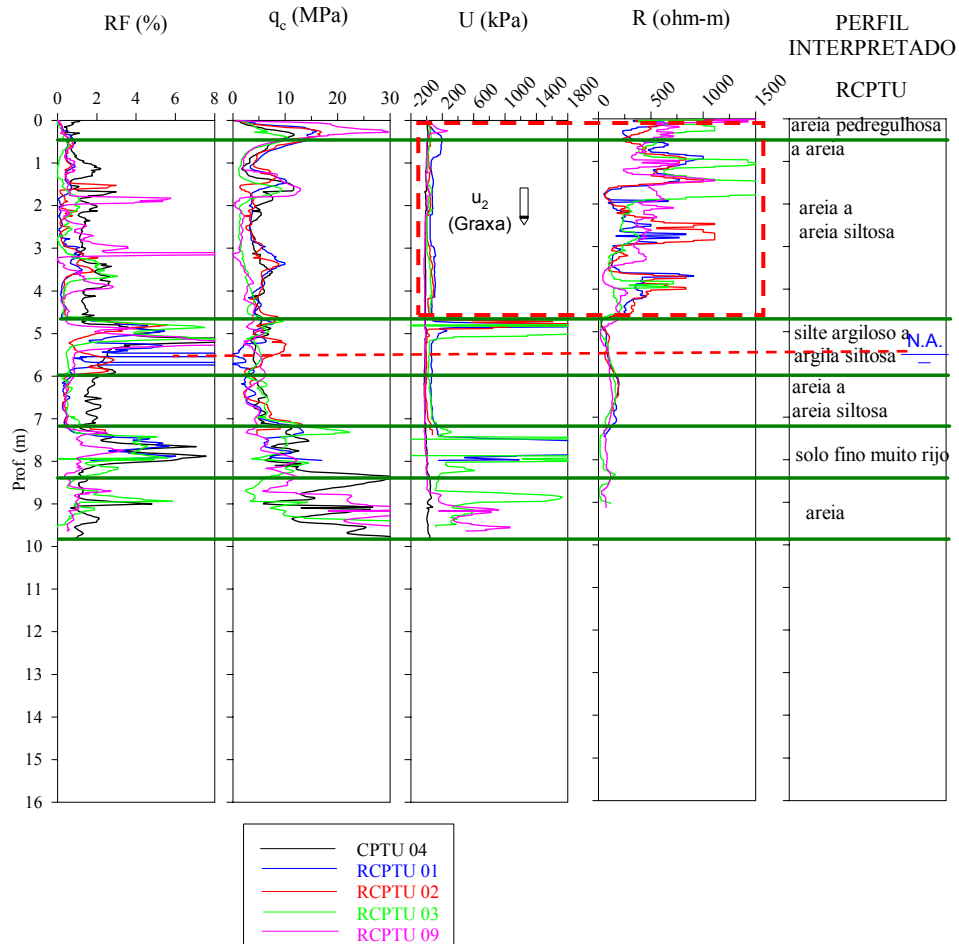


Figura 5.16 Resultados do ensaio CPTU 04 executado no aterro de Bauru e posição do nível d'água

Observaram-se, várias vezes, esse excesso de poro-pressão alguns metros acima do nível d'água, em camadas de solos mais finos, quando o piezocone, com o filtro preenchido com graxa, atingia a zona de ascensão capilar. Outro exemplo pode ser visto na Figura 5.7. Nesta mesma figura (assim como na Figura 5.16) observa-se que os valores de resistividade obtidos com o dispositivo de medida de resistividade auxiliam na identificação da posição do nível d'água. Queda brusca nos valores de resistividade, para valores inferiores a 200ohm.m ajudam a identificar a posição do nível d'água.

c. Resistividade

Os valores de resistividade determinados nos ensaios RCPTU 4, RCPTU 5, RCPTU6 e RCPTU 11 (Figura 5.7) praticamente se repetem. Observa-se que entre as profundidades de 0 a 2 m, onde ocorre uma camada identificada, pelo ábaco de Robertson et al. (1986), como uma areia siltosa tem-se valores acima de 200 ohm.m, o que segundo Campanella (1998) está de acordo com o que se observa em areias. Os valores de resistividade começam a diminuir a partir desta profundidade, à medida que se aproxima de uma camada identificada como de argila e onde se encontra o nível d'água (4,5 m). Isto deve ocorrer por esta ser uma zona de capilaridade, que devido ao aumento da umidade, leva a valores próximos de 50 ohm.m. Quando atinge o nível d'água, os valores de resistividade praticamente se mantêm constantes em torno de 50 ohm.m, o que segundo Campanella (1998), ocorre em solos mais densos ou com porcentagem de argila, ou mesmo, com alta temperatura. As resistividades medidas no RCPTU 5 (entre 6,5 m e 11,0 m de profundidade) apresentam valores mais altos de resistividade do que o que foi determinado nos demais ensaios vizinhos a esse, apesar de q_c e R_f ser igual aos demais. Um aumento na resistividade poderia indicar a presença de contaminantes isolantes (LNAPL ou DNAPL), como gasolina, por exemplo, o que não seria de se esperar nesse local. Não foram feitas coletas de amostra de água e as amostras de solo nas profundidades 6,5 m e 7,5 m só foram utilizadas para determinação granulométrica, o que impossibilita qualquer avaliação sobre a presença de contaminantes no local.

Na (Figura 5.8) tem-se os resultados dos ensaios RCPTU 1, RCPTU 2, RCPTU 3, RCPTU 9. No primeiro metro da camada identificada como areia os valores de resistividade foram superiores a 200 ohm.m. Quando os valores de q_c e R_f indicam que o solo está se tornando mais fino, identificando-o como uma areia siltosa, os valores de resistividade passaram a oscilar entorno de 200 ohm.m, possivelmente influenciados pela presença de material mais fino. Na zona saturada, os valores de resistividade determinados pelos diversos ensaios se repetem e variam quando atravessam diferentes camadas de solo. Por exemplo,

entre 5,0 m e 6,0 m de profundidade, onde ocorre um solo identificado como argila, a resistividade medida foi da ordem de 50 ohm.m, aumentando para 200 ohm.m entre 6,0 m e 7,5 m, na camada identificada como areia a areia siltosa. Este valor é superior ao sugerido por Campanella (1998) para uma área sem contaminação (100 ohm.m) e seria um ponto recomendado pra coleta de amostras de água e solo para análises químicas. Entre as profundidades 7,5 m e 8,0 m valores na ordem de 50 ohm.m, determinado no solo fino aí identificado, para o RCPTU 2, voltando a subir para próxima de 100 ohm.m na profundidade 8,5 m, onde começa uma camada identificada, pelo ábaco de Robertson et al. (1986), como de areia. Os ensaios RCPTU 2 e RCPTU 3 apresentam valores distintos na profundidade 7,0 m e 8,0 m, o que poderia caracterizar um material com diferentes argilo-minerais ou a presença de contaminantes, sendo este também um local recomendado para a coleta de amostras de água e solo.

d. Influência da saturação nos valores de resistividade

Neste local foram executadas campanhas em épocas diferentes do ano, o que possibilitou tentar avaliar a diferença nos valores de resistividade medidas a uma possível variação no teor de umidade do solo devido à precipitação de águas de chuvas.

Os resultados do ensaio RCPTU 11 (Figura 5.17) mostram uma diminuição nos valores de resistividade, na camada de areia, entre as profundidades de 2,0 m e 3,0 m. Essa redução, no meio dessa camada, pode ser um indício de presença de contaminantes. Além disso, esse ensaio foi executado em abril, mês com baixa precipitação acumulada, de modo que um menor grau de saturação do solo deveria resultar em maiores valores de resistividade, fato que não ocorreu nessa região do maciço e poderia explicar os elevados valores de resistividade entre 3,5 m e 4,5 m de profundidade. Análises de amostras de água coletadas no poço de monitoramento temporário instaladas próximo a esse ensaio indicaram um teor de cloreto mais elevado em relação às outras amostras, o que pode ser indício da presença de alterações neste local.

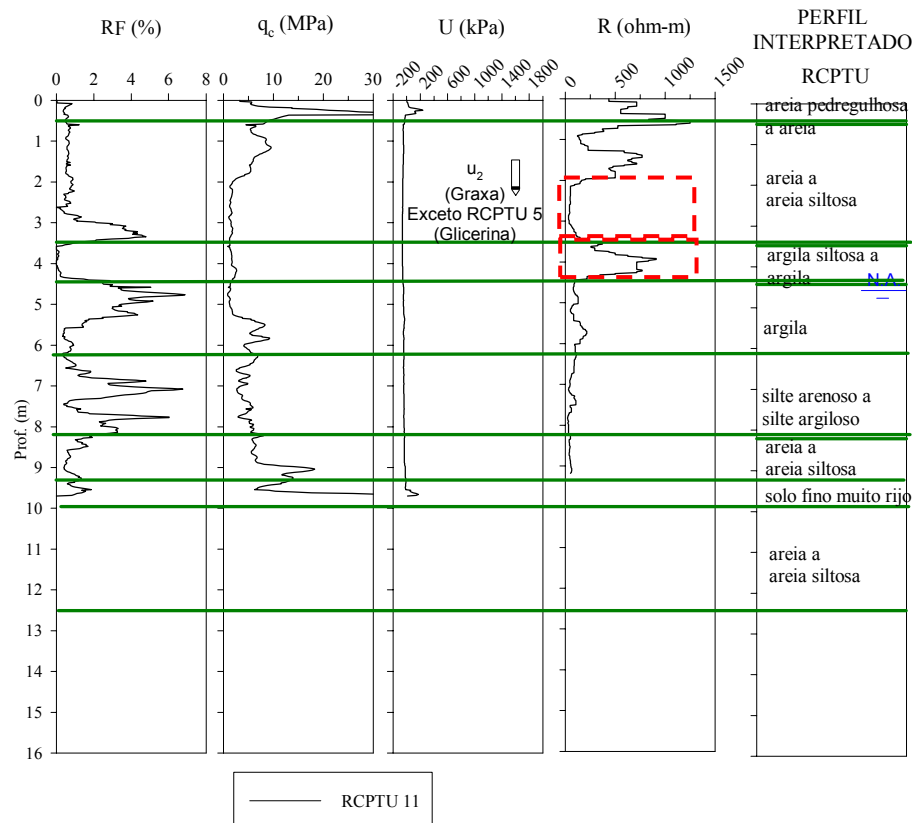


Figura 5.17: Influência do teor de umidade nos valores de resistividade do ensaio RCPTU 11 realizado no aterro de Bauru

Por outro lado, analisando-se os resultados de resistividade na zona não saturada do maciço nota-se, para os resultados dos ensaios apresentados na Figura 5.18, uma diferença nas leituras de resistividade entre os ensaios RCPTU 01, 02 e 03 executados em fevereiro, período de maior precipitação e RCPTU 09, este último executado em abril, período de menor precipitação. Ao longo das profundidades na zona não saturada têm-se picos de valores de condutividade elétrica (resistividade), não coincidindo os valores dos ensaios apesar de terem sido executados próximos, a menos que 2 m. Já abaixo do nível d'água isso se inverte; com a ocorrência de uma maior igualdade entre os resultados dos ensaios. Se assumirmos que o único fator que possa ter contribuído para essa variação, na zona saturada, é o grau de saturação, a única explicação plausível para esse fato é que possa ter havido concentrações de umidade em regiões diferentes do maciço nos diferentes pontos ensaiados e ao longo de suas profundidades. Resultados de determinações de teor e umidade das amostras de solo coletadas com o Geoprobe® mostraram que variações são possíveis de ocorrer (Tabela 5.6).

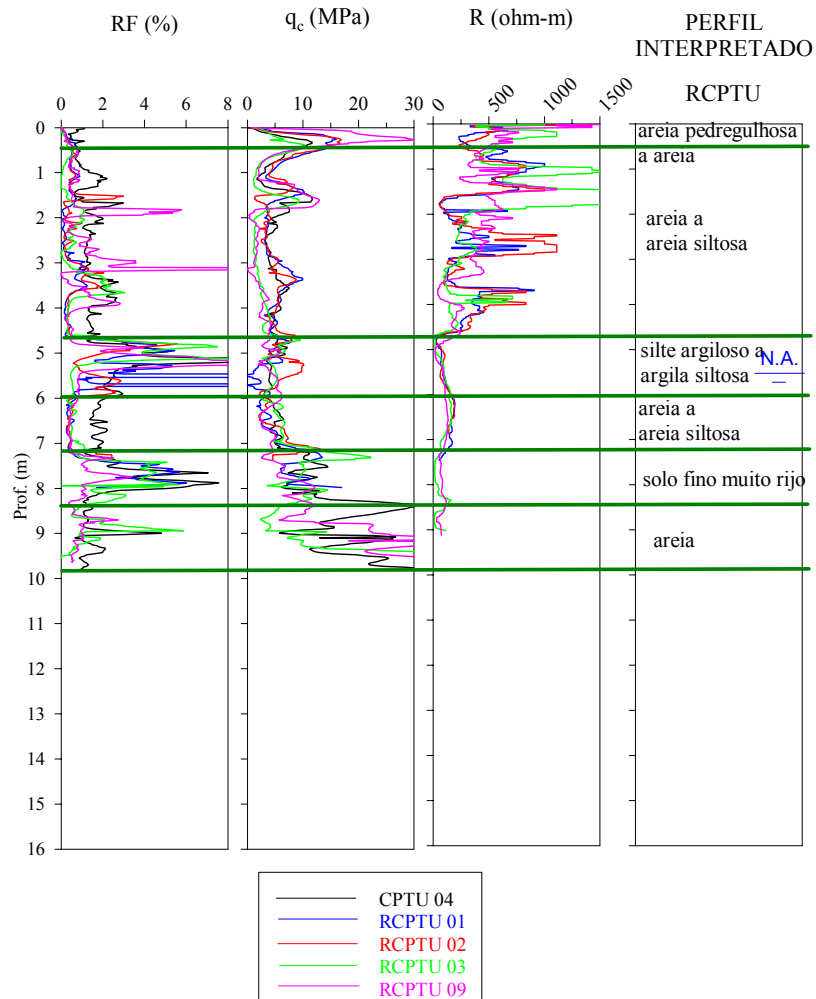


Figura 5.18 Comparação entre os valores de resistividade em ensaios RCPTU feitos em diferentes épocas do ano, com diferentes índices pluviométricos.

Sabe-se, pela Lei de Archie (1942), que o grau de saturação tem grande influencia nos valores de resistividade (condutividade), especialmente para baixos graus de saturação. Este aspecto foi discutido por Daniel et al. (2002), no último simpósio americano de geofísica aplicada a meio ambiente, destacando-se, na Figura 5.19, resultados do ensaio RCPTU na zona não saturada de um perfil de solo arenoso.

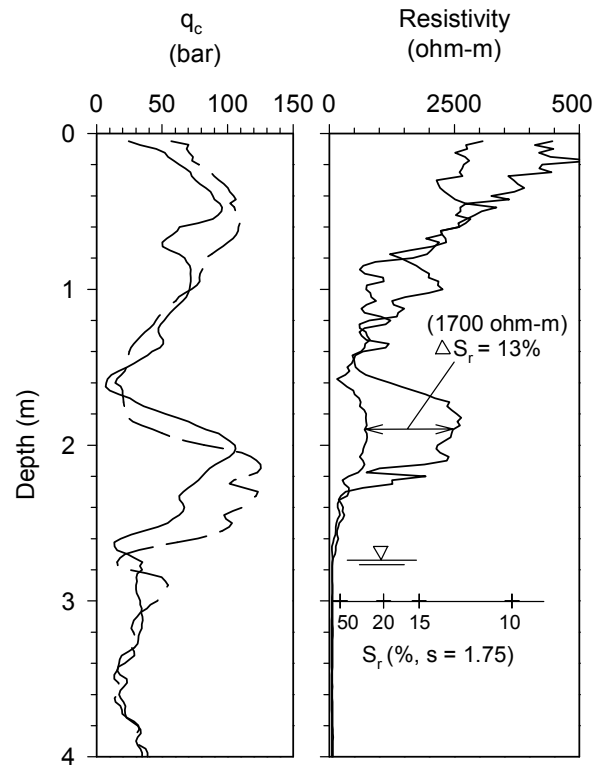


Figura 5.19 Efeito da variação do grau de saturação nos valores de resistividade (Daniel et al., 2002)

Observa-se, nessa figura, que entre os dois ensaios RCPTU realizados próximos, a variabilidade entre os resultados, representados através de valores de q_c , é muito pequena. Nota-se que os perfis de resistividade determinados nos dois ensaios seguem a mesma tendência, mas apresenta valores muito discrepantes em certas profundidades (por exemplo, 1,6 a 2,2 m). Nessa figura foi plotada, apenas para fins de comparação, uma escala para grau de saturação na profundidade de 3 m assumindo um fator “s” da lei de Archie (1942) igual a 1,75 (a faixa de variação desse parâmetro publicada é 1 a 2,5). Esta escala mostra que a diferença de 1700 ohm.m entre os dois ensaios na profundidade de 1,9 m deve-se, provavelmente, a uma pequena variação do grau de saturação ($\approx 13\%$).

Infelizmente, apesar do efeito de variações na porosidade nos valores de resistividade ser muito menos significativo em solos não saturados, ele não é desprezível. Além disso, o efeito do da condutividade dos grãos e da superfície específica das partículas de argila se torna muito mais importante quando o grau de saturação diminui (Frohlich & Parke, 1989). Finalmente, é muito difícil coletar amostras de água da região não saturada do maciço e variações significativas na resistividade desse fluido podem ocorrer, especialmente em solos sujeitos a contaminação, como é o caso do aterro estudado. Para considerar todas essas

variações alguns pesquisadores têm medido, além da resistividade, a constante dielétrica e tratados os resultados através da equação Universal de Topp para estimar teor de umidade (Rose et. al., 1998). Entretanto, os resultados publicados até o momento que tratam de casos práticos tem demonstrado a dificuldade de levar em conta de forma adequada todos esses fatores.

5.3.2.2 Ensaio de dissipação de poro-pressão

Os coeficientes de permeabilidade obtidos (Tabela 5.5), calculados com base nos resultados dos ensaios de dissipação executados e utilizando-se a proposta de Houlsby & Teh (1988), podem ser considerados satisfatórios, uma vez que resultaram em valores da mesma ordem de grandeza dos determinados em ensaios de laboratório (3×10^{-5} cm/s) por Mondelli (2004) utilizando-se amostras de solos coletadas em um talude existente na região do aterro. Apesar das restrições do uso do filtro preenchido com graxa, principalmente para o ensaio de dissipação do excesso de poro-pressão, em que não existe uma base teórica para sua interpretação por não haver garantia da saturação, os valores calculados para o coeficiente de permeabilidade estão de acordo com os encontrados na literatura, onde Vargas (1968) fornece valores de coeficiente de permeabilidade para argilas e siltes entre 10^{-3} cm/s $> k > 10^{-5}$ cm/s (baixa permeabilidade, segundo o mencionado autor) e para as argilas 10^{-5} cm/s $> k > 10^{-7}$ cm/s (classificada como muito baixa pelo mesmo autor).

Observa-se, também, nas Figura 5.20 a Figura 5.22, um razoável ajuste entre as curvas experimental e teórica proposta por Houlsby & Teh (1988), mesmo em ensaios onde utilizou-se o filtro de cavidade preenchido com graxa automotiva. A curva obtida pra o ensaio RCPTU 8 apresenta 100% de dissipação, sendo a curva que mais se aproximou da curva teórica proposta por Houlsby & Teh (1988). Destaca-se , novamente, que esse procedimento não é o mais adequado para estimativa do coeficiente de permeabilidade e os poucos resultados disponíveis não permitem apresentar conclusões. Para estimativa do coeficiente de permeabilidade recomenda-se o emprego do procedimento convencional de saturação do elemento poroso com água e glicerina, fazendo-se o pré-furo até atingir o nível d'água.

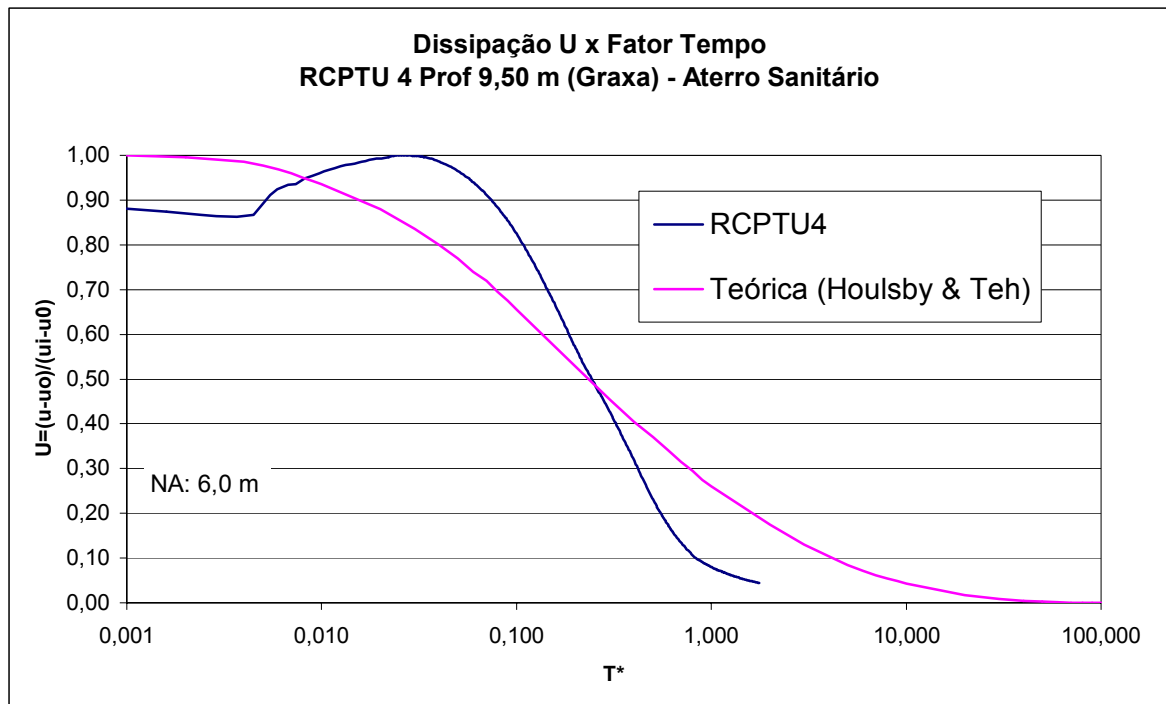


Figura 5.20 Curva de dissipação de poro-pressão ajustada para o ensaio RCPTU 4, realizado no aterro de Bauru, com filtro de poroso saturado com graxa, e curva teórica proposta por Houlsby & Teh (1988).

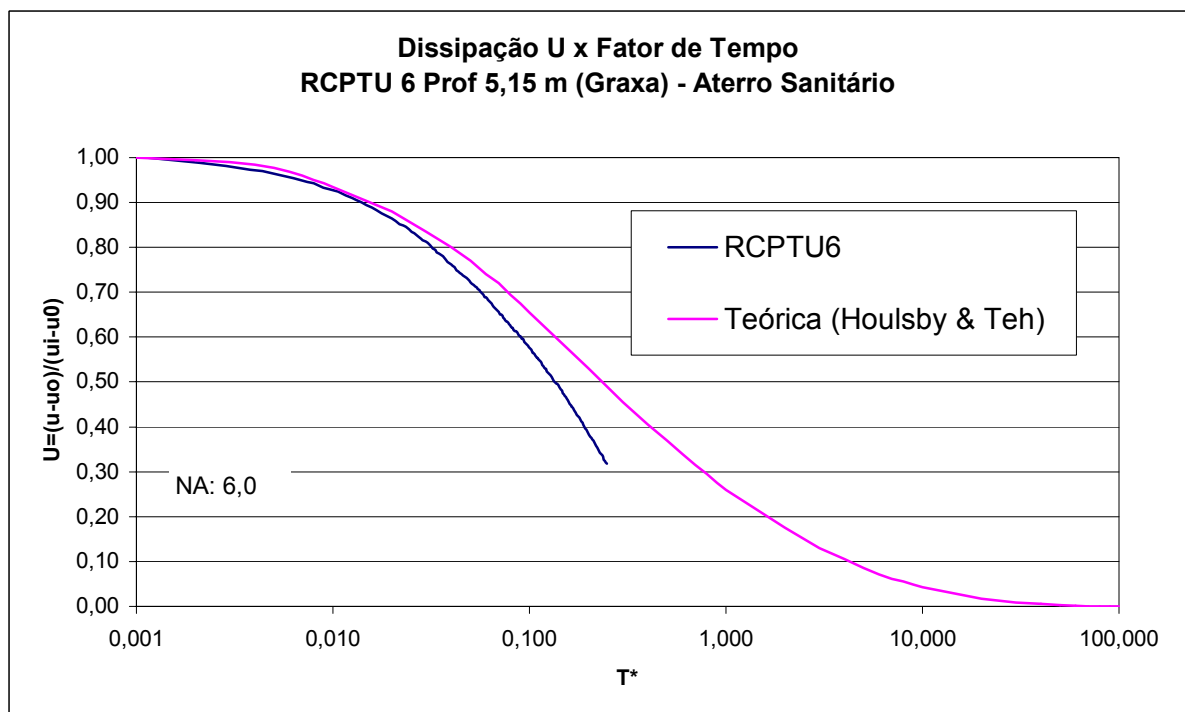


Figura 5.21: Curva de dissipação de poro-pressão ajustada para o ensaio RCPTU 6, realizado no aterro de Bauru, com o elemento poroso saturado com graxa, e curva teórica proposta por Houlsby & Teh (1988).

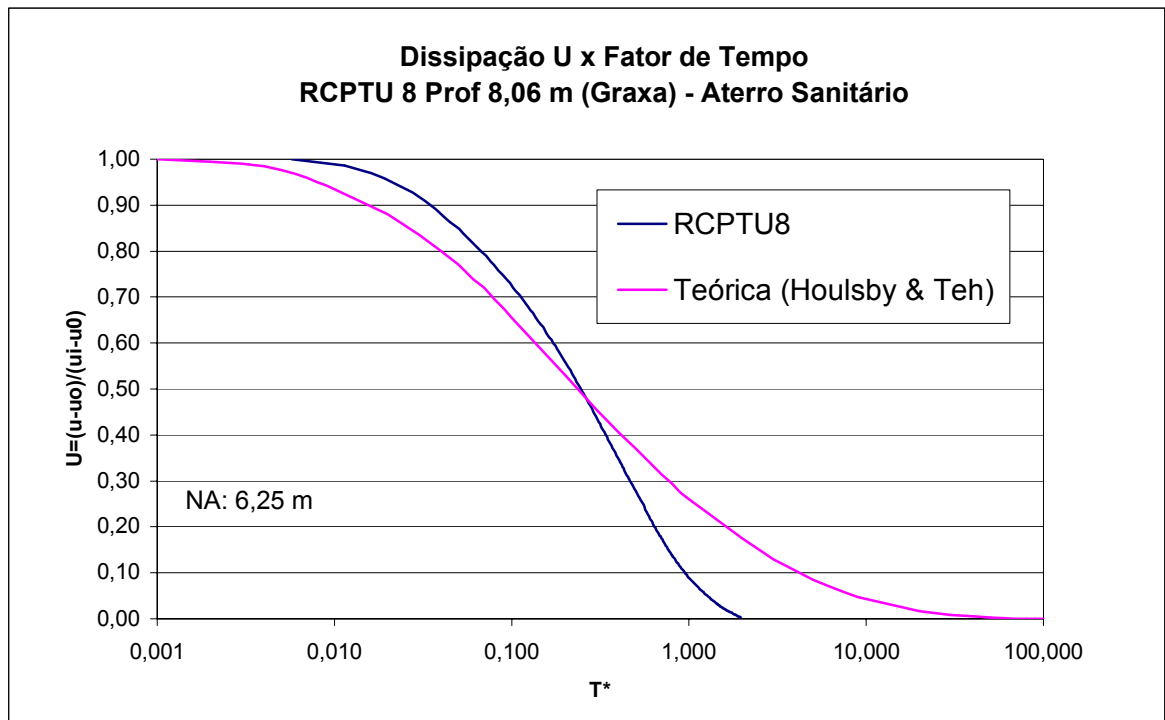


Figura 5.22 Curva de dissipação de poro-pressão ajustada para o ensaio RCPTU 8, realizado no aterro de Bauru, com o elemento poroso saturado com graxa, e curva teórica proposta por Houlsby & Teh (1988).

5.3.2.3 Amostras de solo e água

a. Ensaio de Caracterização Geotécnica

Durante a realização dos ensaios RCPTU foram coletadas amostras de solo com um amostrador direct-push, em 2 locais, para fins de caracterização geotécnica (RCPTU 13 e RCPTU15). Os resultados destes ensaios encontram-se na Tabela 5.6 e na Tabela 5.9.

Nos resultados do ensaio RCPTU 13 (Figura 5.23), pode se observar uma região de baixa resistividade (ou alta condutividade), entre as profundidades 6,5 m e 10,0 m, que indica a possível presença de material argiloso nesta camada. A baixa resistência de ponta (q_c) nesta camada, indica uma possível ocorrência de um solo orgânico. O material coletado na profundidade 8,0 m, identificou a presença de um solo com 22% de argila e 30% de silte, $LL=37\%$ e $IP=11\%$, Tabela 5.8, e com CTC de solos típicos do grupo das ilita ativa (Tabela 5.9), abaixo do nível d'água (7,5 m). O alto teor de argila e o CTC típico de ilita ativa, pode ter influenciado nos valores com o RCPTU.

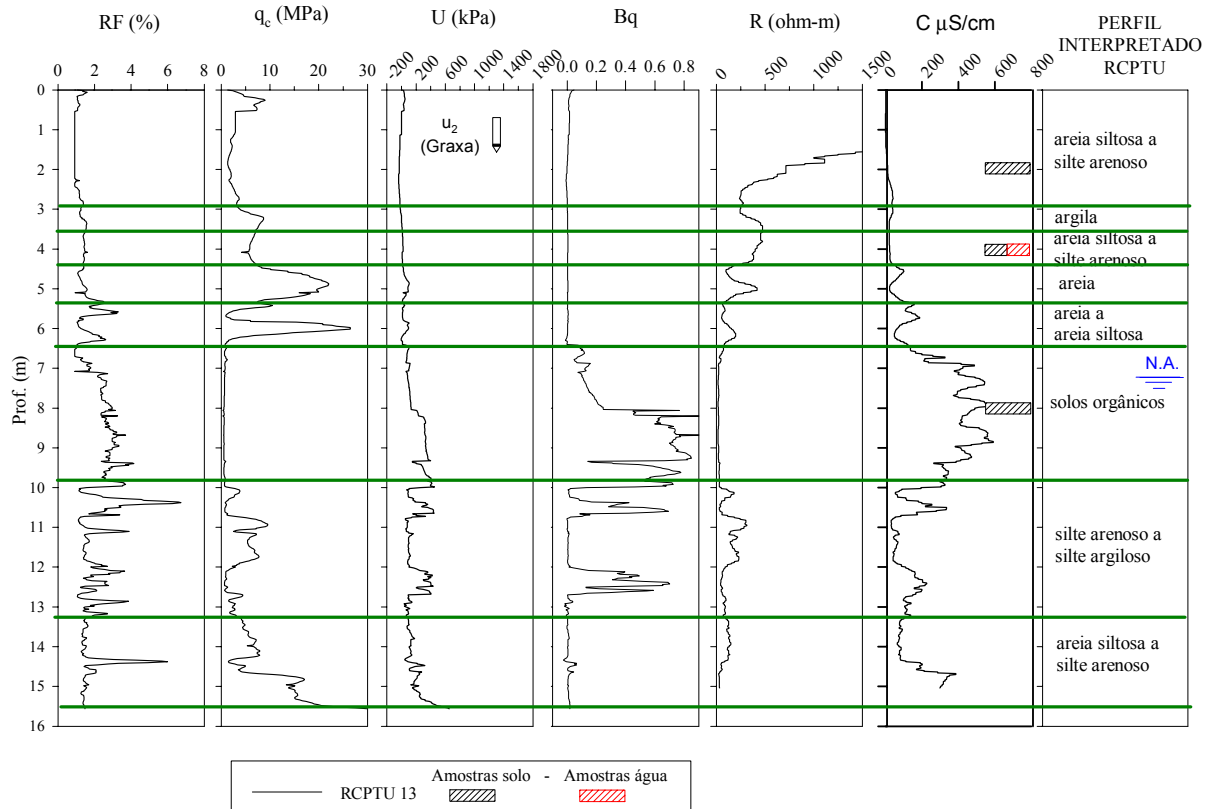


Figura 5.23 Resultados do ensaio RCPTU 13 executado no aterro de Bauru e pontos de coleta de água e solo

No ensaio RCPTU 15 (Figura 5.24), localizado a jusante do aterro, em região onde foi constatada uma possível pluma de contaminação, também pode-se observar uma razoável concordância entre os valores de resistividade e o perfil interpretado. Abaixo da profundidade 4,5 m, onde os ensaios de caracterização identificaram uma areia fina argilosa, com 8% de argila, com um CTC típico de solos do grupo das montmorilonitas, os valores de resistividade diminuíram (e de condutividade aumentaram). Ainda abaixo dessa região, nas profundidades entre 4,5 m e 5 m, tem-se um “pico” no valor de condutividade, em concordância com um alto valor de resistência lateral e uma baixa resistência de ponta neste local, mostram a presença de uma camada argilosa, situação essa que volta a se repetir na profundidade de 8.0 m.

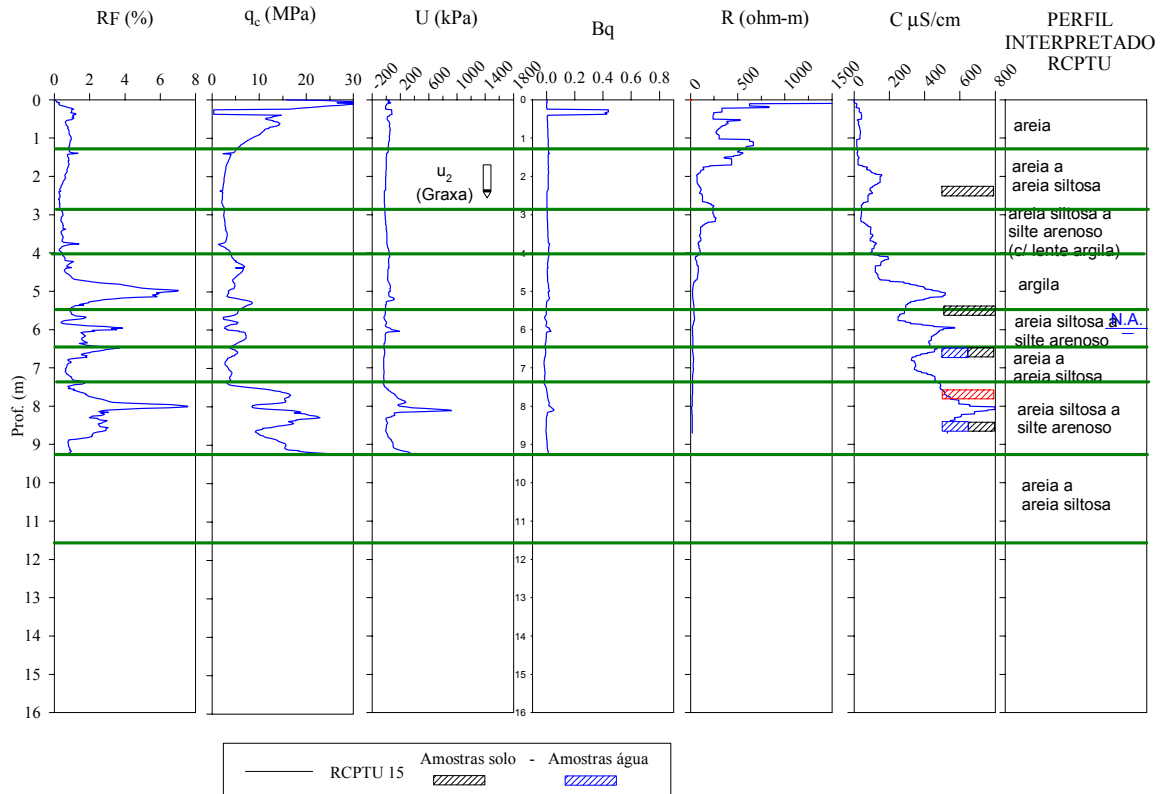


Figura 5.24 Resultados do ensaio RCPTU 15 executado no aterro de Bauru e pontos de coleta de água e solo

Observa-se, do exposto, uma boa concordância entre os valores de resistividade e as mudanças na textura dos solos ao longo dos perfis. Apesar do número reduzido de informações observa-se a tendência de que, dependendo do argilo-mineral presente no solo, os valores de resistividade também podem variar. Especialmente para solos tropicais, os resultados obtidos mostram que não se deve, a priori, correlacionar os valores de resistividade diretamente com tipo de solo que ocorrem em um perfil geotécnico, pois valores outros, como a condição parcialmente saturada, também afetam esses valores. Assim, no atual estágio de conhecimento, uma correta interpretação dos ensaios RCPTU deve ser feita amostrando-se solos com amostradores apropriados. Este é um assunto complexo que só poderá ser estudado de forma adequada a partir de estudos realizados em laboratório, em que seja possível um maior controle das diversas variáveis.

5.4 Litoral do Paraná

5.4.1 Resultados

5.4.1.1 Ensaios Elétricos de Superfície

O levantamento de geofísica de superfície com métodos elétricos foi elaborado pelo Laboratório de Pesquisa e Geofísica Aplicada (LPGA-UFPR), sendo denominado imageamento elétrico 2-D, como subsídio para identificação da pluma de água salobra e orientação na locação de novos poços. O levantamento abrange a determinação da resistividade aparente do solo e a determinação da constante dielétrica (De Mio, 2003). Os dados foram processados pelo software Zonge 2-D. Os dados geofísicos de superfície, aqui utilizados, foram obtidos ao longo de quatro linhas, com distância e espaçamento indicados, denominadas L1(D=550 m, a=50m), L2(D=250 m, e=25 m), L3(D=225 m, e=25m), L4(D=100m, e=25m) e L5(D=130m,e=25m) (De Mio, 2003). Os resultados finais deste levantamento são apresentados na forma de perfis de isovalores dos resultados dos modelos de profundidade obtidos da inversão da resistividade, como nos exemplos mostrados na Figura 5.25 e Figura 5.26, linhas estas em que, posteriormente, foram executados os ensaios de RCPTU, com base nestes resultados de Geofísica.

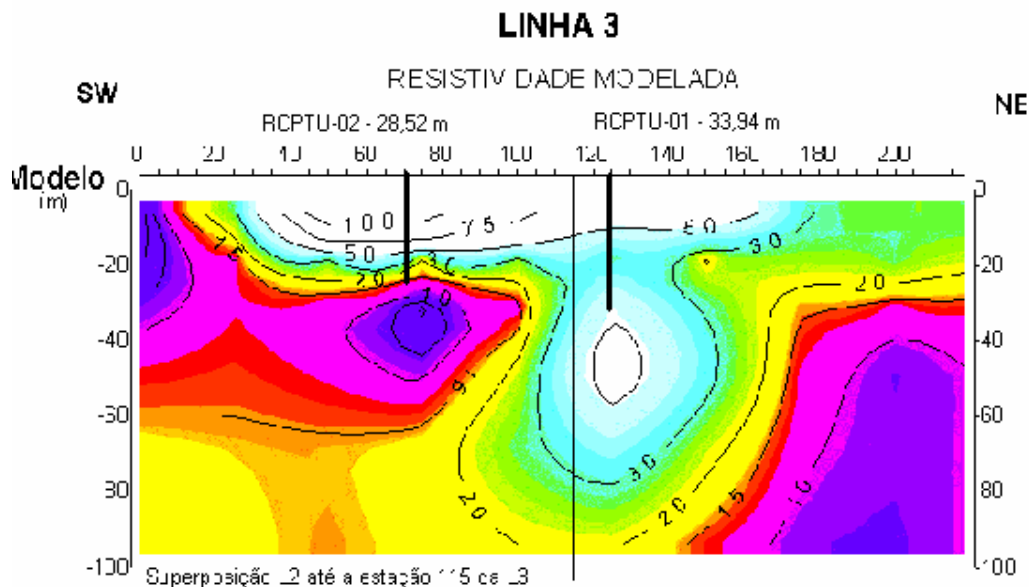


Figura 5.25 Resistividade modelada na L-3, com indicação dos ensaios do RCPTU 1 e RCPTU 2 executados no litoral do Paraná.

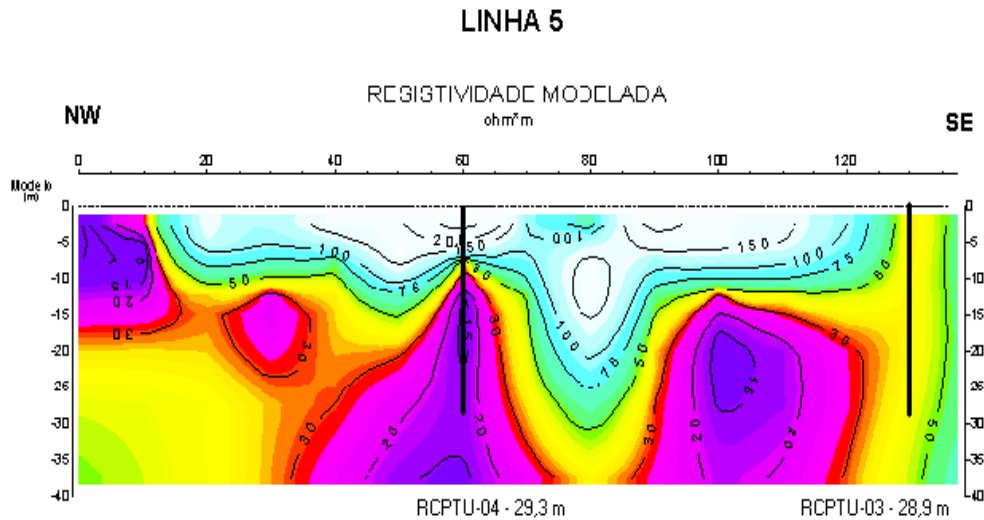


Figura 5.26 Resistividade modelada na L-5, com indicação dos ensaios do RCPTU 3 e RCPTU 4 executados no litoral do Paraná

5.4.1.2 Piezocone de Resistividade

Neste item serão apresentados os resultados dos ensaios de piezocone de resistividade realizados em Paranaguá, litoral do Paraná, totalizando quatro ensaios realizados neste local (Figura 5.27 a Figura 5.30). A interpretação do perfil geotécnico, com base no ábaco de Robertson et al. (1986), está também sendo apresentado, ao lado desses resultados obtidos.

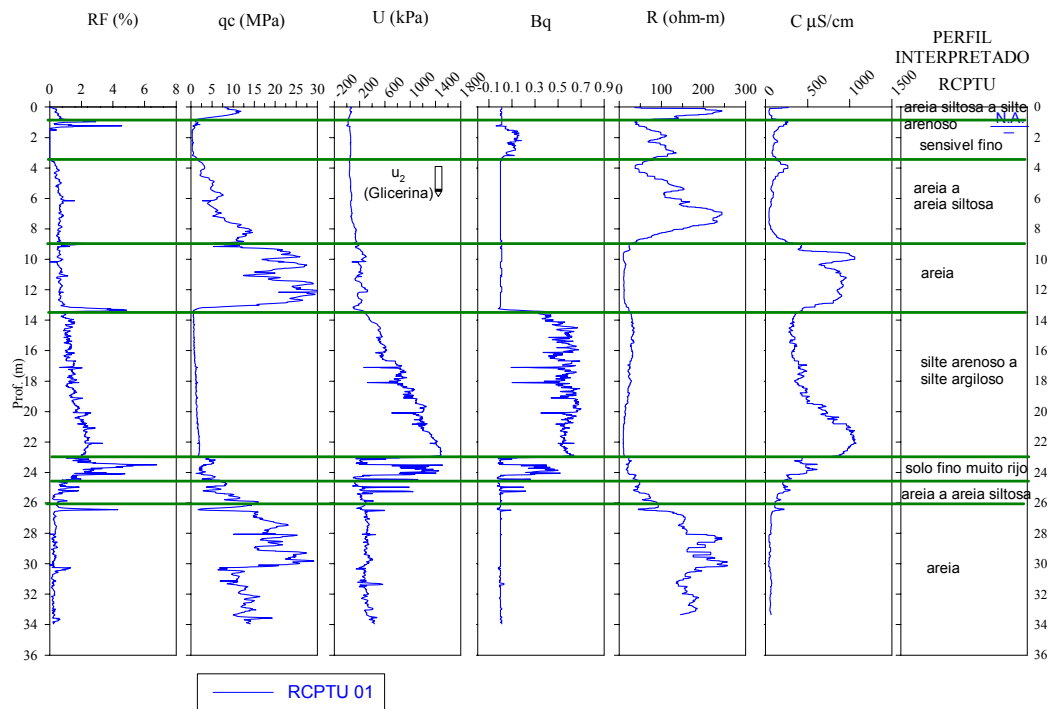


Figura 5.27 Resultados do ensaio RCPTU 1 realizado no litoral do Paraná.

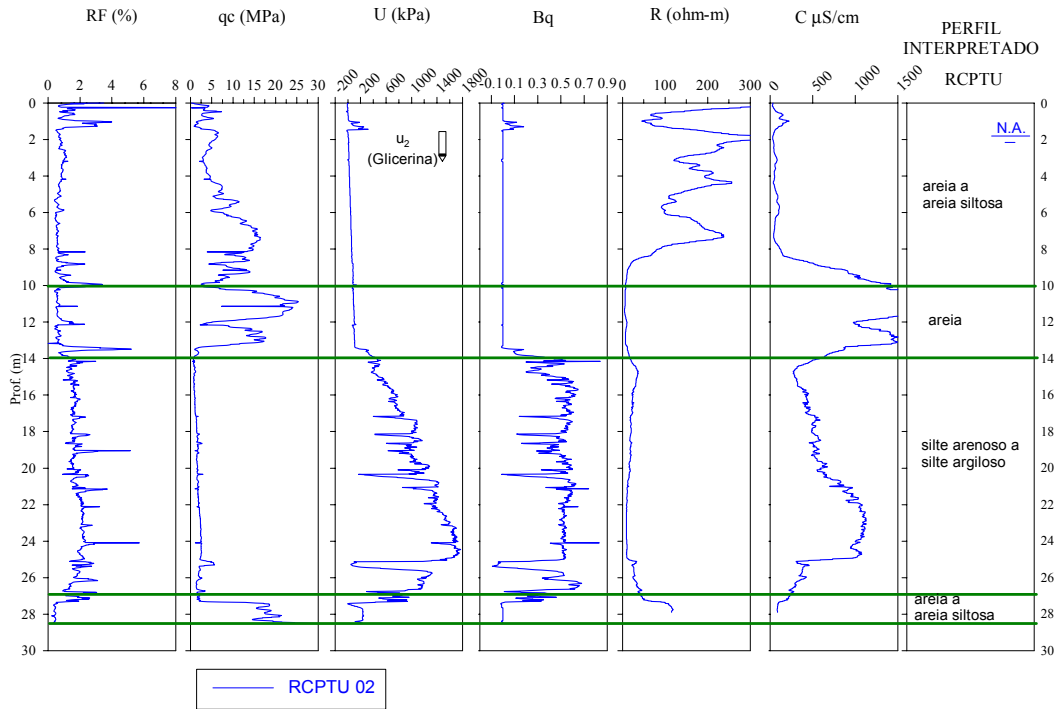


Figura 5.28 Resultados do ensaio RCPTU 2 realizado no litoral do Paraná.

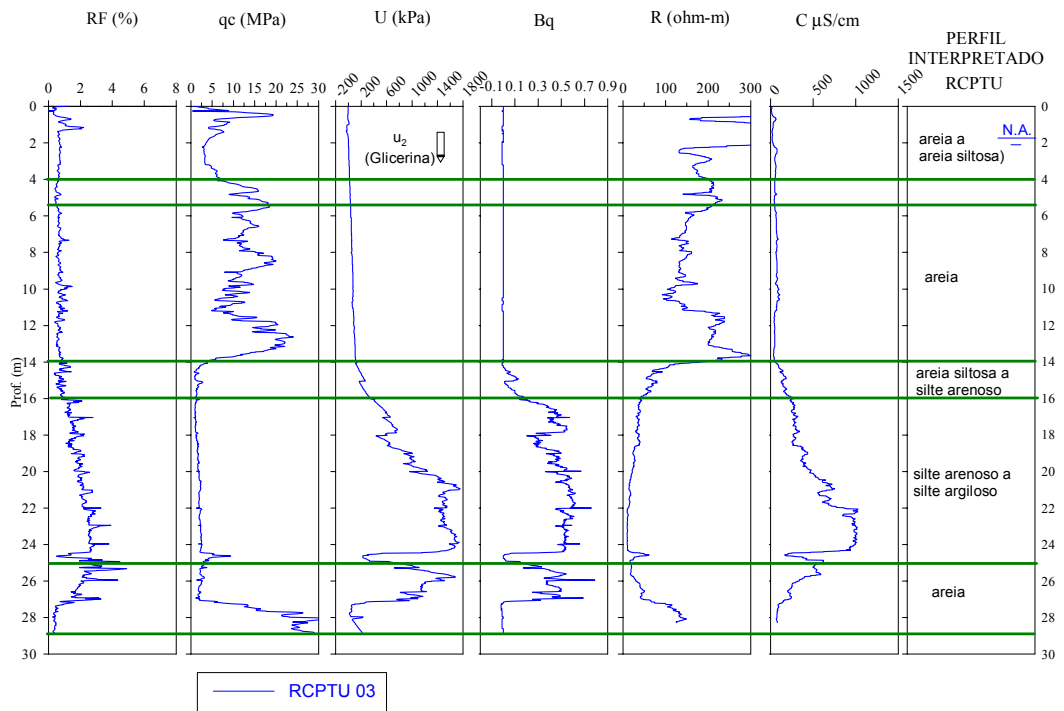


Figura 5.29 Resultados do ensaio RCPTU 3 realizado no litoral do Paraná.

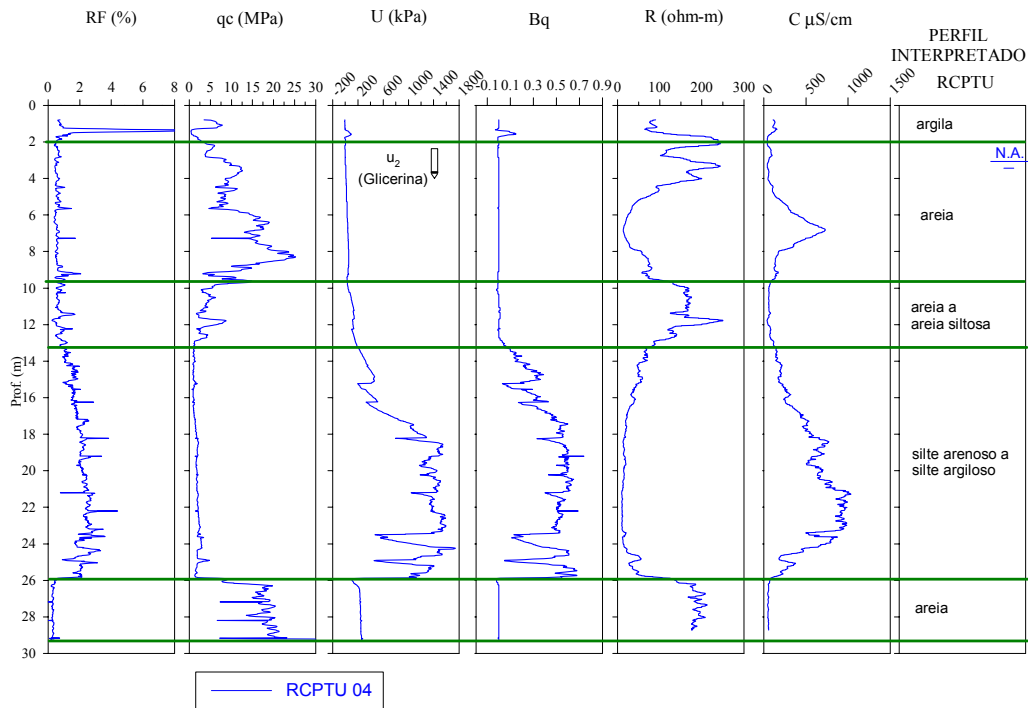


Figura 5.30 Resultados do ensaio RCPTU 4 realizado no litoral do Paraná.

5.4.2 Análise dos Resultados

Quatro ensaios RCPTU foram realizados no litoral do Paraná com o objetivo de avaliar a aplicabilidade dessa técnica em perfis de solo sedimentares saturados, solos estes semelhantes àqueles que ocorrem em países de clima temperado. Além disso, com esses resultados, procurou-se complementar a campanha de eletrorresistividade de superfície executada neste local, a fim de confirmar os aspectos observados e esclarecer algumas dúvidas levantadas por essa campanha de eletrorresistividade de superfície.

5.4.2.1 Eletrorresistividade de superfície

Os resultados dos ensaios de eletrorresistividade de superfície possibilitaram definição dos pontos em que os ensaios de RCPTU deveriam ser realizados no litoral do Paraná (Figura 4.7). Com base na interpretação dos resultados dos perfis de caminhamento elétrico foram programados os ensaios com piezocone de resistividade. Os ensaios RCPTU 1 e RCPTU 2 foram executados sobre a linha geofísica L-3 (Figura 5.25), sendo cada um posicionado em um tipo de resposta dos resultados do caminhamento elétrico. O RCPTU 1 foi locado na posição 125 m, com resistividade entre 30 e 60 ohm.m. O RCPTU-02 foi locado na posição 70 m, indicada nos perfis de superfície com resistividade na faixa de 10 a 100 ohm m, crescente em profundidade. Sobre a linha L-5 foram executados os ensaios RCPTU 3, na

posição 130 m e RCPTU 4 na posição 60 m. O local do RCPTU 4 (Figura 5.26) indica uma resistividade relativamente homogênea, na vertical, com valores de 30 a 50 ohm.m. Na posição do RCPTU 4 a resistividade começa com valores elevados (100 a 200 ohm.m), com transição marcante nesta profundidade passando a resistividades mais baixas, de 20 a 30 ohm.m até 35-40 m de profundidade (De Mio, 2003).

A resistividade modelada para a linha L-3 indica uma interface na profundidade de 20 m, separando terrenos mais resistivos em superfície, de terrenos mais condutores em profundidade. Esta interface deve representar o contato água doce/água salobra, que tende a aflorar em direção aos poços P-07 e P-08. (De Mio, 2003)

5.4.2.2 Piezocone de Resistividade

Os resultados dos ensaios RCPTU executados no litoral do Paraná serão discutidos neste item. Eles serão discutidos em 3 itens: identificação do perfil geotécnico, identificação do nível d'água e valores de resistividade.

a. Identificação do perfil geotécnico

A realização da campanha de ensaios RCPTU permite obter dois tipos distintos de informações úteis para as avaliações dos solos. A primeira de cunho eminentemente estratigráfico, utiliza a razão de atrito (R_f) e de resistência de ponta (q_c) que fornece indicações sobre o comportamento do solo, utilizando-se do ábaco de Robertson et al. (1986). No local estudado, a interpretação desses resultados indica que o perfil é caracterizado por intercalação de pacotes de areia e argila/silte segundo os resultados dos ensaios RCPTU interpretadas a partir do ábaco citado. Ao atravessar as diferentes camadas, as variações das medidas de R_f e q_c apresentaram valores típicos daqueles citados na literatura, ou seja, em camadas mais arenosas valores altos de q_c e relativamente baixos para R_f , sendo que nas camadas argilosas ocorre o inverso. Na Figura 5.31, até a profundidade de 14 m aproximadamente, o aumento progressivo nos valores de q_c , um indicativo de aumento na granulometria desta camada. Ao penetrar uma camada de material mais fino (identificado pelo ábaco de Robertson et al. (1986) como de silte argiloso) os valores de q_c sofrem uma diminuição, acompanhada, nesta camada, por um aumento nos valores de R_f . A cerca de 23 m de profundidade os valores de q_c voltam a subir, o ábaco identifica um material silto arenoso e, ao final do ensaio, com o aumento dos valores de q_c e diminuição de R_f , identifica-se, pelo ábaco, uma camada de areia. Como descrito acima, os resultados dos ensaios de piezocone, nestes solos sedimentares, identificaram camadas de solos mais arenosos ou argilosos,

permitindo uma melhor definição de seu perfil geotécnico a partir do ábaco de Robertson et al. (1986), fato que não foi tão evidente na área do aterro de Bauru

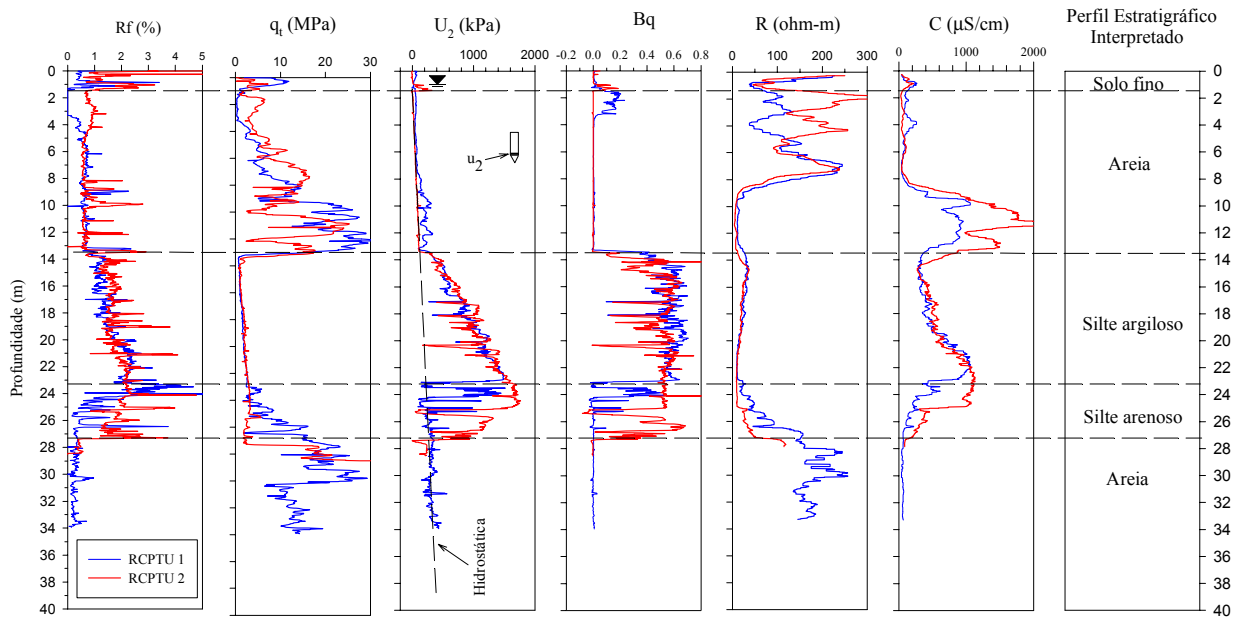


Figura 5.31 Resultados dos ensaios RCPTU 1 e RCPTU 2 executados no litoral do Paraná

b. Posição do nível d'água

No litoral do Paraná, onde a posição do nível d'água está bem próxima à superfície, os registros de poro-pressão com o piezo-elemento saturado com glicerina são muito úteis para a interpretação do perfil e mais fácil de ser realizado (Figura 5.32). Nas camadas mais arenosas observa-se que não há o registro de excesso de poro-pressão, sendo que quando o piezocone atravessa camadas de material mais fino o aumento dos valores de excesso de poro-pressão são medidos pelo aparelho. Os valores de resistividade auxiliam na identificação dessa posição, em que valores acima de 200 ohm.m são verificados no primeiro metro do ensaio, ficando próximo ou abaixo de 200 ohm.m, abaixo do nível d'água.

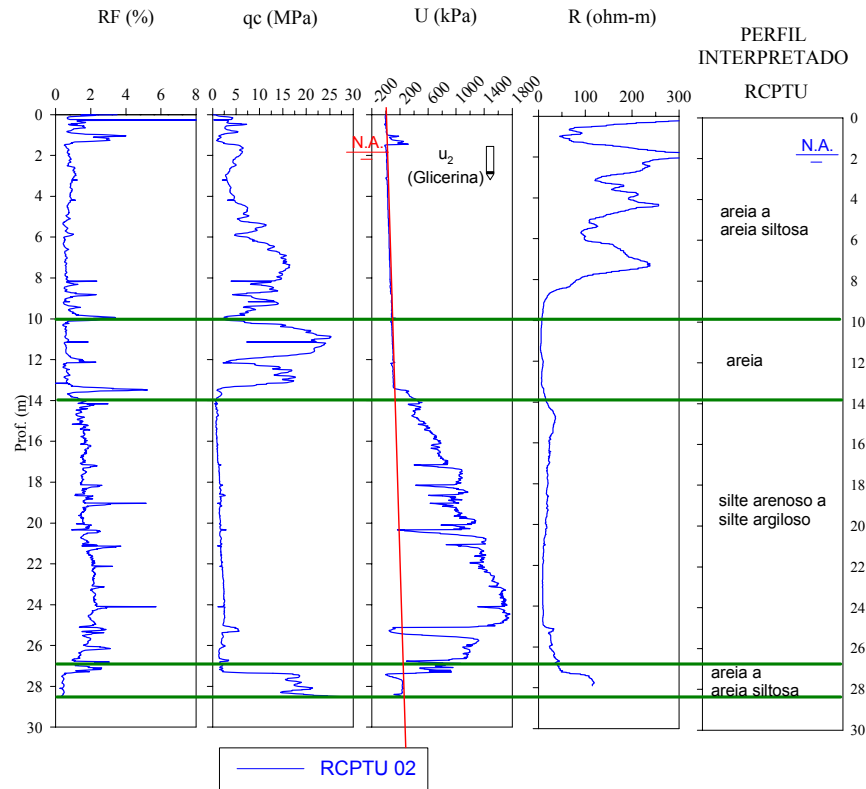


Figura 5.32 Identificação da posição do nível d'água no litoral do Paraná a partir do registro do excesso de poro-pressão e com a utilização do dispositivo de medida de resistividade

c. Resistividade

A interpretação dos resultados do ensaio RCPTU-01 (Figura 5.31) mostra que no trecho entre 9 a 13 m, onde ocorre um solo arenoso, a resistividade variou entre 12 e 16 ohm.m, que é indicativo de região contaminada por água salobra uma vez que, segunda Davies & Camapanella (1995) um valor típico de resistividade em areia não contaminada em zona saturada seria da ordem de 100 ohm.m. Uma camada de areia semelhante a essa, identificada pelos resultados de q_c e R_f no trecho 25 a 37 m, apresentou valores elevados de resistividade, da ordem de 250 ohm.m a 200 ohm.m, o que é indicativo da presença nesse local de água doce. Campanella & Weemees (1990) indicam resistividade da água doce menores que 40 ohm.m e valores entre 1 e 13 ohm.m para água salobra. Também no ensaio RCPTU-02 (Figura 5.32), o solo arenoso que ocorre entre 9 e 14 m de profundidade e que apresentou uma resistividade de até 5 ohm.m também pode ser considerada uma região do aquífero contaminada com água salobra. Já os ensaios RCPTU-03 e RCPTU-04 (Figura 5.33) praticamente não indicam presença de água salgada na camada de areia superficial, exceção

para o trecho entre 3,0 e 4,0 m do ensaio RCPTU-04 que registrou valores de resistividade inferiores a 40 ohm.m, também indicativo da presença de sal na água nessa região específica desse ensaio.

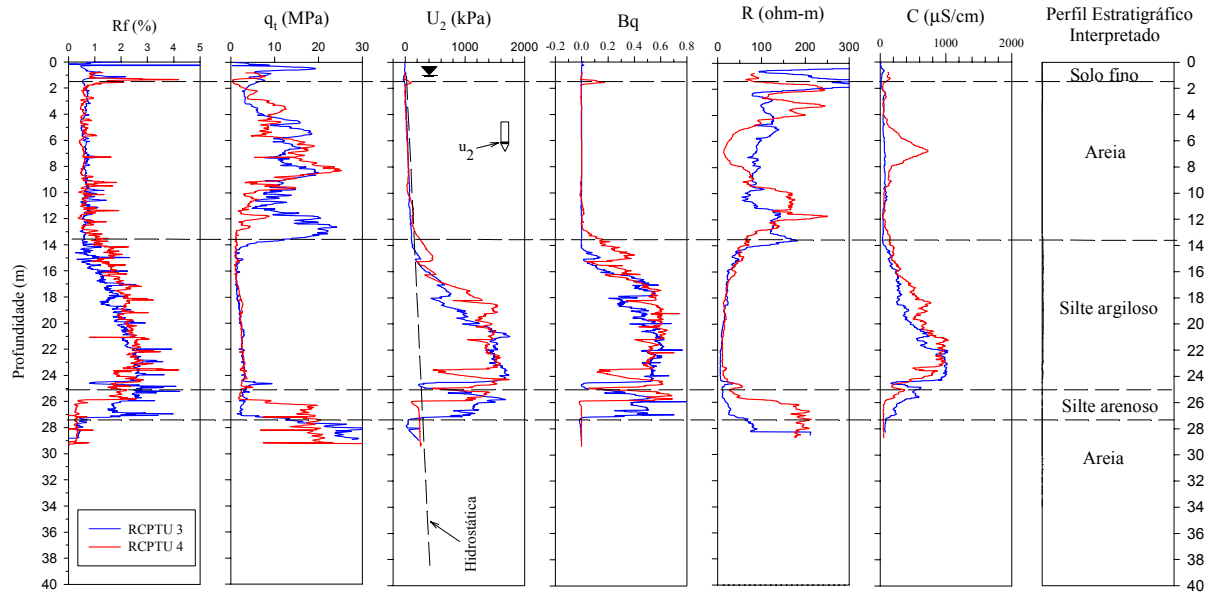


Figura 5.33 Resultados dos ensaios RCPTU 3 e RCPTU 4 executados no litoral do Paraná

Os valores de resistividade aqui determinado nos ensaios RCPTU mostram o grande potencial de utilização dessa ferramenta, tanto para a identificação das camadas do subsolo como para a avaliação da presença de cloretos na água, permitindo a definição das profundidades afetadas e auxiliando na determinação de pontos de amostragem de água e solo, informações extremamente importantes em uma investigação ambiental. A Figura 5.34 mostra um perfil representativo do local com base nas informações do RCPTU acima descritas. Observa-se a cunha de água salgada que penetra pelo material mais arenoso da seção investigada. Os valores de resistividade (ou o seu inverso, a condutividade) são indicativos da sua presença. Os valores altos de q_c , típicos para materiais mais arenosos, coincidem com o ponto de condutividade mais alta, que seria esperado para materiais mais argilosos, informações que se complementam para dar suporte a identificação dos pontos contaminados pela pluma de água salina. Observa-se, ainda na Figura 5.34, que nas camadas de solo mais finos, os valores de condutividade, são mais baixos que os observado nas areias contaminadas pela água salgada. Os baixos valores de q_c , típicos de materiais argilosos, permitem identificar essas camadas, que funcionam como se fossem um *liner*. A identificação de tais camadas também é de muita utilidade numa investigação geoambiental pois possibilita

identificar o caminhamento da pluma de contaminação, a definição de pontos mais críticos e como poderá se dar a atenuação dessa contaminação no solo.

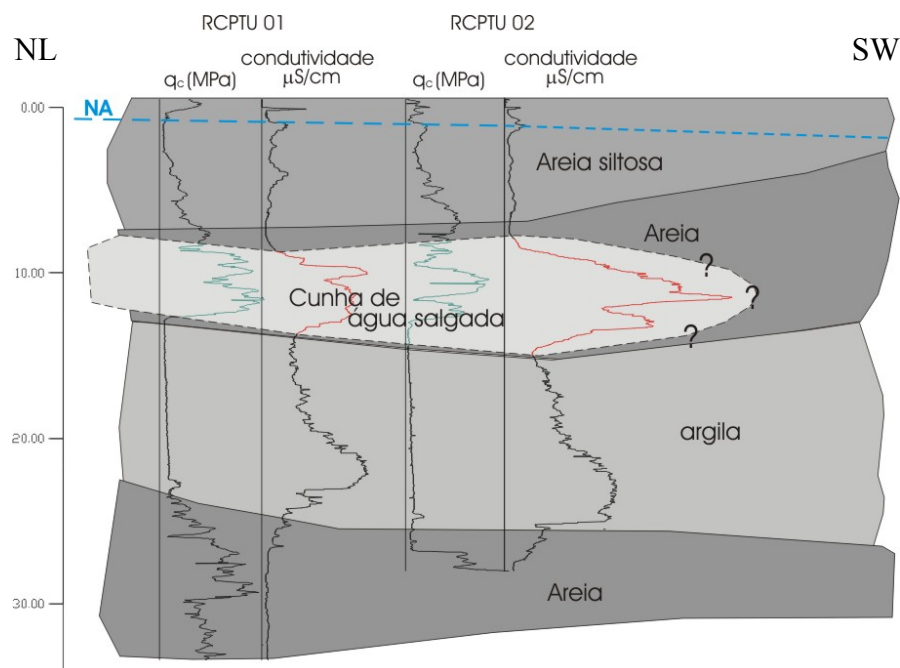


Figura 5.34 Perfil interpretado com base nos resultados dos ensaios RCPTU 01 e RCPTU 02 executados no litoral do Paraná

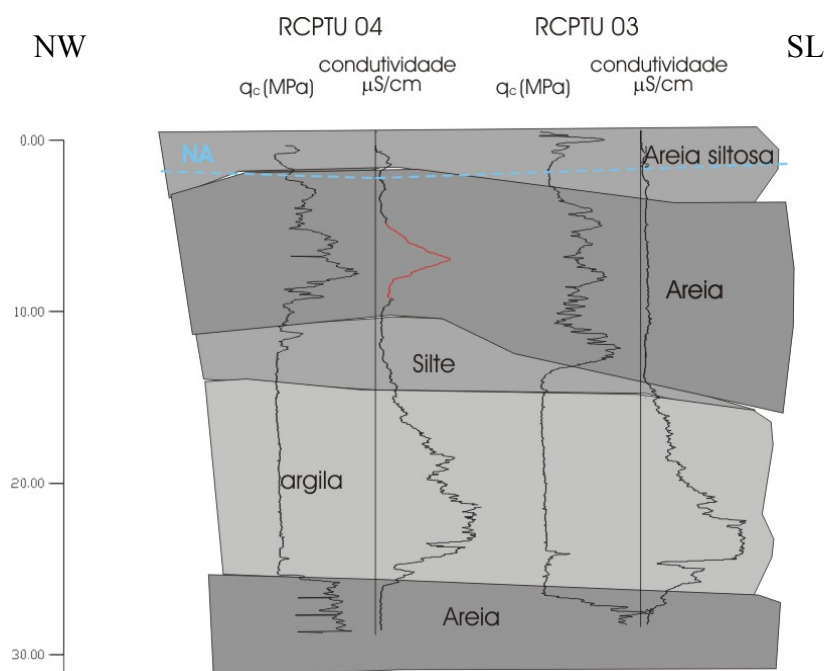


Figura 5.35 Perfil interpretado com base nos resultados dos ensaios RCPTU 03 e RCPTU 04 executados no litoral do Paraná

Informações pouco precisas obtidas junto a funcionários das empresas que trabalham no local (de Mio, 2003) indicam que poços existentes na área, perfurados a mais de 20 anos,

tanto rasos como profundos, tinham água de boa qualidade que vem se tornando salobras, fato que vem se agravando no transcorrer dos anos. O monitoramento dos teores de sais, ao longo dos anos, indica um valor crescente, permanecendo aproveitáveis apenas os poços P2 a P6, sendo os demais (P1; P7; P8) tem sua utilização limitada devido aos altos teores de sais presentes. Com bases nos resultados e na localização dos ensaios RCPTU e nas informações acima, é apresentado, na Figura 5.36, uma representação esquemática em planta do limite da intrusão de água salina que ocorre no aquífero sedimentar.

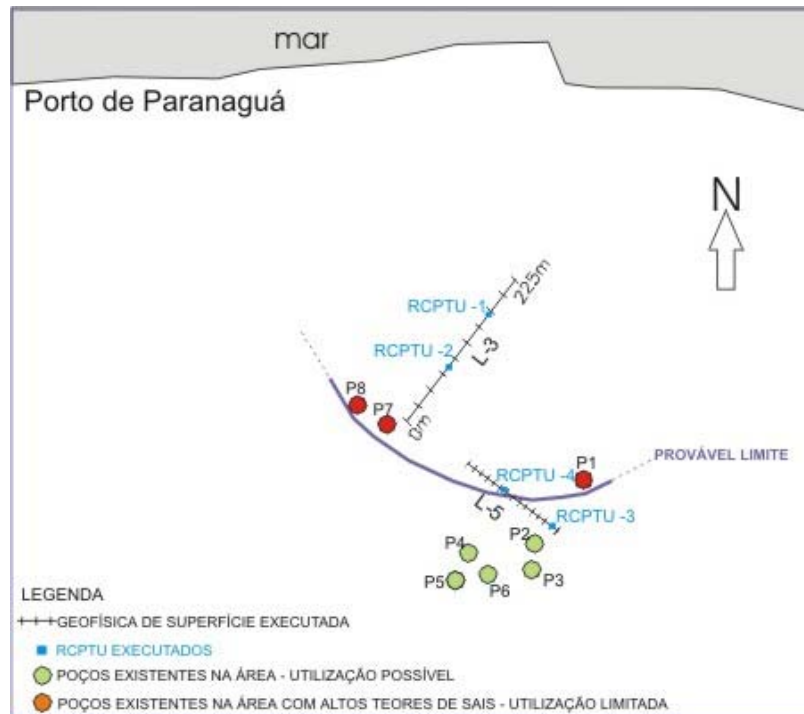


Figura 5.36 Representação esquemática do provável limite de intrusão de água salina no litoral do Paraná, com base nos resultados dos ensaios RCPTU, informações locais e teor de sais dos poços de monitoramento

5.5 Campo Experimental do IAG da USP

5.5.1 Resultados

5.5.1.1 Piezocone de resistividade

Neste item serão apresentados os resultados dos ensaios de piezocone de resistividade executados no Campo Experimental do IAG da USP, em São Paulo. Foram executados um total de 5 ensaios (Figura 5.37 a Figura 5.41), sendo que o RCPTU 5 foi repetido e por isso identificado por 5 e 5a, devido a problemas que obrigou a sua interrupção, ficando distantes 1,0 m entre si. Nos ensaios RCPTU 2 e RCPTU 3 foram executados,

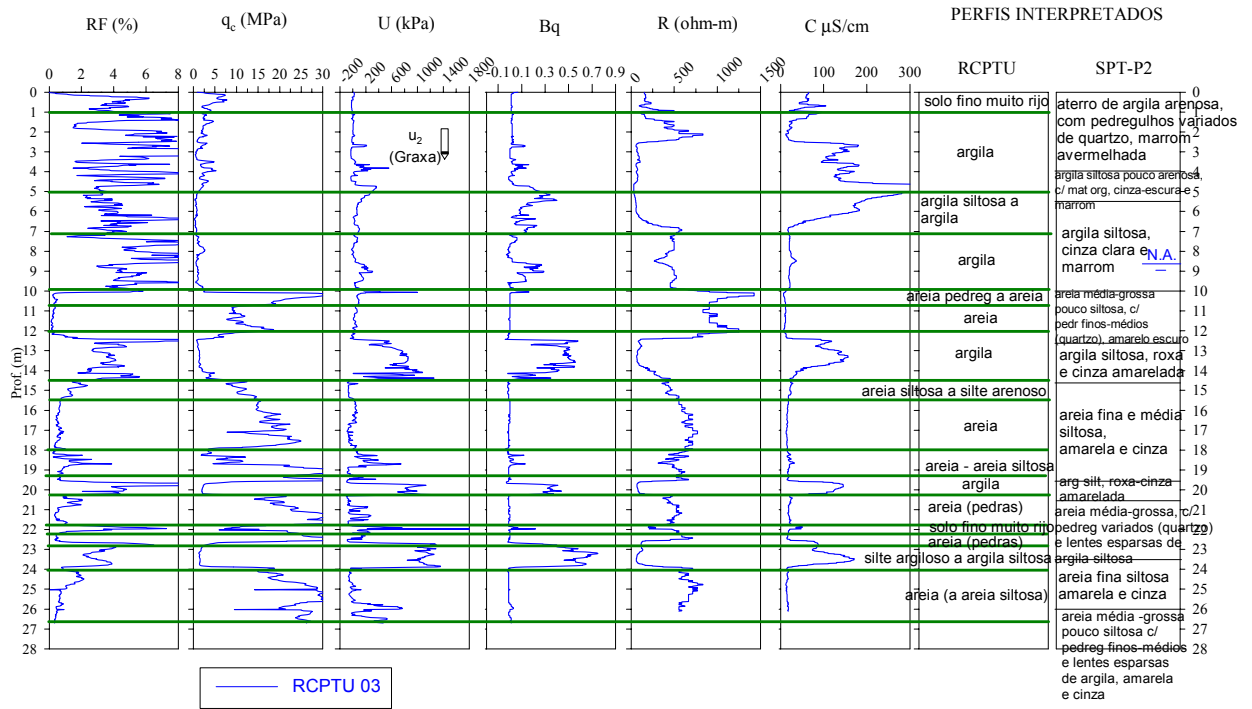


Figura 5.39 Resultados do ensaio RCPTU 03 realizado no campo experimental do IAG-USP

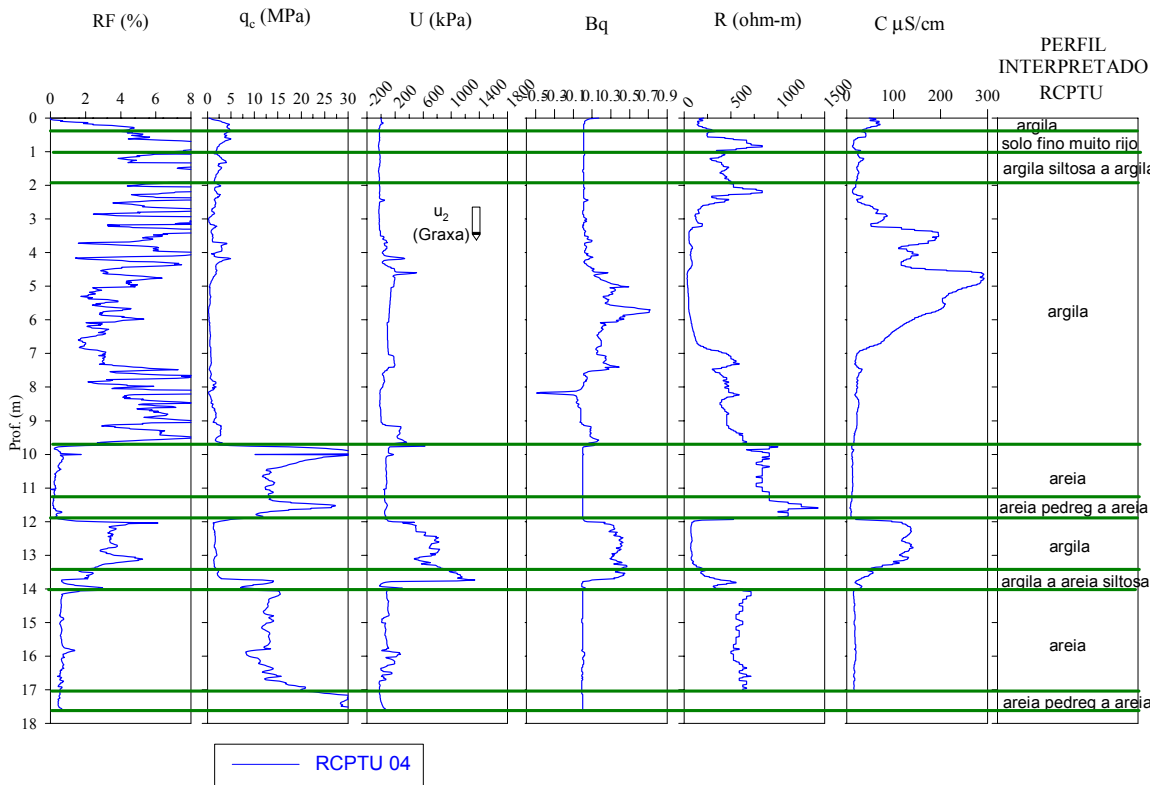


Figura 5.40 Resultados do ensaio RCPTU 04 realizado no campo experimental do IAG-USP

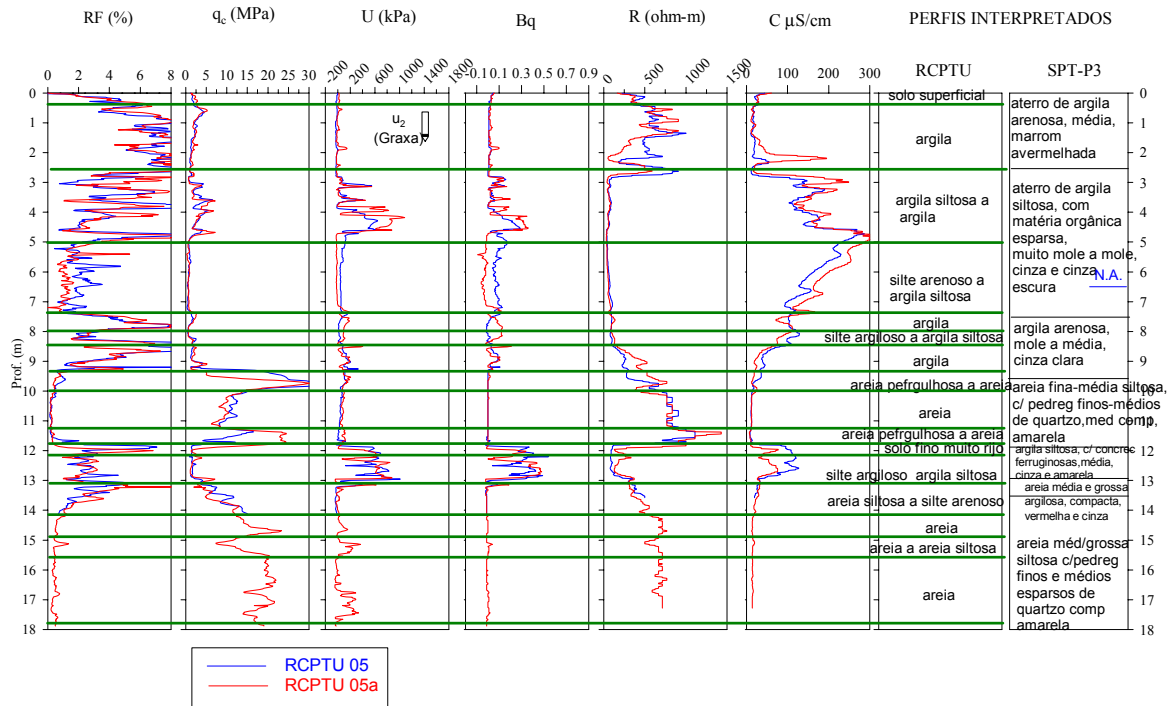


Figura 5.41 Resultados dos ensaios RCPTU 05 e 05a realizados no campo experimental do IAG-USP

5.5.1.2 Dissipação de Poro-Pressão

Neste item serão apresentados os resultados obtidos com a dissipação do excesso de poro-pressões executadas nos ensaios RCPTU 2 e RCPTU 3. Utilizou-se glicerina (RCPTU 2) e graxa (RCPTU 3) para realização desses ensaios. Os ensaios foram executados em camadas de mesmo material, no caso, argila, assim identificadas durante a própria realização dos ensaios RCPTU na área. Esses ensaios ficaram distantes 6,0 m entre si, como pode se observar na Figura 4.11. Os resultados das dissipações para estes ensaios estão na Figura 5.42 e Figura 5.43, e os coeficientes de permeabilidade calculados com base nesses resultados encontra-se na Tabela 5.10 abaixo.

Tabela 5.10: Cálculo do coeficiente de permeabilidade com base nos resultados dos ensaios de dissipação do excesso de poro-pressão nos ensaios RCPTU 2 e RCPTU 3, executados em camadas argilosas, no IAG -USP.

| RCPTU | Prof (m) | Ch (m ² /s) | α | qc (bar) | m | k (cm/s) |
|-------|----------|------------------------|----------|----------|-------|----------|
| 2 | 14,4 | 9,141E-06 | 3 | 49,6 | 148,8 | 6,0E-05 |
| 3 | 13,83 | 8,739E-07 | 3 | 13,1 | 39,3 | 2,1E-05 |

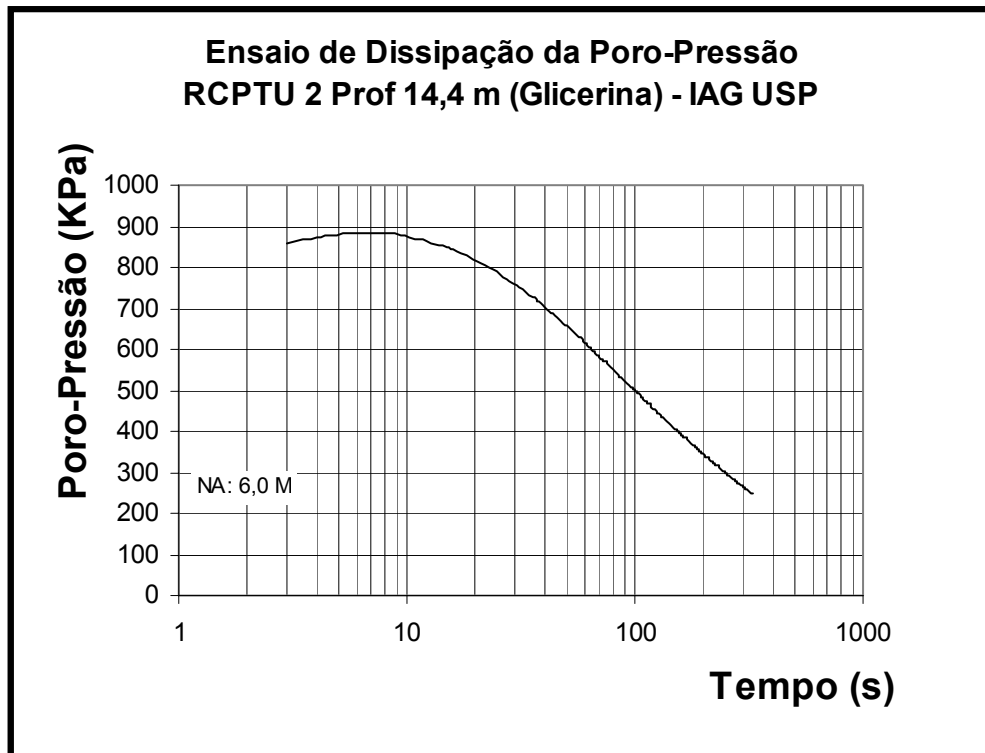


Figura 5.42: Resultado da dissipação do excesso de poro-pressão no ensaio RCPTU 2 realizado no campo experimental do IAG-USP, em camada de argila.

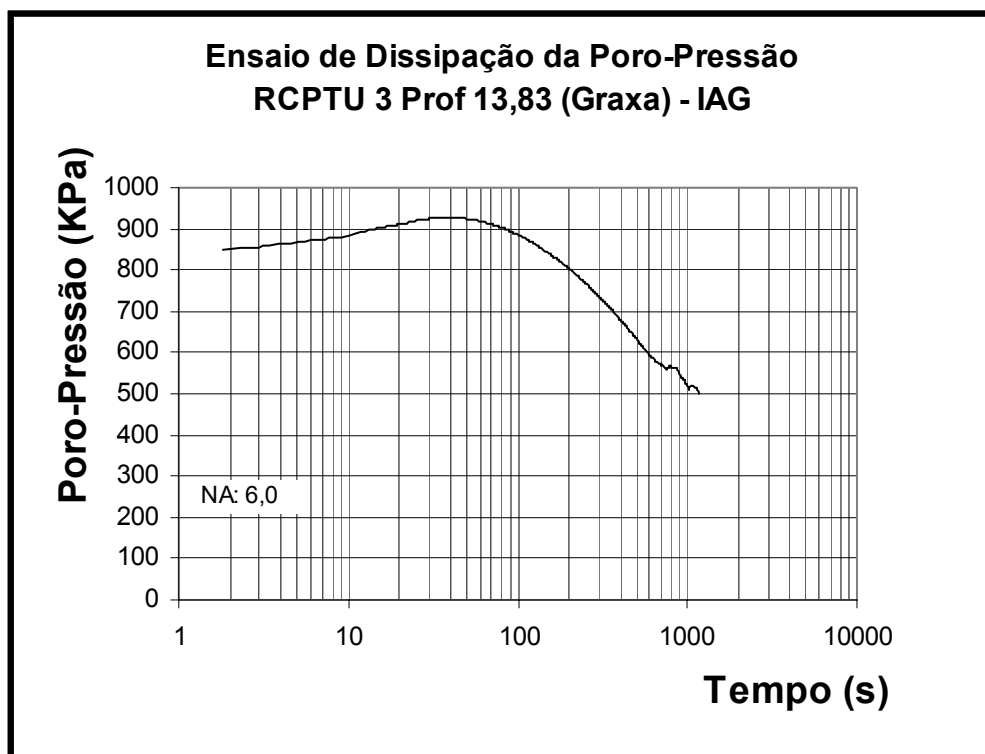


Figura 5.43: Resultado da dissipação do excesso de poro-pressão no ensaio RCPTU 3 realizado no campo experimental do IAG-USP, em camada de argila.

5.5.2 Análise dos Resultados

5.5.2.1 Piezocone de Resistividade

a. Identificação do Perfil Geotécnico

No ensaio RCPTU 01 (Figura 5.37) a identificação do perfil geotécnico foi praticamente coincidente com os resultados obtidos com base no ensaio SPT-P1. O emprego do ábaco de Robertson et al. (1986), possibilitou identificar praticamente as mesmas camadas encontradas através dos resultados de SPT executados no local, sendo que as alternâncias de camadas de areia e argila praticamente coincidiram. Baixos valores de q_c e elevados valores de R_f identificam uma camada de argila até uma profundidade de aproximadamente 10 m, sendo que a partir deste ponto os valores de q_c aumentam e R_f diminuem, caracterizando uma areia onde é possível observar a presença de pedras e camadas de argila. Observa-se, também, que camadas de pequenas espessuras puderam ser identificadas através dos resultados obtidos com o piezocone, como por exemplo, uma camada de argila entre as profundidades 12 m e 12,5 m. As variações na resistência de ponta q_c e o atrito lateral R_f , foram coerentes com as camadas atravessadas, mostrando a sensibilidade do equipamento para identificar camadas de comportamento distintos: altos valores de q_c para areias e baixos para camadas mais argilosas, sendo que para os valores de R_f , se observa o contrário: baixo para areias e alto para argilas. Observa-se, também, que apesar de identificar camadas de comportamento distintos como descrito acima, a classificação quanto a textura apresenta resultados diferentes em alguns pontos, como por exemplo, na profundidade entre 4,0 m e 10,0 m, classificada como argila siltosa nos resultados dos ensaios SPT, o RCPTU identifica, predominantemente, como argila. Também nos primeiros 3,0 m de profundidade, identificado como argila arenosa pelos resultados do SPT, o RCPTU identificou como argila.

Para os resultados do ensaio RCPTU 02 (Figura 5.38) e RCPTU 5 e RCPTU 5a (Figura 5.41), assim como no ensaio RCPTU 01, também observa-se bons resultados para a identificação das camadas de comportamentos distintos existentes ao longo dos perfis ensaiados quando comparadas aos resultados SPT executados no local, confirmando a habilidade dessa ferramenta para a identificação de camadas de comportamento distintos. O início e o fim das profundidades de cada camada não coincidem entre os resultados dos ensaios RCPTU e SPT em algumas situações, possivelmente devido aos pontos ensaiados serem próximos e a capacidade do RCPTU de identificar camadas mais finas do perfil. Também se observa, nestes ensaios, que a classificação quanto a textura do solo apresenta divergências entre os resultados dos ensaios SPT e RCPTU executadas como, por exemplo,

entre as profundidades 7,0 m e 10,0 m, identificado pelos resultados dos ensaios SPT como argila siltosa os resultados dos ensaios RCPTU identificam como argila; na camada seguinte, entre 10,0 e 12,0 m, identificada como areia pelos resultados dos ensaios RCPTU foi identificada como uma areia média a grossa pouco siltosa pelos resultados dos ensaios SPT. Os resultados desses ensaios vêm corroborar o já pesquisado por Marques (2002), em que a utilização de q_c e R_f interpretados através do ábaco de Robertson et al. (1986) possibilitam a identificação de camadas de comportamento distintos, mesmo finas camadas, em solos tropicais, apesar de não ser possível o seu emprego para uma classificação textural dos solos ensaiados. O ensaio RCPTU 3 (Figura 5.39), em que também foi possível a comparação com resultado do ensaio SPT-P2 executado no local, é possível observar o mesmo que já descrito acima.

b. Resistividade

Nos ensaios RCPTU 05 e 05a (Figura 5.41), em que o ensaio foi executados um ao lado do outro, é possível observar a boa repetibilidade dos resultados de resistividade, fator este importante para a validação dos resultados encontrados e confiabilidade destes (Campanella e Weemees, 1990). Os valores de resistividade, neste ensaio, se mostraram sensíveis às mudanças de camadas investigadas, observando-se valores baixos de resistividade, da ordem de 50 ohm.m, entre as profundidades 3,0 m e 7,0 m e 12,0 m a 13,0 m (aproximadamente), em solo identificado como argila e silte argiloso, respectivamente, valores estes esperados com o encontrado na literatura (Campanella, 1998), sendo que há uma elevação progressiva dos valores de resistividade para as camadas interpretadas como mais arenosas.

Os resultados do ensaio RCPTU 02 (Figura 5.38) mostram os valores de resistividade coerentes com o que se encontra na literatura. Entre as profundidades 12,5 m e 14,0 m valores de resistividade de 50 ohm.m foram obtidos em local que identifica como de argila, aumentado para a camada de areia existente para profundidades acima de 15,0 m. Entre as profundidades 8,0 m e 10,0 m observa-se valores maiores que 300 ohm.m em uma camada identificada como de argila, o que seria também um local para amostragem de solo e água e uma análise laboratorial.

Os resultados do ensaio RCPTU 01 (Figura 5.37) mostram que os valores de resistividade variaram muito na camada não saturada. Valores de baixa condutividade em argilas (entre as profundidades 7 m e 10 m) e alta para areia (entre as profundidades 12 m e 15 m) não eram esperados. Esses locais requerem investigações mais detalhadas para

confirmação desses resultados. Os resultados desse ensaio podem ter sido prejudicado por um acidente que ocorreu no ensaio RCPTU 03, o ensaio mais profundo feito na área, onde na profundidade próxima a 27,0 m, em local onde os ensaios SPT identificaram uma camada de areia média-grossa com pedregulhos, o RCPTU teve o seu isolamento danificado, podendo tal fato ter influenciado nos resultados do ensaio RCPTU 01, o último a ser executado (os ensaios foram feitos na ordem: RCPTU 05, RCPTU 4, RCPTU 02, RCPTU 03 e RCPTU 01). Um novo ensaio de calibração foi executado com o aparelho danificado no seu isolamento (Tabela 5.11 e Figura 5.44). Observa-se, nesta calibração, um pequeno aumento nas diferenças relativas entre o RCPTU e o condutivímetro utilizado em relação àquelas verificadas na calibração anterior (Tabela 5.1). Os resultados verificados no RCPTU 01 merecem, portanto um cuidado maior nas suas interpretações.

Tabela 5.11 Resultados da calibração do dispositivo para medida de resistividade para faixa entre 2 e 100 ohm.m com o isolamento danificado

| Ccond ($\mu\text{S/cm}$) | R (ohm.m) | C_{RCPTU} ($\mu\text{S/cm}$) | R (ohm.m) | Diferença ($\mu\text{S/cm}$) | Dif.rel. (%) |
|-------------------------------|-----------|--|-----------|-----------------------------------|-----------------|
| 138,0 | 72,5 | 144,0 | 69,4 | 3,0 | 4,17 |
| 138,9 | 72,0 | 144,0 | 69,4 | 2,5 | 3,54 |
| 140,7 | 71,1 | 147,7 | 67,7 | 3,4 | 4,74 |
| 140,9 | 71,0 | 148,6 | 67,3 | 3,7 | 5,22 |
| 141,0 | 70,9 | 149,5 | 66,9 | 4,0 | 5,69 |
| 144,5 | 69,2 | 162,0 | 61,7 | 7,5 | 10,80 |
| 416,0 | 24,0 | 457,0 | 21,9 | 2,2 | 8,97 |
| 590,0 | 16,9 | 650,0 | 15,4 | 1,6 | 9,23 |
| 588,0 | 17,0 | 637,0 | 15,7 | 1,3 | 7,69 |
| 588,0 | 17,0 | 639,0 | 15,6 | 1,4 | 7,98 |
| 589,0 | 17,0 | 640,7 | 15,6 | 1,4 | 8,07 |
| 1.236,0 | 8,1 | 1.348,4 | 7,4 | 0,7 | 8,34 |
| 1.234,0 | 8,1 | 1.339,7 | 7,5 | 0,6 | 7,89 |
| 2.810,0 | 3,6 | 3.192,8 | 3,1 | 0,4 | 11,99 |
| 2.800,0 | 3,6 | 3.067,6 | 3,3 | 0,3 | 8,72 |
| 3.440,0 | 2,9 | 3.998,2 | 2,5 | 0,4 | 13,96 |
| 3.470,0 | 2,9 | 3.951,4 | 2,5 | 0,4 | 12,18 |
| 3.470,0 | 2,9 | 3.982,5 | 2,5 | 0,4 | 12,87 |
| 3.470,0 | 2,9 | 4.046,2 | 2,5 | 0,4 | 14,24 |
| 3.470,0 | 2,9 | 3.998,2 | 2,5 | 0,4 | 13,21 |
| 3.480,0 | 2,9 | 3.760,7 | 2,7 | 0,2 | 7,46 |
| 3.460,0 | 2,9 | 4.030,0 | 2,5 | 0,4 | 14,14 |
| 3.470,0 | 2,9 | 3.951,4 | 2,5 | 0,4 | 12,18 |

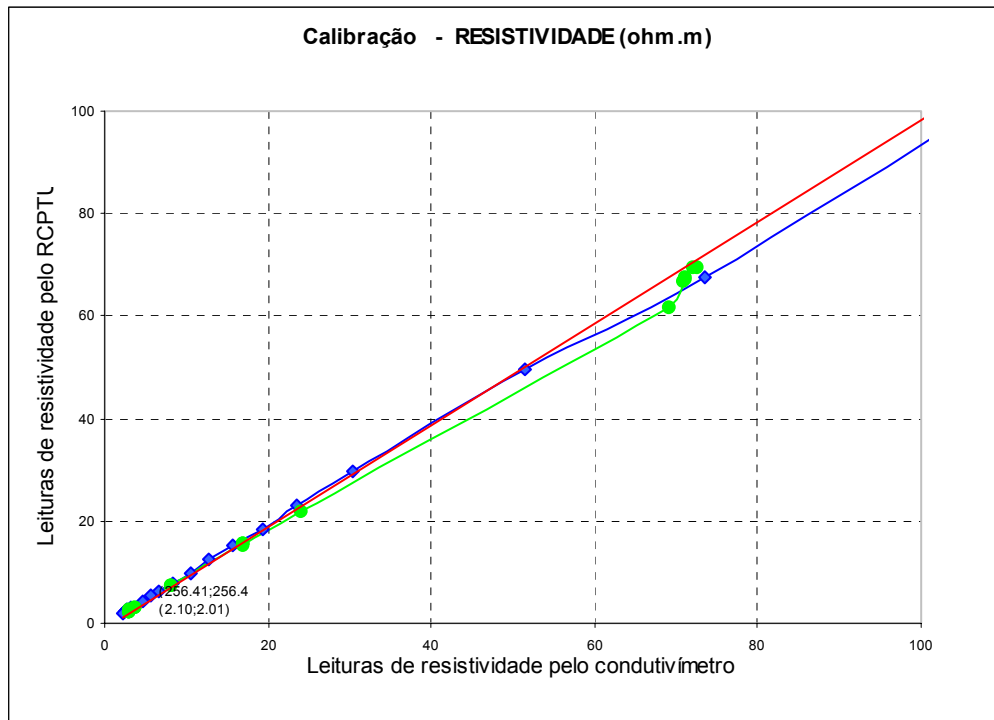


Figura 5.44 Calibração do dispositivo de medida de resistividade, valores na faixa de 2 a 100 ohm.m, com isolamento danificado

Nesse local constatou-se que os valores de resistividades medidas nos ensaios RCPTU nem sempre se mostraram coerentes com os valores encontrados na literatura (Campanella et al., 1986), ou seja, maiores para camadas arenosas e menores para as camadas argilosas, mais finas. Uma investigação completa com o uso dessa ferramenta requer a utilização de acessórios que permitam a amostragem desses pontos, como por exemplo a técnica *direct-push*, o que não foi feita neste local, dificultando uma análise mais detalhada.

Comparando os resultados dos ensaios RCPTU com aqueles apresentados por Porsani et al. (2003b) (Figura 5.45), em que foi utilizado um equipamento de perfilagem de poço Mala Geoscience, de fabricação sueca, observa-se uma razoável concordância entre os resultados obtidos entre as duas ferramentas. Nesse gráfico é possível observar, ao longo das profundidades amostradas, a mesma tendência de aumento e diminuição das resistividades, apesar de terem valores absolutos distintos, talvez devido às diferentes técnicas para sua obtenção e também às diferenças entre os pontos investigados dentro do campo experimental, sendo que os resultados do RCPTU 5 e os do Poço 3 foram os ensaios em que esses valores se mostraram mais próximos. Os valores de resistividade determinados nos ensaios RCPTU apresentaram valores relativamente elevados em relação aos valores que constam da literatura, fato que também se verifica nos resultados obtidos por Porsani et al. (2003b). Uma

nova campanha de ensaios RCPTU, que incluía a coleta de amostras de água e solo, seria necessária nessa área para possibilitar uma análise mais conclusiva dos resultados obtidos. As camadas apresentadas na Figura 5.45 foram obtidas dos resultados dos ensaios SPT feitos no local.

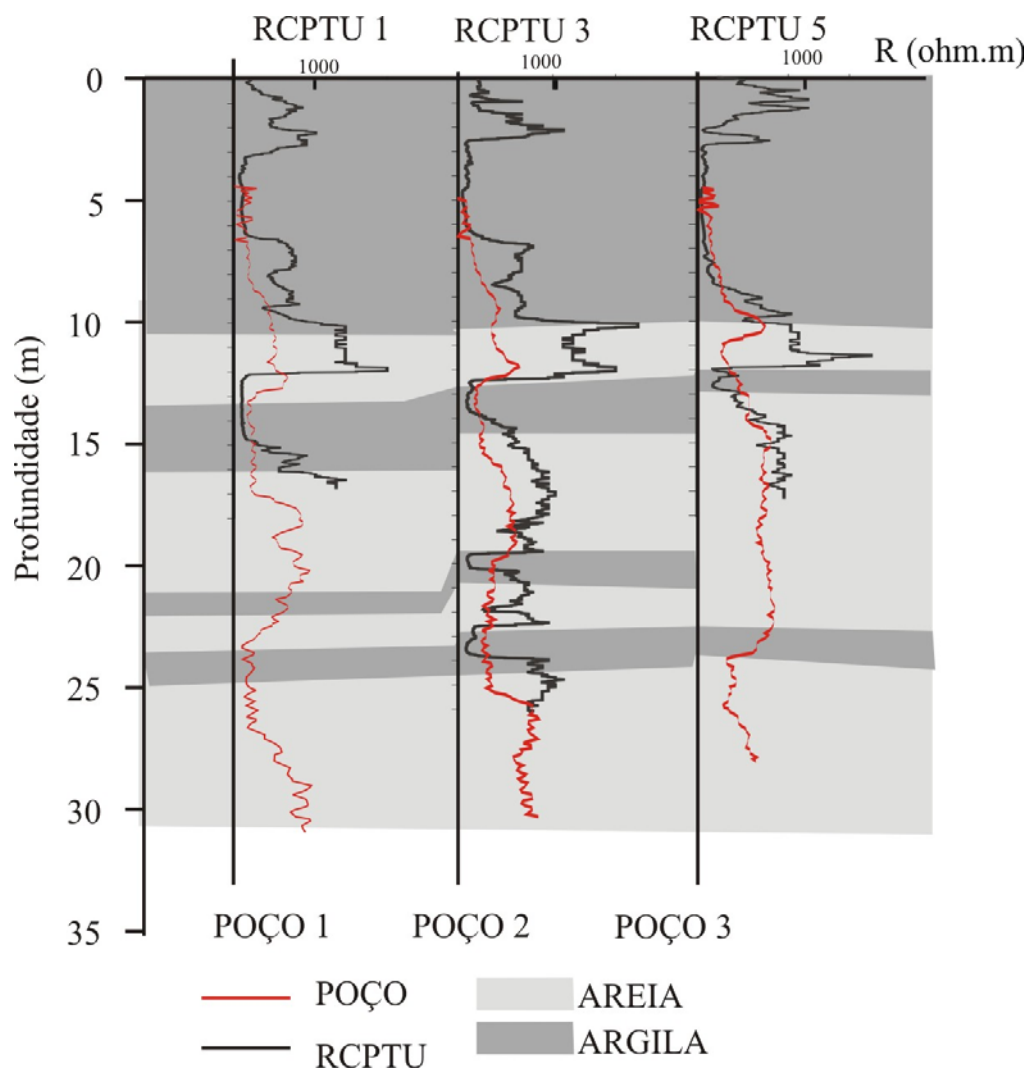


Figura 5.45 Resultados dos ensaios de perfilagem elétrica (Porsani et al., 2003b) e resultados dos ensaios RCPTU executados no IAG da USP

A Figura 5.46 apresenta o perfil geotécnico representativo do local dos ensaios no campo experimental do IAG-USP (Porsani et al., 2003b). Nesta figura é possível visualizar o já exposto acima em uma escala maior, ou seja, a boa concordância de resultados entre os ensaios RCPTU executados nesta área e os resultados de resistividade elétrica obtidos com o equipamento de perfilagem de poço Mala Geoscience, este último realizado por (Porsani et al., 2003b).

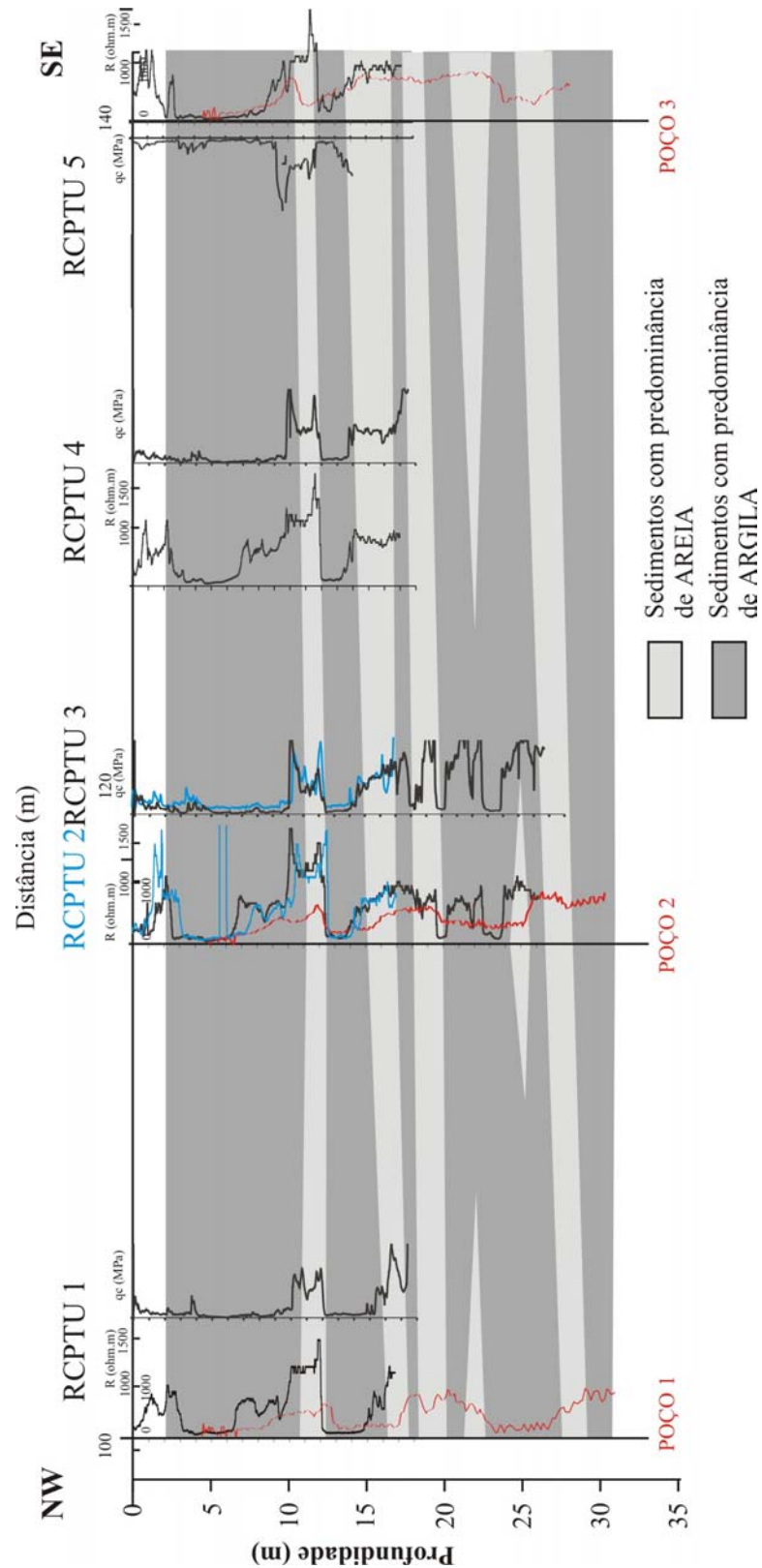


Figura 5.46 Perfil representativo da área investigada no campo experimental do IAG da USP (Porsani et al., 2003b) com os resultados dos ensaios RCPTU executados.

c. Posição do nível d'água

A identificação da posição do nível d'água em uma investigação geoambiental é uma informação importante. A utilização do registro de excesso de poro-pressão, nos ensaios RCPTU, é um recurso interessante que pode vir a auxiliar nesta tarefa, sendo que a interpretação dos valores de resistividade pode contribuir para isso.

Nos resultados dos ensaios realizados no campo experimental do IAG da USP pode-se observar que as leituras de excesso de poro-pressão, tanto através do elemento saturado com glicerina como com o filtro de cavidade preenchido com graxa, não possibilitaram definir a posição do nível d'água. Na Figura 5.47, onde todos os ensaios são apresentados juntos, observa-se, como já mencionado acima, uma boa repetibilidade dos resultados obtidos nesta área, característica muito importante para a confiabilidade dos resultados. Observa-se uma diminuição dos valores de resistividade na profundidade de 2,5 m, em camada identificada como argilosa, acompanhada por um aumento da poro-pressão, o que poderia caracterizar a presença do nível d'água ou mesmo de uma zona de capilaridade. As sondagens SPT realizadas no local, identificaram a posição do nível d'água variando entre 6,0 m e 8,0 m de profundidade (Figura 5.37 a Figura 5.40), dentro da camada argilosa.

A identificação da posição do nível d'água no momento da execução dos ensaios, através da abertura de um poço de amostragem temporário, como aquele realizado na área do aterro sanitário de Bauru, que pode ser executado com o emprego do próprio sistema de reação multi-função, poderia auxiliar a identificação precisa do nível d'água e, nesse caso, permitira ainda a coleta de solo e água, o que não foi feito nesta área.

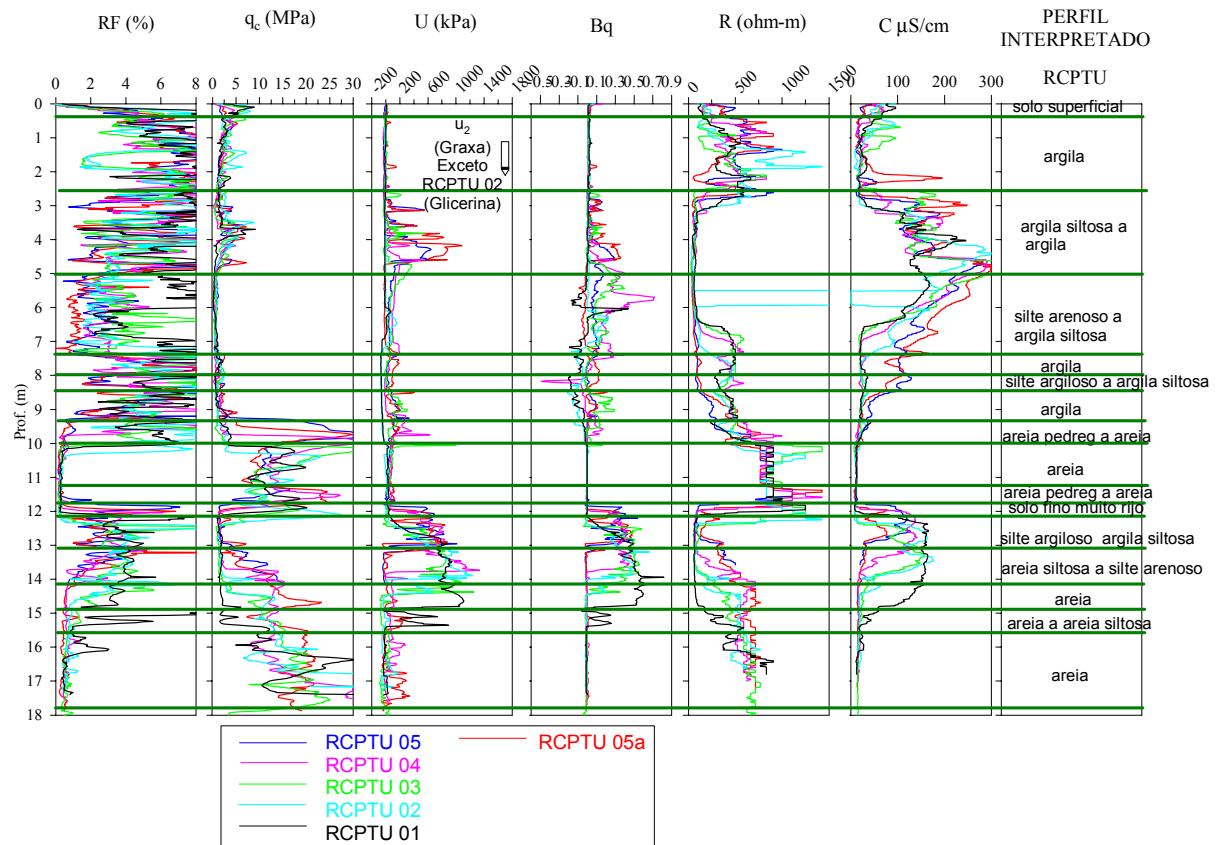


Figura 5.47 Ensaios RCPTU executados no campo experimental do IAG da USP

d. Dissipação do excesso de poro-pressão

Observam-se, na Figura 5.48 e Figura 5.49, que as curvas experimentais se ajustaram razoavelmente a curva teórica proposta por Houslyby e Teh (1988). No dois ensaios realizados, um com o elemento poroso saturado com glicerina (RCPTU 2) e o outro com o filtro de cavidade preenchido com graxa (RCPTU 3), não se observa diferenças significativas entre ajuste obtido com graxa ou glicerina. Esperava-se, a princípio, como verificou Larsson (1995) e Giacheti (2001), uma curva mais próxima à teórica no ensaio RCPTU 2 em que o elemento poroso foi preenchido com glicerina, menos viscosa que a graxa utilizada, o que possibilita respostas mais rápido do transdutor de poro-pressão.

O coeficiente de permeabilidade calculado através do resultado do ensaio de dissipação e baseado na teoria de Houslyby & Teh (1988), está de acordo com o que se espera para solos argilosos porosos. Vargas (1968) sugere valores de k para argilas menores que 10^{-5} cm/s.. O valor de α , utilizado para a estimativa do módulo confinado (M) a partir de valores de q_c para solos argilosos (Mitchell e Gardner, 1975 citados por Campanella, 1988), foi assumido como igual a 3, sendo este um parâmetro, como já dito anteriormente, de difícil

definição e dependente da experiência e conhecimento da geologia local (Robertson e Campanella, 1983), variando em uma larga faixa de valores (de 0,4 a 8).

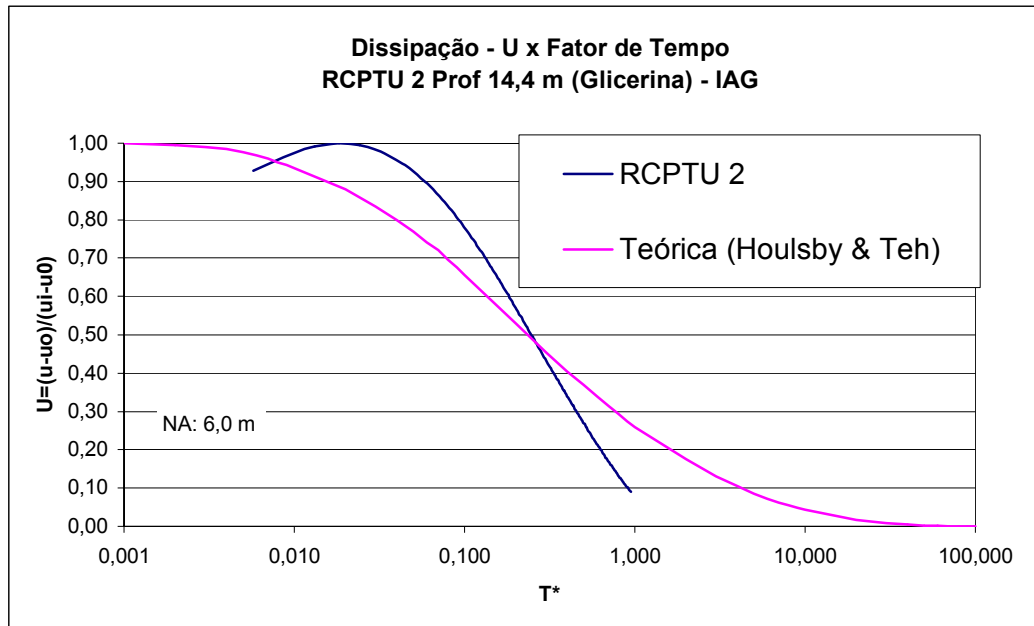


Figura 5.48: Curva de dissipação de poro-pressão ajustada do ensaio RCPTU 2, realizado no IAG-USP, com elemento poroso saturado com glicerina, e curva teórica proposta por Houlsby & Teh (1988).

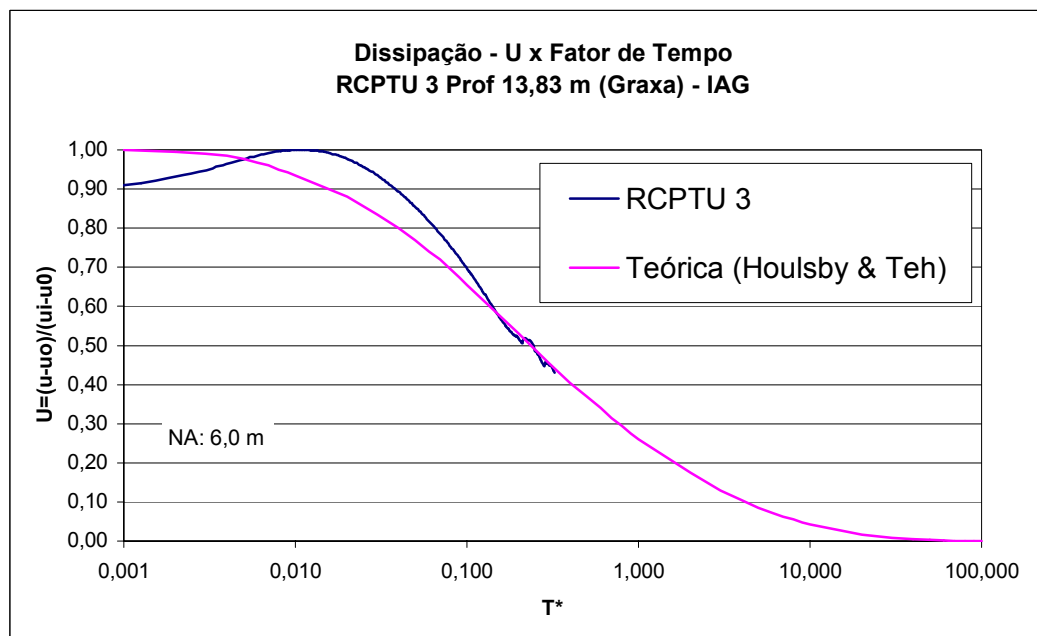


Figura 5.49: Curva de dissipação de poro-pressão ajustada do ensaio RCPTU 3, realizado no IAG-USP, com elemento poroso saturado com graxa, e curva teórica proposta por Houlsby & Teh (1988).

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE

Neste item serão apresentadas as principais conclusões e sugestões para continuidade deste trabalho. A utilização do piezocone e o piezocone de resistividade em investigações geoambientais serão apresentadas abordando-se quatro itens principais: identificação do perfil geotécnico, posição do nível d'água, resistividade e amostragem de água e solo.

6.1 Conclusões

a. Identificação do Perfil Geotécnico

A calibração e checagem do equipamento são etapas fundamentais para a realização das campanhas de ensaios com o piezocone, devendo ser executadas de forma rotineira.

Corroborando conclusões de Giacheti (2001), os ábacos de classificação propostos por Robertson et al. (1986) apresentam limitações quando aplicados em solos tropicais, sendo necessária uma adaptação destes ábacos, o que requer a necessidade da execução de mais ensaios. Recomenda-se a utilização, no atual estágio de conhecimento, da amostragem de solos utilizando-se amostradores especiais adaptáveis a essa ferramenta, como os amostradores de Geoprobe® utilizado neste trabalho.

Apesar de não fornecer informações sobre a textura do solo ensaiado, os resultados obtidos com q_c e R_f , analisados com o ábaco de Robertson et al. (1986), podem fornecer informações sobre a mudança de comportamento das camadas ensaiadas, mesmo finas camadas, que complementadas com amostragem em pontos específicos possibilitam que seja realizado uma investigação geoambiental adequada.

Nas interpretações de resultados de ensaios de piezocone em solos tropicais o conhecimento da geologia do local estudado é uma informação importante já que a gênese afeta o comportamento desses solos.

Devido às características coesivo-friccional dos solos tropicais, os métodos indiretos para a estimativa de parâmetros necessários dos solos, originalmente desenvolvidos para solos de países de clima temperado, onde se observa penetração drenada para areias e não-drenada para argilas, precisa de adaptações para o seu emprego em solos tropicais.

b. Posição do nível d'água

A definição da posição do nível d'água é uma informação importante em investigações geoambientais. O registro do excesso de poro pressão feito nos ensaios com piezocone podem ser úteis para auxiliar a definição dessa posição quando se tem a cravação do piezocone em uma camada saturada que não gera excesso de poro-pressão, como mostra

Campanella et al. (1995), ou quando se tem a realização de um ensaio de dissipação do excesso de poro-pressão.

A utilização dessa ferramenta em solos tropicais, geralmente com o nível d'água profundo, apresentou limitações como no aterro de Bauru. Nesse caso a utilização da resistividade no ensaio RCPTU pode auxiliar nessa definição. Na área do litoral do Paraná, onde o nível d'água está mais próximo à superfície e ocorrência de areias sedimentares a definição da posição do nível d'água através dos resultados da poro pressão e resistividade se apresentaram de forma mais satisfatória, obtendo-se bons resultados para esta área. No IAG da USP as variações observadas, tanto nas leituras dos resultados da poro-pressão como de resistividade, não permitiram uma análise mais conclusiva. Neste caso a realização de mais ensaios complementados com uma coleta de amostras de solo água e a abertura de um poço temporário para ao monitoramento da posição do nível durante a execução dos ensaios se fazem necessários nesta área.

c. Resistividade

Os procedimentos de calibração do piezocone de resistividade também devem ser efetuados com o máximo cuidado. A calibração do dispositivo de medida de resistividade permitiu o conhecimento dos valores limites, mínimos e máximos, para a devida utilização do aparelho, sendo que nos ensaios realizados os valores encontraram-se dentro dessa faixa, o que permitiu a obtenção de resultados confiáveis.

A grande dificuldade de análise dos resultados dos ensaios RCPTU é a falta de valores de referência para a resistividade determinada em solos com as mesmas características dos solos tropicais uma vez que diversos fatores afetam esse parâmetro especialmente nesse tipo de solo. Uma possível solução seria fazer uma interpretação por contraste, como sugere Campanella et al. (1993). Nas campanhas realizadas pode-se perceber a forte influência dos fatores: teor de umidade, gênese do solo, textura, porcentagem de finos e tipo de argilo-mineral nos resultados das campanhas executadas. Nota-se, ainda, grande influência de presença de contaminantes nos solos, dificultando ainda mais a sua interpretação.

Especialmente em solos tropicais, os valores de resistividade são fortemente afetados pelo tipo de solo. Os resultados dos ensaios realizados e apresentados neste trabalho mostram que as variações nos valores de resistividade coincidiram com as alternâncias entre as camadas de areia e argila: resistividades maiores para as areias e menores para as argilas, exceção observada no C.E. do IAG onde alguns resultados mostram o contrário e devem ser reavaliados.

Praticamente em todos os perfis de ensaios apresentados é possível observar uma redução brusca na resistividade (aumento na condutividade) quando o piezocone atravessa intercalações de siltes e argilas presentes nas camadas arenosas. Os registros de q_c , R_f e U possibilitam identificar essas camadas mais finas e, exatamente nelas, tem-se observado mudanças nos valores de resistividade. Esta é uma grande vantagem dos ensaios RCPTU já que é possível obter diferentes leituras que quando interpretadas em conjunto permitem a identificação de variações que ocorrem no solo.

No atual estágio de conhecimento, a escolha de um local que sirva como referência, sem a influência de contaminantes e que seja representativo do local em estudo, parece ser uma forma interessante para a aplicação dessa tecnologia em solos tropicais, para que se procure um contraste entre os resultados, permitindo uma melhor interpretação dos mesmos.

A amostragem de solo e de água deve ser procedimento complementar dos ensaios RCPTU para permitir uma análise mais precisa e completa da presença de contaminantes, nas áreas críticas identificadas por esse ensaio.

A utilização de uma ferramenta, como o piezocone de resistividade, vem a atender a necessidade de se avaliar áreas contaminadas reduzindo a exposição do operador ao possível material contaminado, sem a retirada desnecessária de material do interior do subsolo investigado. Este ensaio possibilita a definição de pontos críticos e a conseqüente retirada do material para amostragem destes pontos, apenas.

Como a base da interpretação de um ensaio com o piezocone de resistividade é identificar solos com comportamento distintos, camadas constituídas de materiais grossos, como as areias, podem ser facilmente identificados nas áreas em estudo, mesmo quando são pouco espessas, pois é através dos materiais mais permeáveis que o contaminante percola.

d. Ensaio de dissipação de poro-pressão

O coeficiente de permeabilidade é um parâmetro importante a se determinar em um programa geoambiental. A utilização do RCPTU para a realização de ensaios de dissipação de poro-pressão para a obtenção do coeficiente de permeabilidade apresenta resultados animadores quando utilizados em solos tropicais mesmo quando se utiliza o filtro de cavidade preenchido com graxa automotiva. Apesar das limitações teóricas na interpretação desses resultados, uma vez que não se pode garantir saturação, os resultados obtidos indicam que é interessante avaliar melhor essa técnica pelas vantagens de seu uso em perfis de solos não saturados espessos.

e. Amostragem de água e solo

A utilização de amostragens de água e solo é recurso extremamente importante nas investigações geoambientais. O ensaio RCPTU permite a identificação de regiões anômalas do perfil onde se recomenda a coleta do material, para posterior análise no próprio campo ou em laboratório.

A utilização de amostradores de água e solo, como o Geoprobe® utilizado neste trabalho, tem possibilitado a classificação textural e identificação das características genéticas do solo, o que permite uma interpretação dos resultados, visto que a aplicação direta dos ábacos de Robertson et al. (1986) apresentaram limitações quando empregado em solos tropicais.

O emprego de amostradores, como o utilizado neste trabalho, permite a obtenção de amostras protegidas por um *liner*, reduzindo a exposição do operador a um material com possível contaminação indicado pelos resultados dos ensaios RCPTU, visto que as metodologias tradicionais não atendem este requisito.

Como desvantagem esses amostradores apresentaram dificuldade da penetração em solos residuais, mais resistentes, quando se excede a capacidade do penetrômetro, o que inviabiliza a obtenção de amostras no local.

Poços de monitoramento temporário são de baixo custo, sendo possível sua execução com trado cavadeira até o nível d'água. Estes poços permitem a avaliação sazonal da presença de contaminantes, porém a profundidade de coleta se limita a um único ponto. Como desvantagem podemos citar a que nem sempre é possível garantir a qualidade das amostras, e precisam ser executadas por pessoas bem treinadas e com muito critério. Outra desvantagem é que expõe o operador ao material coletado, que caso esteja contaminado, deve ser adequadamente disposto para que não venha a se tornar uma nova fonte de contaminação.

Destaca-se que o uso de amostradores, como aqueles utilizados neste trabalho, supre algumas das deficiências listadas acima, já que reduz a exposição do operador ao contato com material contaminado, não retira material além do desejado e permite a obtenção de amostras em várias profundidades. Como desvantagem podemos citar a necessidade de um penetrômetro, aparelho de custo elevado, e a limitação da profundidade em função da capacidade do penetrômetro.

6.2 Sugestões para continuidade

Com o aumento de projetos na área ambiental, as pesquisas na área de geotecnia passaram a ter uma importância muito grande com os problemas relacionados com a presença de contaminantes no solo, sendo que a tecnologia do piezocone, como vem ocorrendo nos países desenvolvidos, tem tido um grande avanço nesta área. Como sua utilização no Brasil, país de solos tropicais, vem sendo pouco executada, sugere-se os seguintes trabalhos para a continuidade desta pesquisa:

- A execução de mais ensaios utilizando-se o piezocone de resistividade, em outras áreas, para a adaptação dessa tecnologia para investigação de solos tropicais, visto estes terem sido desenvolvidos para solos de países de clima temperado;
- Recomenda-se a execução de ensaios RCPTU em áreas afetadas por outros tipos de contaminantes, como locais de disposição de resíduos industriais, postos de gasolina, entre outros, para levantamento de vantagens e limitações desta ferramenta como uma opção de investigação mais abrangente de passivos ambientais.
- Maior repetibilidade dos ensaios de dissipação da poro-pressão, tanto com o piezo-elemento saturado com glicerina como com o filtro de cavidade preenchido com graxa, para possibilitar um melhor entendimento da resposta do slot-filter para a estimativa do coeficiente de permeabilidade de solos;
- No caso do aterro sanitário de Bauru recomenda-se a coleta e análise laboratorial de amostras de água obtidas dos poços de monitoramento instalados nos locais sugeridos pela investigação realizada, para permitir uma avaliação mais precisa da situação da contaminação do local;
- No campo experimental do IAG da USP uma nova campanha complementada com a coleta de amostras de solo e água e a execução de um poço temporário de monitoramento para o acompanhamento da posição do nível d'água, tarefas estas executadas com o próprio penetrômetro utilizado para a execução dos ensaios RCPTU, são recomendadas para um maior entendimento desta área.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT MB-3406 (1990): Solo – **Ensaio de penetração de cone in situ (CPT)**. CB-02, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 10 p.
- ABNT NBR-6484 (1980): **Execução de sondagens de simples reconhecimento dos solos**. CB-02, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 12 p.
- Aoki, N. & Velloso, D.A. (1975): **An approximate method to estimate the bearing capacity of piles**. Proc.5th Panamerican Conference on Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires, pp. 367-376.
- Archie, G.E (1942): **The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics**. Trans. Am. Inst. Min. Eng., Vol. 146, pp. 54-62.
- ASTM D 1586 (1984): **Standard method for penetration test and split-spoon sampling of soils**. Annual Book of ASTM Standards, Committee D-18 on Soil and Rock. Philadelphia, p. 298-303
- ASTM D 2845 / D 4428 M (1984): **Standard test method for crosshole seismic testing, Annual Book of ASTM Standards**. Part 19, Soil and Rock; BuildingStones, Geotextiles, vol. 04-08, p. 512-530.
- ASTM D 18.02.10 (1986): **Suggested method for performing the flet dilatometer test**. Geotechnical Testing Journal. vol. 9, n.2, p. 93-101.
- ASTM D 3441 (1986): **Standard test method for deep quasi-static, cone and friction-cone penetration tests of soils**. West Consohocken: American Society for Testing Materials. p. 414-419.
- ASTM D 4633 (1986): **Standard test method for stress wave measurement for dynamic penetrometer system, Annual Book of ASTM Standards**. Committee D-18 on Soil and Rock. Philadelphia.
- Baligh, M. M. & Levadoux, J.N. (1980): **Pore-pressure dissipation after cone penetration**. Research Report R80-11, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 367 p.
- Baligh, M. M.; Azzous, A. S.; Wissa, A. Z. E.; Martin, R. T. & Morris, M. J. (1981): **The piezocone penetrometer**. Symposium on Cone Penetrometer Testing and Experience, ASCE National Conference, St. Louis, p. 247-263.

- Baligh, M. M. & Levadoux, J.N. (1986): **Consolidation after undrained piezocone penetration.II: Interpretation.** Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 112, n° 7, p 727-745.
- Baldi, G.; Bellotti, R.; Ghionna, V.; Jamilolkowski, M. & Pasqualini, E. (1986): **Interpretation of CPT's and CPTU's, 2nd part: Drained penetration of sands.** Proceedings of the 4th International. Geotechnical Seminar, Singapore, p. 143-162.
- Bratton, W.L Bratton, J.L & Shinn, J.D. (1995): **Direct penetrating technology for geotechnical and environmental site characterization.** Geoenvironment 2000 - Characterization, Containment, Remediation and Performance in Environmental Geotechnics, Vol. 1, pp. 105-121.
- Byrnes, M.E, (1994): In: **Field sampling methods for remedial investigations.** Boca Raton –Florida: CRC Press, Inc., 1994.
- Campanella, R. G. & Robertson P. K. (1978): **State of the art in situ testing in soils: Developments since 1978.** updating subsurface sampling of soils and rocks and their in situ testing, Santa Barbara, p. 245-267.
- Campanella, R. G.; Gillespie, D. & Robertson, P. K. (1982): **Pore pressures during cone penetration testing.** Proceedings of the 1st of 2nd European Symposium on Penetration Testing, ESOPT II, Rotterdam, p. 507-512.
- Campanella, R. G. & Robertson, P. K. (1983): **Flat dilatometer testing: Research and development.** 1st International Conference on the Flat Plate Dilatometer, Edmonton, Alberta.
- Campanella, R. G.; Robertson, P. K. & Gillespie, D. (1983): **Cone penetration testing in deltaic soil.** Canadian Geotechnical Journal, vol. 20, n. 1, p. 23-25.
- Campanella, R. G.; Robertson, P. K.; Gillespie, D. G. & Greig, J. (1985): **Recent developments in in-situ testing of soils.** Proceedings of XI ICSMFG, San Francisco, vol. 2, p. 849-854.
- Campanella, R.G. & Robertson, P.K. (1986): **Factors Affecting the Pore Water Pressure and its Measurement around a Penetration Cone.** 39th Canadian Geotechnical Conference, Ottawa,

- Campanella, R. G. & Robertson, P. K. (1988): **Current status of the piezocone test.** 1th. International Symposium Penetration Testing ISOPT-1, Florida, vol. 1. p. 93-117.
- Campanella, R.G. & Robertson, P.K. (1988): **Current status of the piezocone test.** Inv. lecture, ISOPT 1, Disney World, Balkema Publ., Vol. 1, pp. 93-117.
- Campanella, R. G.; Sully, J. P.; Greig, J. W. & Jolly, G. (1990): **Research and development of a lateral stress piezocone.** Washington: Transportation Research Board. p. 215-224. (Transportation Research Record, n°. 1278; Soil Mechanics Series n. 137)
- Campanella, R. G. & Robertson, P. K. (1990): **Developmented use and interpretation of a research dilatometer DMT.** Canadian Geotechnical Journal, vol. 28, n.1, p. 113-126.
- Campanella, R. G. & Weemees, I. A. (1990): **Development and use of a electrical resistivity cone for groundwater contamination studies.** 42th Canadian Geotechnical Conference, vol.27, n. 5, p. 557-567. (Soil Mechanics Series n. 140).
- Campanella, R. G. & Stewart, W. P. (1992): **Seismic cone analysis using digital signal processing for dynamic site characterization.** Canadian Geotechnical Journal, vol. 29, n.3, p.477-486.
- Campanella, R.G., Davies, M.P. & Boyd, T.J. (1993): **The Use of In-Situ Testing to Characterize Contaminated Soil and Groundwater Systems.** 2nd International Joint ASCE-CSCE Conference on Environmental Engineering, Publ. by Geotechnical Research Centre, McGill Univ., Montreal, Vol.2, pp. 1497-1505.
- Campanella, R. G. & Kokan, M. A. (1993): **A new approach to measuring dilatancy in saturated sands, Geotechnical Testing Journal.** ASTM vol. 16, n. 4, p. 485-495.
- Campanella, R. G.; Davies, M. P.; Boyd, T. J. & Everard, J. L. (1994): **In-situ testing methods for groundwater contamination studies.** Symposium on Developments in Geotechnical Engineering, From Harvard to New Delhi 1936-1994, Rotterdam, p. 371-382.

- Campanella, R. G.; Stewart, W. P.; Roy, D. & Davies, M. P. (1994): **Low strain dynamic characteristics of soils with the downhole seismic piezocone penetrometer**. ASTM Symposium on Dynamic Geotechnical Testing II, 1213, Reno, p. 73-87.
- Campanella, R. G. & research students (1995): **Interpretation of piezocone test data for geotechnical design**. Vancouver: Geology Department, University of British Columbia 2 vol. (Soil Mechanics Series n. 157)
- Campanella, R. G. (1995a): Activity 3A, **General site characterization Kidd 2 Site**. Canlex Report Phase II, In Situ Testing Group Report, Vancouver: University of British Columbia.
- Campanella, R. G. (1995b): Activity 3A, **General site characterization Massey Tunnel Site**. Canlex Report Phase II, In Situ Testing Group Report, Vancouver: University of British Columbia.
- Campanella, R. G. & Davies, M. P. (1997): **In-situ testing for geo-environmental site characterization: a mine tailings example**. XIV International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburgo.
- Campanella, R. G. (1997): Comunicação pessoal, University of British Columbia, Vancouver, setembro.
- Campanella, R.G. (1998): **Geo-Environmental Site Characterization**. course notes, 577 Soil Exploration for Engineering Design, Graduate Course in Geotechnical Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1998.
- Campanella, R. G. (1998): CPTINT5 - **Piezocone interpretation software for the IBM-PC, Vancouver: Department of Civil Engineering**. University of British Columbia. Version 5.2.
- Campanella, R. G.; Davies, M. P.; Kristiansen, H. & Daniel, C. (1998): **Site characterization of soil deposits using recent advances in piezocone technology**. Proceedings of the 1st Int. Conference on Site Characterization – ISC '98, Atlanta, p. 995-1000.
- Conama (1986): **Resolução n° 20** de 20/07/86. Conselho Nacional do Meio Ambiente.
- Coduto, D.P. (1994): **Foundation Design: Principles and Practice**. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

- Carpenter, P.J. Kaufmann, R.S. & Price, B. (1990): **The use of resistivity soundings to determine landfill structure**. Ground Water 28 (4), pp. 569-575.
- Cetesb (2001): **Parâmetros de Qualidade do Solo e Água Subterrânea para Investigação Confirmatória**. Manual de Gerenciamento de Águas Contaminadas.
- Daniel, D.E. (1984): **Predicting Hydraulic Conductivity of Clay Liners**. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 110, n. 2, pp. 285-300.
- Daniel, C. (1997): **An investigation of the factors affecting bulk soil electrical resistivity**. B.A.Sc. Thesis, University of British Columbia, Vancouver.
- Daniel, C.; Giacheti, H. L., Campanella, R. G. & Howie, J. A. (1999): **Resistivity piezocone: data interpretation and potential applications, XI Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**. Foz do Iguaçu, vol. 1: p. 361-368.
- Daniel, C.; Howie, J. A. Campanella, R. G. & Giacheti, H. L. (1999): **The resistivity cone penetration test for quality assessment of geotechnical ground improvement**. Proceedings of SAGEEP 99, Wheat Ridge, p. 133-142.
- Daniel, C.R., Howie, J.A., Campanella, R.G. & Giacheti, H.L. (2002): **Specific Depth Cone Resistivity Measurements To Determine Soil Engineering Properties**. Proceedings of Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems.
- Davies, M.P. & Campanella, R.G. (1995): **Piezocone Technology: Downhole Geophysics for the Geoenvironmental Characterization of Soil**. Proceedings of SAGEEP 95, Orlando, Florida, April, 11 pgs.
- Davis, J.L. & Anann, A.P. (1989) **Ground Penetrating Radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy**. Geophysical Prospecting. 37 (5), pp. 531-552.
- Danziger, F.A.B. Almeida, M.S.S. Paiva, E.N. de Mello, L.G.F.S. & Danziger, B.R. (1998): **O piezocone como ferramenta de determinação da estratigrafia e classificação dos solos**. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Brasília/DF, Nov/98, 917-926.

- De Mio, G (2003): **(Universidade de São Paulo – Campus de São Carlos)**. comunicação pessoal, 2003.
- De Ruiter, J. (1971): **Electronic Penetrometer for Site Investigations**. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Soil Mechanics Series, nº. 2, vol. 97, pp. 457-472.
- De Ruiter, J. (1981): **Current penetrometer practice**. Proceedings of Cone Penetration Testing and Experience, ASCE, St. Louis, MO, pp. 1-48.
- Douglas, B. J. & Olsen, R. S. (1981): **Soil classification using electric cone penetrometer**. Symposium on Cone Penetration Testing and Experience, St. Louis, p. 209-227.
- Elis, V.R. (1993): **A Aplicação da Geofísica para Análise do Meio Físico, Importância para Elaboração de Mapeamento Geotécnico**. Dissertação de Mestrado, Rio Claro-SP, Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP, 120p.
- Elis, V.R. & Zuquette, L.V. (1996): **Caminhamento Elétrico Dipolo-Dipolo - Uma Técnica Eficiente na Caracterização de Depósitos de Resíduos**. VIII Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Rio de Janeiro - RJ, Vol 1, pp. 39-48.
- Elis, V.R. & Zuquette, L.V. (1997): **Determinação da Estrutura do Aterro Sanitário de Ribeirão Preto-SP através de métodos geoeletricos**. V Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, São Paulo - SP, Vol. 1, pp. 417-420.
- Elis, V. R. (1998): **Avaliação da aplicabilidade de métodos geoeletricos para investigação geofísica de áreas de disposição de resíduos**. tese de doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Unesp, Rio Claro/SP.
- Elis, V.R. (2001): **Resultados Preliminares dos Ensaios Geofísicos na Área de um Aterro Sanitário**. Relatório de pesquisa, 12p.
- Elis, V.R. (2003): **Geofísica Aplicada ao Estudo da Poluição de Solos e Águas Subterrâneas**. V Escola de Verão de Geofísica, IAG – USP, São Paulo.
- FIPAI (2001): **Parecer técnico das análises de líquidos percolados gerados no aterro sanitário municipal de Bauru/SP**. FIPAI/EESC/USP, Nov. 2001, 7 p.

- Giacheti, H. L. (1991): **Estudo experimental da parâmetros dinâmicos de alguns solos tropicais do Estado de São Paulo**. tese de doutorado, EESC-USP, São Carlos/SP, 232 p.
- Giacheti, H. L. (1995): **Comparison of Field and Laboratory Shear Moduli for Tropical Soils**. X Panamerican Conference on Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Guadalajara/Mexico, out-nov/95, V.1, pp. 176-188
- Giacheti, H. L. (1998): **Ensaio “In Situ” para Determinação de Parâmetros Geotécnicos do subsolo**. Relatório de Pesquisa no Exterior, Fapesp, Proc. No. 97-0859-7, 2 vol., Inédito.
- Giacheti, H. L.; Coelho, V. & Carvalho, D. (1998): **Caracterização geotécnica de dois perfis de solos tropicais com base em ensaios de laboratório**. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Brasília, vol. 1, p. 195-202.
- Giacheti, H. L., Ferreira, C. V. & Carvalho, D. (1999): **In-situ testing methods for characterization of Brazilian tropical soils**. XI Panamerican Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Foz do Iguaçu, vol.1. p. 314-414.
- Giacheti, H. L.; Carvalho, D. & Ferreira, C. V. (1999): **In-situ test methods for site characterization of some tropical soils from Brazil**. XI Panamerican Conference Of Soil Mechanics And Geotechnical Engineering, Foz do Iguaçu, vol. 1, p. 307–314.
- Giacheti, H. L. & Queiroz, R. C. (2000): **O piezocone e algumas aplicações recentes em engenharia**. Bauru: Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista.
- Giacheti, H. L. (2001): **Os ensaios de campo na investigação do subsolo: Estudos e considerações quanto à aplicação em solos tropicais**, tese de livre docência. FEB-Unesp, Bauru/SP, 299 p.
- Giacheti, H.L. & Carvalho, D. (1994): **Estimativa do Módulo de Cisalhamento de Dois Solos Tropicais Típicos a partir de Resultados de Ensaio de Penetração**. X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, out/94, Foz do Iguaçu/PR, V.2: 467-474
- Geotech e Geomil, 2001, **Geoteche Geomil catalogue versão 1.1**, cd-rom, 2001.

- Gupta, R.C., (1983): **Determination of the in situ coefficient of consolidation and permeability of submerged soils using electrical piezoprobe soundings**. Ph.D. Thesis, University of Florida, Gainesville, 303p.
- Houlsby G.T & Teh, C.I., (1988): **Analysis of the piezocone in clay**. Proceedings, International Symposium on Penetration Testing, J.D. Tuitert (ed), A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, vol. 1, 9 777-783.
- Iritani, M. A., (1993): **Potencial hidrológico da cidade universitária de São Paulo**. Dissertação (mestrado). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 63p.
- ISSMFE (1977): **International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering. Report of the Subcommittee on Standardization of Penetration Testing in Europe**. Proceedings 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, vol. 3, Appendix 5, p. 95-152.
- Larsson, R. (1995): The use of a thin slot as filter in piezocone tests, **Proceedings of the International Symposium on Cone Penetration Tests, CPT '95**. Swedish Geotechnical Conference, Linköping, Sweden, vol. 2. p. 35-40.
- Lunne, T. Robertson, P.K. & Powell ,J. (1997): **Cone Penetration Test in Geotechnical Practice**. Blackie Academic & Professional, London, 311 pp.
- McBean, E.A., Rovers, F.A., Farquhar, G.J., (1995) **Solid Waste Landfill Engineering and Design**. Prentice Hall, Inc. p. 521, ISBN 0-13-079187-3.
- Marques, M. E. M. (2002) **Tecnologia do Piezocone para Investigação Geotécnica e Geoambiental de Solos Tropicais**. Dissertação (mestrado). Faculdade de Engenharia da Unesp, Bauru.
- Mayne, P.W. & Burns, S.E. (1998): **Penetrometers for Soil Permeability and Chemical Detection**. School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology.
- Mayne, P.W. Brown, D. Vinson J. Schneider, J. A. & Finke, K.A. (2000): **Site Characterization of Piedmont Residuals Soils at the the NGES**. Opelika, Alabama. GSP 93. ASCE. National Geotechnical Experimentation Sites. P 160-185.
- Mayne, P. W. & Schneider, J. A. (2001): **Evaluating axial drilled shaft response by seismic cone**. GSP 113, ASCE. Foundations & Ground Improvement. P 655-669.

- Mayne, P.W. (2001) **Stress-strain-strength-flow parameters from enhanced in-situ tests**. International Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties & Case Histories. p 27-48.
- Meigh, A.C. (1987): **Cone penetration testing: methods and interpretation**. CIRIA ground engineering report: In-situ testing, Butterworths, London, England.
- Mitchell, J.K. & Gardner, W.S., (1975): **In situ measurement of volume change characteristics**. Proceedings of the ASCE Specialty Conference on In Situ Measurements of Soil Properties, Raleigh, North Carolina, 2, p 279-345, American Society of Engineers (ASCE). 1975.
- Mondelli, G (2004): **Investigação geoambiental em áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos utilizando a tecnologia do piezocone**. Dissertação (Mestrado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP-SP.
- Nogami, J.S., Villibor, D.F., Serra, P.R.M., (1987): **Metodologia MCT para dosagem de misturas solo-agregados finas lateríticas**. In: Reunião Anual de Pavimentação, 22^a, Maceió-AL, 1987. Anais. Maceió-AL, ABPv, 1987.
- Nogami, J.S. & Villibor, D.F. (1992): **Dosagem de solo agregados tropicais, de granulação grossa, para base em pavimentos**. In: Reunião Anual de Pavimentação, 26^a, Aracaju-SE, 1992. Anais. Aracaju-SP, ABPv, 1992.
- Nogami, J.S. & Villibor, D.F. (1996): **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. Editora Vilibor, São Paulo – SP, 240p.
- Oliveira, A.M.S, de Brito, S.N.S., (1998) **Geologia de Engenharia**. ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. p.586. ISBN 85-7270-002-1.
- Olsen, R. S. & Farr, J. V. (1986): **Site characterization using the cone penetration test, Proceedings of the ASCE Specialty Conference In Situ '86: Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering**. Blacksburg, p. 854-68.
- Ortigão, J.A.R.; Cunha, R.P. e Alves L.S.(1996) **InSitu Tests in Brasília Porous Clay**. Canadian Geotech. J.. 33, (1), 189-198.
- Pejon, O.S. & Zuquette, L.V. (1991): **Importance of geological-geotechnical studies for urban waste disposal**. Proceedings of II Symposium of Tailings Dams and Urban Waste Disposal, (in portuguese), Rio de Janeiro/RJ/Brazil, pp. 367-377

- Porsani, J.L.; Borges, W.R.; Elis, V.R.; Hiodo, F.Y.(2003a): **Estudos geofísicos no campus da USP, Bacia Sedimentar de São Paulo**. In: 8º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 2003, Rio de Janeiro. 2003.
- Porsani, J.L.; Borges, W.R.; Elis, V.R.; Diogo, L.A.; Hiodo, F.Y.; Marrano, A.; Birelli, C.A. (2003b): **Investigações geofísicas de superfície e de poço no sítio controlado de geofísica rasa do IAG/USP**. Artigo submetido à Revista Brasileira de Geofísica, Salvador,. 2003.
- Porto, C.G. (1996): **Intemperismo em regiões tropicais**. In: Guerra A. J. T. e Cunha S. B. Geomorfologia e Meio Ambiente. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. capítulo 1. p.25-58.
- Quaresma, A. R.; Décourt, L.; Quaresma Filho, A. R.; Almeida, M. S. S. & Danziger, F. (1996): **Investigações geotécnicas**. In: Fundações - teoria e prática, 2. ed. São Paulo: Pini. Cap. 2. p. 119 – 162.
- Rinaldi, V.A. e Redolfi, E.R. (1998) **Characterization of Collapsible Soils With Combined Geophysical**. Geotechnical Site Characterization. Balkema ,Rotterdam. ISBN 90 5410 939 4. Vol 1,p. 581-588.
- Robertson, P. K. & Campanella, R. G. (1983): **Interpretation of cone penetration test – Part I Sand**. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 20, n. 4.
- Robertson, P. K. & Campanella, R. G. (1983): **Interpretation of cone penetration tests – Part II: Clay**. Canadian Geotechnical Journal, vol. 20, n.4.
- Robertson, P. K.; Campanella, R. G. & Wightman, A. (1983): **SPT – CPT correlations**. Journal of Geotechnical Division, ASCE, vol. 109, p. 1449-1459.
- Robertson, P. K. & Campanella, R. G. (1985): **Liquefaction potential of sands using the cone penetration test**. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 111, n.3, p. 384-403.
- Robertson, P. K. & Campanella, R. G. (1986): **Guidelines for geotechnical design using CPT and CPTU**. Vancouver: University of British Columbia. 200p. (Soil Mechanics Series n. 120).
- Robertson, P. K.; Campanella, R. G.; Gillespie, D. & Rice, A. (1986): **Seismic CPT to measure in-situ shear wave velocity**. Journal of Geotechnical. Engineering., ASCE, vol. 112, n.8, p. 791-804.

- Robertson, P. K. & Campanella, R. G. (1988): **Guidelines for geotechnical design using CPT and CPTU data**. 340 p. (Report FHWA)
- Robertson, P. K.; Campanella, R. G.; Brown, P. T. & Robinson, K. E. (1988): **Prediction of wick drain performance using piezocone data**. Canadian Geotechnical Journal, vol. 25, n. 1.
- Robertson, P. K.; Campanella, R. G.; Gillespie, D. & By, T. (1988): **Excessive pore pressure in the DMT test**. Proceedings of I European Symposium on Penetration Testing, Florida..
- Robertson, P. K. & Campanella, R. G. (1989): **Design manual for use of CPT and CPTU**. Vancouver: University of British Columbia.
- Robertson, P. K. (1990): **Soil classification using the cone penetration test**. Canadian Geotechnical Journal, vol. 27, n. 1, p. 151-158.
- Robertson, P. K.; Sully, J.P., Woeller, D.J., Lunne, T., Powell, J.J.M. e Gillespie, D.G. (1992): **Estimating coefficient of consolidation from piezocone tests**. Canadian Geotechnical Journal, vol. 29, n° 4, p 539-550.
- Robertson, P. K. & Fear, C.E., (1995): **Liquefaction of sands and its evaluation**. IS Tokio 95, First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Keynote Lecture, November 1995.
- Robertson, P. K.; Lunne, T. & Powell, J. (1996): **Application of penetration tests for geo-environmental purposes**. London: Thomas Telford. p. 407-419. (Advances in Site Investigation Practice).
- Robertson, P. K. (1998): **Geo-environmental investigation, characterization and monitoring using penetration techniques**. Anais do Simpósio Brasileiro de Geotecnia Ambiental – SIGA 98, São Paulo, 1 CD-Rom.
- Sanglerat, G., (1972): **The penetrometer and soil exploration**. Elsevier. 1972.
- Schmertmann, J.H. (1978): **Guidelines for Cone Penetration Test, Performance and Design**. Federal Highway Administration, Report FHWA-TS-787-209, Washington.
- Schnaid, F Consoli, N. C. & Averbek, J. H. (1998): **Aspects of cone penetration in natural weakly-cemented deposits, Geotechnical Site Characterization**. Atlanta, 1988 Balkema, Rotterdam, Vol. 2, pp. 1159-1163.

- Schneider, J.A., Hoyos Jr, Laureano, Mayne, P. W., Macari, E. J. e Rix, G. J. (1999): **Field and laboratory Measurements of Dynamic Shear Modulus of Piedmont Residual Soils**. GSP 92, ASCE. Behavioral Characteristics of residual Soils.P 12-25.
- Schneider, J.A. e Mayne, P.W. (2000) **Liquefaction Response of Soils In Mid-America Evaluated by Seismic Cone Tests**. Inovations and Applications in Geotechnical Site Characterization. Proceedings. In: Geo Denver 2000. P. 1-16.
- Senneset, K & Janbu, N. (1984): **Shear strenght and deformation parameters obtained from static cone penetration tests**. Symposium ASTM STP 883, San Diego.
- SGI (1995): **The CPT Test, Equipament – Testing – Evaluation**. Information 15 E, SGI - Statens Geotekniska Institut Linköping.
- Torstensson, B.A. (1984): **A New System for Groundwater Monitoring**. Ground Water Monitoring Review, Fall 1984, pp. 131-138.
- US EPA (1989): **Seminar on site characterization for subsurface remediations**. United States Environmental Protection Agency, Technology Transfer, 350 p. (Report CERI-89-224)
- US EPA. (1991): **Description and Sampling of Contaminated Soils – A field pocket guide – EPA 625/12-91/002**. United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, Center for Environmental Research Information, 1991.
- Vargas, M (1968): **Mecânica dos Solos**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, 1968.
- Vogelsang, D. (1995): **Environmental Geophysics. A practical guide**. Springer-Verlag, Berlim, 172 p.
- Weemees, I. A. (1990): **Development of a resistivity cone for groundwater contamination studies**. M.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver
- Wilson, D. & Campanella, R.C. (1997): **A rapid in-situ hidraulic conductivity measurement in sands using a UBC modified BAT penetrometer**. 50th Canadian Geotechnical Conference, Ottawa, Oct 1997, pp. 34-41.